

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН
Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова
Сибирское отделение РАН
Академия наук Республики Саха (Якутия)



**ГЕОЛОГИЯ И МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВЫЕ РЕСУРСЫ
СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ**

**Материалы XIV Международной научно-практической конференции,
посвященной 300-летию Российской Академии наук
и 100-летию золотодобывающей промышленности РС (Я)**

26 – 29 марта 2024 г.

Якутск
2024

УДК 55(063) (571.56)
ББК 26.3Я43 (2 Рос. Яку)

Ответственный редактор

В.Ю. Фридовский

Редакционная коллегия:

А.В. Прокопьев, Я.Б. Легостаева, О.Б. Олейников, Л.И. Полуфунтикова

На обложке: Западное Верхоянье. Река Сирелендже.

Фото А.В. Костина, 2007 г.

Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России [Электронный ресурс]: материалы XIV Международной научно-практической конференции, посвященной 300-летию Российской Академии наук и 100-летию золотодобывающей промышленности РС (Я), 26-29 марта 2024 г. / [Отв. ред. В.Ю. Фридовский]. – Якутск : **Издательский дом Академии наук РС(Я), 2024.** – 1 электрон. опт. диск.

ISBN

В сборнике представлены труды XIV Международной научно-практической конференции, посвященной геологии и минерально-сырьевым ресурсам Северо-Востока России, прошедшей в очно-заочной форме. Изложены результаты изучения тектоники, геодинамики, эволюции литосферы и магматизма, геологии, минералогии и рудообразующих систем месторождений полезных ископаемых СВ Азии. Приведены новые сведения по гидрогеологии, геоэкологии, мерзлотоведению, а также технике и технологии разведки и добычи полезных ископаемых.

Материалы сборника предназначены для научных работников и специалистов, а также студентов, обучающихся по геологическим специальностям.

ISBN

УДК 55(063) (571.56)
ББК 26.3Я43 (2 Рос. Яку)

ISBN

© ИГАБМ СО РАН, 2024
© Северо-Восточный
федеральный университет, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОЛОГИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Акинин В.В. Ревизия магматических комплексов и возраст золотого оруденения в южной части Верхояно-Колымского орогенного пояса (изотопно-геохронологические аспекты)....	
Алексеев В.И. Редкометалльные цвиттеры северного плутона, Чукотка.....	
Анисимова Г.С., Кондратьева Л.А. Золото-галлиевый парагенезис руд Хохойского месторождения (Алданский щит)....	
Афанасьев В.П., Похиленко Н.П., Барабаш Е.О. Минералы-индикаторы предположительно докембрийских алмазоносных пород северо-востока Сибирской платформы.....	
Афанасьев В.П., Похиленко Н.П. Признаки кимберлитового магматизма на южном фланге Виллойской синеклизы.....	
Барабаш Е.О., Афанасьев В.П., Вавилов М.А., Похиленко Н.П. Необычное проявление кимберлитового магматизма на северо-востоке Сибирской платформы.....	
Баранов Л.Н., Толстов А.В. Условия и последовательность образования минералов апатит-магнетитовых руд массива Томтор.....	
Батугина Н.С., Хоютанов Е.А. Особенности освоения россыпных месторождений золота в современных условиях..	
Березкин В.И., Герасимов Б.Б., Кравченко А.А. Химические составы плагиогнейсов трондьемитового и тоналитового состава в билляхской зоне тектонического меланжа Анабарского щита.....	
Бондарь-Лунецкас Н.А., Кравченко А.А., Иванов Е.Е., Лоскутов Е.Е. Петрография пород зеленокаменного комплекса рудопроявления Утанах (Верхне-Тимптонский золоторудный район).....	
Васильев Р.И., Сивцев А.И., Карпова М.И. Оценка начальных запасов на основе уравнения материального баланса.....	
Герасимов Б.Б., Желонкин Р.Ю., Кондратьева Л.А. Типоморфные признаки россыпного золота реч. Левый Улахан Хаптасыннаах (Анабарский щит).....	
Жмодик С.М., Розанов А.Ю., Лазарева Е.В., Иванов П.О., Белянин Д.К., Карманов Н.С., Пономарчук В.А., Сарыг-оол Б.Ю., Мороз Т.Н. Биоморфные структуры монацитов и сульфидов железа в куларитах Куларского хребта (Республика Саха (Якутия)).....	
Журавлев А.И., Округин А.В., Лоскутов Е.Е., Иванов А.И., Кравченко А.А., Иванов М.С. Самородное золото из россыпей Эвотинского рудно-россыпного района и месторождения им. П. Пинигина (Алдано-Становой щит).....	
Зинчук Н.Н., Зинчук М.Н. Особенности состава основной массы кимберлитов Якутии.....	
Зинчук Н.Н. О поисковой роли первичных минералов кимберлитов.....	
Зуева И.Н., Чалая О.Н., Лифшиц С.Х., Глязнецова Ю.С. Геохимия органического вещества кайнозойских отложений индигино-зырянского	

прогиба.....	
Иванов Д.В., Иванов В.В., Толстов А.В. Эффективность применения поисковых критериев и признаков в алаки-мархинском кимберлитовом поле.....	
Иванов Е.Е., Лоскутов Е.Е., Кравченко А.А., Бондарь-Лунецкас Н.А. Вещественный состав руд проявления Утанахское, Верхне-Тимптонский золоторудный район (Алдано-Становой щит).....	
Иванова О.А., Линденблот Е.С., Афанасьев В.П. Алмазы россыпи Аэродромная коса: источники питания россыпи и минералогические особенности алмазов.....	
Исакова Т.А., Петухова Е.С., Соловьев Т.М., Ботвин Г.В., Петров В.В., Павлова В.В., Чириков А.А. Исследование бивней мамонта с применением рентгенофазового анализа, термогравиметрического анализа и ик-спектроскопии.....	
Касаткин Н.С., Аленичева А.А., Юрченко Ю.Ю., Таловина И.В. Новые изотопные данные о возрасте рудоносных магматических комплексов и оруденения перспективного медно-молибденового рудопроявления мыс Павловича (Викинг) в Кони-Пьягинской минерагенической зоне (Северное Приохотье, Магаданская область).....	
Кондратьева Л.А., Анисимова Г.С., Кардашевская В.Н. Ag-содержащий джерфишерит и Те-канфильдит Мурунского рудного узла (Алданский щит).....	
Константинов К.М., Томшин М.Д., Хороших М.С. Петрофизические ореолы структур диатремовой ассоциации.....	
Кужугет Р.В., Анкушева Н.Н. Благороднометальная минерализация и рт-параметры образования Au-Mo-Cu-порфирирового месторождения Ак-Суг (Восточный Саян).....	
Лазарева Е.В., Жмодик С.М., Добрецов Н.Н., Зольников И.Д., Толстов А.В., Лямина В.А. Строение рудного горизонта участка Буранный месторождения Томтор и распределение REE ₂ O ₃ и Y ₂ O ₃	
Лоскутов Е.Е., Никифорова З.С., Журавлев А.И., Иванов А.И. Формирование россыпной золотоносности бассейна реки гонам, объект Юрский (Алдано-Становой щит).....	
Майорова Т.П., Ефанова Л.И. Типоморфные особенности самородного золота золото-мышьяково-сульфидных проявлений Манитанырдского района (полярный урал): сопоставление с аналогичными типами золотого оруденения Северо-Востока России.....	
Милаушкин М.В., Мальковец В.Г., Гибшер А.А., Яковлев И.В. Палеогеотерма, метасоматические преобразования и глубинные разрезы мантии под некоторыми трубками Алаки-Мархинского кимберлитового поля	
Михалицына Т.И., Брынько И.В. Литолого-геохимические особенности и обстановки формирования юрских пород иньяли-дебинского синклинория.....	
Молчанов В.П., Андросов Д.В., Медков М.А., Иванников С.И. О природе разнотипной минерализации ариадненского массива базит-ультрабазитов (Сихотэ-Алинский орогенный пояс).....	
Мырьянов Э.Г., Сивцев А.И., Карпова М.И. Перспективы нефтегазоносности Синского участка недр.....	
Никифорова З.С., Журавлев А.И., Лоскутов Е.Е., Иванов А.И. Минералогические особенности золота в конгломератах мелового возраста (Верхне-	

гонамский район, Алдано-Становой щит).....	
Опарин Н.А., Олейников О.Б. Минералы группы шпинели кимберлитов трубки им. А.П. Смелова (Центральная Якутия).....	
Павлушин А.Д., Иванов К.О., Демидова Л.А., Антонова Т.А. Сложное многократное двойникование кристаллов как причина аномалий в развитии уникальных по форме алмазов из коллекции «АЛРОСА».....	
Патрикеев П.А., Ахияров А.В., Погодаев А.В. Перспективы нефтегазоносности венд-нижнекембрийских отложений сибирской платформы.....	
Полуфунтикова Л.И., Фридовский В.Ю., Кудрин М.В. Геохимическая специализация рудовмещающих толщ Au-Sb-Hg месторождения Кючус.....	
Похиленко Н.П., Афанасьев В.П., Похиленко Л.Н., Тычков Н.С. Признаки присутствия и перспективы выявления высокоалмазоносных кимберлитов среднепалеозойского возраста на территории Оленекского поднятия и его обрамления.....	
Савченко В.А. Применение комплексной маловысотной бпла-геофизической съемки для объективизации среднемасштабных геологических карт.....	
Солтани-Дехвани А., Лодиз А., Жанабаев Р.К., Шабани-Сефиддашти Ф. Медное оруденение Жезказганского региона, Центрального Казахстана: взгляд на рудогенез и структурно контролируруемую минерализационную систему.....	
Специус З.В., Иванов А.С., Гриффин В.Л., О'Рейли С.Й., Рубанова Е.А. Два алмазоносных эклогита из кимберлитовой трубки Зарница.....	
Толстов А.В., Лапин А.В., Кузьмин В.И. Новый взгляд на геологию, технологию и экономику ниобий-иттрий-скандиевых руд Томторского месторождения.....	
Толстов А.В., Лапин А.В., Слепцов А.П. Марганец томторского рудного поля.....	
Томшин М.Д., Гоголева С.С. Поиски кимберлитов по морфологии трапповых силлов (на примере траппов в бассейне р. Моркока).....	
Фридовский В.Ю., Кряжев С.Г., Полуфунтикова Л.И., Кудрин М.В., Анисимова Г.С. Локальный контроль, минеральные ассоциации, флюидные включения, микроэлементный и изотопный (S-O) состав руд месторождения Бадран: к происхождению орогенных золоторудных систем Яно-Колымского пояса.....	
Фридовский В.Ю., Тарасов Я.А., Кудрин М.В., Полуфунтикова Л.И., Иванов Е.Е. ⁴⁰ Ag/ ³⁹ Ag возраст золото-кварцевых руд и взаимоотношения пластических и хрупких деформаций на месторождении маринское алах-юньской металлогенической зоны (Южное Верхоянье).....	
Фридовский В.Ю., Кудрин М.В., Тарасов Я.А. Структуры Нижнеянского шарьяжа и Au-Sb-Hg оруденение (Северо-Восток Якутии)	
Хасанов И.М., Михалицына Т.И., Макарова Д.В. Геолого-геофизическая характеристика золоторудного оруденения дайкового типа (на примере месторождения Шахтное).....	
Яковлев И.В., Мальковец В.Г., Гибшер А.А. Милашкин М.В. Проблемы определения мощности литосферы и "Алмазного окна" с использованием мономинеральной геотермобарометрии для перидотитовых гранатов кимберлитовой	

ТЕКТОНИКА, ГЕОДИНАМИКА И ЭВОЛЮЦИЯ ЛИТОСФЕРЫ

Баранов В.В. Динамика биоразнообразия брахиопод на рубеже поздней юры и раннего мела.....	
Брусницына Е.А., Худолей А.К. Палеозойский гранитный магматизм в южной части приколымского террейна (Магаданская область): новые геохронологические данные	
Васильев Д.А., Прокопьев А.В., Ершова В.Б., Худолей А.К. Оценка мощности денудированных пород на северо-востоке Сибирской платформы и хараулахском сегменте Верхоянского складчато-надвигового пояса по данным низкотемпературной геохронологии.....	
Верниковская А.Е., Матушкин Н.Ю., Ларионов А.Н., Травин А.В., Кадыльников П.И., Богданов Е.А. Граниты рапакиви и ассоциирующий магматизм, как индикаторы смены тектонического режима в эволюции неопротерозойской активной континентальной окраины (Енисейский кряж, Восточная Сибирь).....	
Гриненко В.В. Среднемезозойские осадочные образования востока Сибирской платформы (состояние изученности, основные проблемы и способы их решения).....	
Гриненко В.В., Ощепкова М.Г. Основные геологические тела из разрезов верхнего триаса-нижней юры западной периферии вилуйской синеклизы.....	
Гусев Н.И., Романова Л.Ю., Скублов С.Г. Геохимия и возраст циркона из аккреционной олистостромы Хапчанской серии анабарского щита.....	
Иванов А.И., Лоскутов Е.Е., Иванов М.С., Журавлев А.И., Кравченко А.А., Тимофеев В.Ф. Вещественный состав и геохронология мезозойского магматизма центральной части Эвотинского рудного района (Алдано-Становой щит).....	
Иванов М.С., Иванов А.И., Лоскутов Е.Е., Журавлев А.И. Типоморфизм плагиоклазов медведевского и таежного массивов Эвотинского рудного района (Алданский щит, Южная Якутия).....	
Карпинчик Г.О., Савельев А.Д. Особенности распределения малых элементов в нижнерифейских песчаниках юго-востока Анабарского щита.....	
Килясов А.Н., Кутыгин Р.В. О выделение парамексикоцерасовых слоев в чансинском ярусе верхней перми Южного Верхоянья.....	
Копылова А.Г. Ассоциация минералов и интерметаллических соединений в металлическом железе из сибирских траппов.....	
Королева О.В., Копылова А.Г., Полянский О.П., Прокопьев А.В. Геохимические особенности кварцевых сиенит-порфиров олекминского штока чаросинского дайкового пояса, Якутско-Вилуйская крупная изверженная провинция.....	
Курапов М.Ю., Ершова В.Б., Прокопьев А.В., Проскурнин В.Ф., Багаева А.А. Пермский постколлизийный магматизм центрального и северного Таймыра.....	
Курапов М.Ю., Конопелько Д.Л., Ершова В.Б., Проскурнин В.Ф., Петров С.В.,	

Берзин С.В. Триасовый адакитовый магматизм северо-востока полуострова Таймыр.....	
Кутыгин Р.В., Килясов А.Н. Реконструкция онтогенетического развития ранних отоцерасов (ammonoidea) по поперечным сечениям их раковин.....	
Макаров А.А. Кластерный анализ сейсмичности Илин-Тасского землетрясения (северо-восточная часть хребта Черского)	
Макошин В.И., Кутыгин Р.В. О присутствие зоны jakutoproductus protoverkhoianicus верхнего карбона в разрезе Тит-Ары (низовье р. Лена).....	
Николаев А.И. Создание 3d - модели внутреннего строения брахиопод с использованием программы “Blender”	
Оболкин А.П., Оболкин А.А., Слепцова М.И. Сейсмофации западного замыкания Новосибирско-Чукотской надвиговой зоны.....	
Овчинников Р.О., Сорокин А.А., Сальникова Е.Б., Ковач В.П. Метавулканы дьяглейской толщи бурейнского континентального массива (центрально-азиатский складчатый пояс): результаты геохимических и Sm-Nd изотопно-геохимических исследований.....	
Округин А.В., Эрнст Р.Е., Томшин М.Д. Петролого-геохимические особенности пород и потенциальное Cu-Ni сульфидное оруденение в позднедокембрийских базитах анабарского щита	
Охлопкова И.Ф., Колосов П.Н. Систематическое положение двух форм микрофоссилий венда Якутии.....	
Прокопьев А.В., Ершова В.Б., Шманяк А.В., Худолей А.К. Магматизм и тектоника северо-востока острова Октябрьской Революции (архипелаг Северная Земля).....	
Прокопьев И.Р., Дорошкевич А.Г. Минералогия и включения в редкометалльных карбонатах Средняя Зима (Восточный Саян).....	
Протопопов Р.И. Петрологические особенности гранитов Верхояно-Индибирской и Приколымской зон орогенеза по данным типоморфизма биотитов.....	
Рожин С.С., Игнатъев А.А., Килясов А.Н. Зона otoceras - уникальный геологический объект Южного Верхоянья.....	

ГИДРОГЕОЛОГИЯ, ГЕОЭКОЛОГИЯ И МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЕ

Абрамов Д.А., Макарьева О.М., Землянкова А.А., Осташов А.А., Нестерова Н.В. Температурный режим многолетнемерзлых пород верховьев р. Колымы.....	
Аянитова Т.М., Макаров В.Н. Оценка поступления химических элементов из летней атмосферы.....	
Белозерцева И.А., Власова Н.В., Воробьева И.Б., Сороковой А.А., Лопатина Д.Н., Шеховцов А.И., Зверева Н.А., Скосырский Н.А. Опыт почвенно-геохимических и почвенно-картографических работ в зонах интенсивного природопользования.....	

Вавилов С.А., Неклюдов В.В. Исследование участка «Кристалл» методом геоэлектротомографии.....	
Васильева Т.И., Легостаева Я.Б. Почвенные новообразования посттехногенных территорий.....	
Васильева Т.И., Шадринова О.В. Изучение литогенного аспекта при камнеобразовании в организме человека	
Великин А.С., Чжан Р.В. Выявление характера и природы обходной фильтрации на ГТС Западной Якутии с помощью геофизических методов.....	
Воробьев С.А. Процессы формирования высококонтрастных аномалий в донных осадках рек на территории с фоновым содержанием элементов в почве.....	
Глянцева Ю.С., Львова О.С., Попова Н.И., Васильева Н.А., Чербакова Н.Н. Геохимическая оценка эффективности биопрепарата «Ленойл»® – NORD для очистки нефтезагрязненных почв Арктики.....	
Гололобова А.Г. Термин «тяжелые металлы»: история и текущие дебаты.....	
Горохов И.В., Христофоров И.И., Данилов К.П., Исакова Т.А., Петухова Е.С. Картирование донных отложений реки Колыма методом георадиолокации при поиске ископаемой мамонтовой кости	
Землянскова А.А., Макарьева О.М., Шихов А.Н. Наледи Магаданской области.....	
Иванова И.К., Калачева Л.П., Портнягин А.С., Иванов В.К., Бубнова А.Р. Изучение состава газов в гидратах природного газа и их стабильности в пористых средах.....	
Калачева Л.П., Иванова И.К., Портнягин А.С., Иванов В.К., Бубнова А.Р. О возможности захоронения углекислого газа в подмерзлотных водоносных горизонтах.....	
Козлова А.А., Людвиг У.И., Приставка А.А., Уткина А.Д. Магнитная восприимчивость почв Южного Предбайкалья, осложненных палеокриогенезом	
Куклина С.Л. Следы криогенных процессов в почвах долины р. Белой (Южное Прибайкалье).....	
Легостаева Я.Б., Попов В.Ф., Сивцева Н.Е., Михайлова В.А. Воздействие добычи ископаемой мамонтовой кости на мерзлотно-гидрологические условия в бассейне среднего течения реки Индигирки.....	
Легостаева Я.Б., Сивцева Н.Е., Руфова А.А. К вопросам оценки засоленности почв и грунтов (на примере городских приозерных территорий).....	
Лифшиц С.Х., Глянцева Ю.С., Чалая О.Н., Зуева И.Н., Львова О.С. Особенности трансформации нефтезагрязнений в почвах различных климатических зон Якутии.....	
Лопатовская О.Г. Гезкологическая ситуация в городе Иркутске, связанная с применением противогололедных реагентов.....	
Макаров В.Н. Ртуть в городской атмосфере.....	
Макарьева О.М., Шихов А.Н., Илюшина П.Г., Землянскова А.А. Оценка динамики нарушенных ландшафтов Магаданской области, связанных с добычей золота.....	

Манькин Е.Ф., Санников Ф.П. Особенности формирования природных рассолов в пределах карьерного поля трубки «Ботуобинская».....	
Маркова С.А., Макаров В.Н. Влияние температуры снежного покрова на миграцию химических элементов.....	
Менярова В.С., Сивцев А.И., Рудых И.В. Изменения давления в межмерзлотных водах.....	
Мурзин Ю.А. Криогенный рельеф хребет Кисилых.....	
Паламарчук В.А., Башкова А.А. Геохимические особенности природных вод г. Салехард (ЯНАО) в летний период 2023 г.....	
Погодаев А.В., Севостьянова Р.Ф. Гидрогеологические условия нефтегазоносности центральных областей Предверхоянского прогиба.....	
Полубелова А.В., Павлова Н.А., Огонеров В.В. Гидрогеологические условия в районе поселка Мохсоголлох Хангаласского района Республики Саха (Якутия).....	
Попов В.И. Способ обеспечения температурных условий при организации основания штабеля выщелачивания в условиях криолитозоны.....	
Попов В.И. К вопросу сохранения сыпучих свойств промерзающих дисперсных материалов.....	
Попов В.Ф., Васильва О.И., Донская А.Е. Геоэкологические факторы риска складирования ЖБО села Борогонцы (Центральная Якутия).....	
Попов С.В., Кашкевич М.П., Романова Н.Е., Малышева А.М., Лебедева Л.С. Результаты геофизических работ по изучению субэкринных надмерзлотных таликов района реки Шестаковка, Центральная Якутия.....	
Романис Т.В., Куть А.А., Мельников А.Е., Тумской В.Е. Эксперимент циклического промерзания-протаивания почв и пород: исторические предпосылки и методика.....	
Руфова А.А. Пространственно-временная трансформация озерных котловин в условиях города.....	
Сивцев М.А., Жирков А.Ф. Оценка возможности восстановления геокриологических условий территорий с сильно льдистыми отложениями Центральной Якутии.....	
Собакин П.И., Чевычелов А.П., Горохов А.Н. Радиоэкологическая обстановка в зоне уранового месторождения Эльконское плато в Южной Якутии.....	
Таппырова Н.И., Кравцова О.Н., Протодяконова Н.А. Теплопроводность мелкодисперсных грунтов с учетом количества незамерзшей воды	
Тумской В.Е., Романис Т.В. Проблема происхождения отложений ледового комплекса.....	
Чевычелов А.П., Собакин П.И., Горохов А.Н. Геоэкологические и геохимические основы формирования радиоактивных загрязнений в Эльконском ураново-рудном районе (Южная Якутия).....	
Чжан А.А., Заболотник П.С., Чжан Р.В., Чжан Т.Р., Гаврильев А.А.	

Оценка эффективности работы проветриваемого подполья здания большой площади в условиях изменения климата в г. Якутске.....	
Шадринова О.В. Факторы и предпосылки развития техногенного засоления почв в северотаежных ландшафтах Якутии	
Шерстенникова С.Р., Иванов Б.В., Лебедева Л.С., Прохорова У.В. Оценка чувствительности модели расчёта теплообмена поверхности с атмосферой для района бассейна реки Шестаковка, Центральная Якутия.....	
Янников А.М., Каратеев И.А. Особенности криогидрогеологических условий карьерного поля трубки Комсомольская-Магнитная Верхне-Мунского кимберлитового поля.....	

ГЕОЛОГИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 552.3: 550.93: 553.411.071

РЕВИЗИЯ МАГМАТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И ВОЗРАСТ ЗОЛОТОГО ОРУДЕНЕНИЯ В ЮЖНОЙ ЧАСТИ ВЕРХОЯНО-КОЛЫМСКОГО ОРОГЕННОГО ПОЯСА (ИЗОТОПНО-ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ)

Вячеслав Акинин

ФГБУН «Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский
институт им. Н.А. Шило ДВО РАН», 685000, Россия, г.Магадан, ул. Портовая, 16

REVISION OF MAGMATIC COMPLEXES AND AGE OF GOLD DEPOSITS WITHIN SOUTHERN PART OF VERKHOYANO-KOLYMA OROGENIC BELT (ISOTOPIC GEOCHRONOLOGY ASPECTS)

Vyacheslav Akinin

North-East Interdisciplinary Scientific and Research Institute FEB RAS,
16 Portovaya st., Magadan, 685000, Russia

Abstract. We suggest identifying magmatic complexes (formation) in a specific structural zone based on similar age and relationship with mineralization as the main criteria. Three main igneous complexes proposed to distinguish within the southern part of the Verkhoyansk-Kolyma orogenic belt, the Upper Jurassic Nera-Bokhapcha diorite-granitoid to lamprophyre dike swarms, the Upper Jurassic Kolyma granitoid batholiths, and the Upper Cretaceous Omsukchan leucogranite intrusions. The age of gold orogenic mineralization in the province is Valanginian-Hauterivian. It does not correlate with any of the identified igneous complexes, and is probably associated with hydrothermal activity triggered by orogenic deformation processes

1. Введение

Широкое введение в оборот современных изотопно-геохронологических методов датирования (U-Pb, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Rb-Sr и Re-Os по индивидуальным кристаллам и маленьким навескам минералов-геохронометров) в последние десятилетия ставит вопрос о необходимости ревизии выделенных ранее магматических комплексов на Северо-Востоке России, а также позволяет более обоснованно оценивать возраст главных золоторудных месторождений, что важно для металлогенических построений и научно-обоснованного направления поисков и разведки. Перечисленные выше методы локального датирования имеют свои достоинства и ограничения. Главным преимуществом этих методов перед ранее применявшимися методами K-Ar и Rb-Sr датирования по валу пород является хорошая воспроизводимость для объектов одного рода (формация, комплекс, интрузия, конкретное месторождение) и возможность предметно обсуждать результаты на предмет нарушения изотопной системы, применяя ряд дополнительных исследований и наблюдений (в том числе учитывая разную температуру закрытия изотопных систем). Главным ограничением в использовании этих методов является не всегда достаточное геологическое обоснование взаимоотношений геологических тел с надлежаще оформленной документацией ключевых обнажений, позволяющее определить относительную возрастную «вилку» интересующего объекта. Кроме этого, геологи не всегда используют при оценке валидности изотопно-геохронологических дат такие понятия, как дискордантность (U-Pb метод), валидность и воспроизводимость плитного возраста (Ar-Ar), согласованность возраста по плато и изохроне (Ar-Ar), критерии различия изохрон и эрохрон (Re-Os, Rb-Sr).

В южной части Верхояно-Колымской орогенной области или Яно-Колымской золотоносной провинции выделено достаточно большое количество магматических комплексов преимущественно гранитоидного ряда (уаза-инский, верхнеколымский, биликанский, сылгыбыстахский, колымский, негаяхский, басугунынский, сибердыкский, нера-бохапчинский, сохатиный, каньонский [1, 2]. Как оказалось, после масштабного датирования и геохимического исследования интрузий, такое подробное деление является избыточным и нерациональным. Большой объем выполненных в последние годы работ по U-Pb датированию циркона в упомянутых выше магматических комплексах и особенности их состава позволяет нам разделить их на два главных по объему – позднерурские нера-бохапчинский и колымский и (150 ± 5 млн лет) и подчиненный позднемеловой омсукчанский (87-83 млн лет) [3, 4]. Главными необходимыми **критериями выделения магматического комплекса** предлагается считать близкий состав и возраст магм (не превышающий погрешности датировок в выборке) в конкретной структурной зоне, а также наличие рудной минерализации определенного типа, пространственно или парагенетически связанной с выделяемым магматическим комплексом.

2. Магматические комплексы и оруденение юга Верхояно-Колымского орогена

В южной части Верхояно-Колымской орогенной области (Иньяли-Дебинский синклиний и Аян-Юрхский антиклинорий) датировано U-Pb SIMS-методом по циркону более 50 батолитов, штоков и даек преимущественно гранитоидов [4]. U-Pb датирование циркона выполнено на высокоразрешающих чувствительных ионных микрозондах SHRIMP-II и SHRIMP-RG (в ЦИИ ВСЕГЕИ, г.С-Петербург и в Открытой микроаналитической лаборатории Стэнфордского университета, Калифорния, США), с использованием стандартных процедур. При преобладающем общем интервале средневзвешенных дат для разных интрузий от 155 до 145 млн лет, пик гранитного магматизма приходится на титон (около 150 ± 3 млн лет, N=170 обр.). На это же время приходится формирование известково-щелочных вулканических пород Уяндино-Ясачненской дуги, примыкающей к Главному Колымскому батолитовому поясу с северо-востока [5]. Для петротипических верхнеюрских интрузий, относимых к разным магматическим комплексам, возраста практически не отличаются. Так для батолитов Главного пояса (Чьерго, Большой Анначаг, Малый Анначаг, Большие Пороги, Малых Порогов, Оханджа, Тас-Кыстабыт, все колымский комплекс) U-Pb даты по циркону варьируют около 150 ± 3 млн лет. Такой же возраст, с учетом погрешности, имеют цирконы из петротипов - Сибердыкского массива (сибердыкский комплекс), Негаяхского массива (негаяхский комплекс), Басугунынского массива (басугунынский комплекс). Все упомянутые интрузии сложены известково-щелочными ильменит-биотитовыми гранитоидами с характерными Nb-Ta негативными аномалиями. Среди них не выявлены двуслюдяные разности, а цирконы в них, как правило, не содержат унаследованных разновозрастных доменов, характерных для типичных гранитов S-типа. Эти обстоятельства позволили исключить их коллизионную природу [3] и мы предлагаем сейчас объединить их в один колымский комплекс гранитов смешанного I и S-типов.

На основе состава, U-Pb изотопно-геохронологических данных, размера и форм магматических тел, а также пространственного (структурного) контроля размещения промышленных золоторудных месторождений отчетливо выделяются три группы интрузий, которые мы предлагаем объединить в следующие комплексы: 1) нера-бохапчинский комплекс - синхронные батолитам верхнеюрские дайки диорит-порфиринов, гранитоидов и лампрофиров известково-щелочной серии, которые вмещают золоторудные месторождения «дайкового» типа, являясь литолого-структурными ловушками для разгрузки гидротерм; 2) колымский комплекс - верхнеюрские батолиты и штоки, сложенные ильменитовыми известково-щелочными гранитоидами, в которых неизвестны золоторудные месторождения; 3) верхнемеловые, преимущественно пострудные интрузии и дайки, относимые к уаза-инскому, биликанскому и верхнеколымскому комплексам и сложенные магнетитовыми лейкогранитами и гранитоидами повышенной щелочности. Последние мы предлагаем объединить в единый омсукчанский комплекс

Для подавляющего большинства случаев U-Pb возраст по циркону очень хорошо воспроизводится для данной конкретной интрузии, независимо от количества датированных проб в разных местах магматического тела или от лаборатории, где проводилось датирование. Это связано с высокой температурой закрытия изотопной системы в цирконе. Однако при этом необходимо учитывать возможную дискордантность двух U-Pb изотопных систем (206/238 и 207/206), которую не представляется корректно оценить для мезозойских дат в вариантах локального SIMS и LA-ICP-MS методов. Так, для небольшого массива Большой Каньон в шести пробах U-Pb возраст (SHRIMP-II) в четырех пробах варьирует от 148 до 150 ± 2 млн лет, а в двух оставшихся средневзвешенные даты определены как 156 ± 2.5 и 163 ± 3 млн лет [1]. Учитывая, что массив небольшой и одноактового внедрения, такой разброс датировок не может отражать длительную или многофазную кристаллизацию. Более древние даты отражает вероятнее всего захват унаследованных доменов при анализе кристаллов циркона, а точная оценка конкордантности возможна лишь методом ТИМС. Этот пример показывает, что для надежной оценки возраста необходимо в спорных случаях воспроизводить датировки в нескольких пробах одного и того же объекта (интрузии), или проводить датирование референтным ТИМС-методом.

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датировки по биотиту и амфиболу гранитоидов в провинции, в отличие от U-Pb возрастов по циркону, показывают существенный разброс [6], что отражает в ряде случаев, не возраст кристаллизации магм, а возраст остывания до температуры закрытия изотопной системы. Для оценки надежности $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования необходимо учитывать следующие критерии: 1) хорошо выраженное плато не менее чем из 3х ступеней (горизонтальный спектр возрастов) с более чем 50% выделившегося кумулятивного ^{39}Ar (СКВО <1); 2) сходимость возрастов плато и изохроны с учетом погрешностей; 4) изохрона пересекает значение отношения $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ близко к 295.5.

Для определения возраста золотого оруденения в провинции, кроме $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования жильных минералов [7, 8], в последнее время стали применять прямое датирование сульфидов и самородного золота Re-Os изохронным методом [9, 10]. При этом результаты не всегда корректно интерпретируются, используя регрессии с высоким СКВО (эрохроны), или используя построение изохрон по двум точкам. Соответственно, оценки возраста для многих месторождений вряд ли можно считать валидными. Наиболее надежная оценка возраста формирования крупнейшего орогенного месторождения Наталка, полученная тремя разными методами по серициту ($^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$), самородному золоту и арсенопириту (Re-Os) и монациту (СНМЕ) составила от 136 до 132 ± 2 млн лет [10]. Учитывая, что магматических комплексов такого возраста в провинции не установлено, мы связываем формирование месторождения с метасоматическими процессами, триггером которых могли являться крупные сдвиговые и иные региональные деформации.

3. Выводы

1. Для выделения магматических комплексов в конкретной структурной зоне предлагается в качестве главных критериев использовать близкий возраст и взаимоотношение с оруденением.
2. В южной части Верхояно-Колымского орогенного пояса предлагается выделять только три диорит-гранитоидных магматических комплекса –верхнеюрский нера-бохапчинский дайковый, верхнеюрский колымский батолитов и штоков, и верхнемеловой омсукчанский.
3. Возраст золотого орогенного оруденения в провинции валанжин-готеривский, он не коррелирует ни с одним из выделяемых магматических комплексов, и, вероятно, связан с гидротермальной деятельностью, инициированной орогенными деформационными процессами.

4. Благодарности

Исследования выполнены при поддержке гранта РНФ 20-17-00169, а также НОЦ «Север-территория устойчивого развития».

5. Литература:

- [1] Kuznetsov, V.M., Zhigalov, S.V., Vedernikova, A.V., Shpikerman, V.I. State geological map of the Russian Federation. 1:100000 scale (third generation). Verkhoyansk-Kolyma series. Quad P-56 (Seymchan). Explanatory note // St. Petersburg: VSEGEI, 2008. 426 p.
- [2] Schpikerman, V.I., Polubotko, I.V., Vaskin, A.F., Petuchov, V.V. et al. State geological map of Russian Federation. 1:1 000 000 scale (third edition). Verkhoyansk-Kolyma series, Quad P-55 (Susuman). Explanatory note // St-Petersburg. VSEGEI, 2016, 522 p.
- [3] Akinin, V.V., Prokopiev, A.V., Toro, J., Miller, E.L., Wooden, J., Goryachev, N.A., Alshevsky, A.V., Bakharev, A.G., Trunilina, V.A. U-Pb SHRIMP ages of granitoids from the Main batholiths belt (North East Asia) // Dokl. Earth Sci., 2009, no. 426, pp. 605–610.
- [4] Akinin, V.V., Miller, E.L., Toro, J., Prokopiev, A.V., Gottlieb, E.S., Pearcey, S., Polzunenkov, G.O., Trunilina, V.A. Episodicity and the dance of late Mesozoic magmatism and deformation along the northern circum-Pacific margin: North-eastern Russia to the Cordillera // Earth Sci.Reviews, 2020, vol. 208, pp. 103-272.
- [5] Prokopiev, A.V., Ryazanov, K.P., Vasiliev, D.A., Petrov, E.O., Ermakov, N.N., Yudin, S.V. New data on age and composition of volcanic rocks of the Uyandina-Yasachnaya magmatic arc and granitoids of the Main belt (NE Asia) // Geology and mineral resources of North-East Russia. 2021. pp. 105-109.
- [6] Layer, P.W., Newberry, R., Fujita, K., Parfenov, L.M., Trunilina, V.A., Bakharev, A.G. Tectonic setting of the plutonic belts of Yakutia, Northeast Russia, based on $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and trace element geochemistry // Geology, 2001, vol. 29, pp. 167–170.
- [7] Newberry, R.J., Layer, P.U., Gans, P.B., Goncharov, V.I., Goryachev, N.A., Voroshin, S.V. Preliminary analysis of chronology of Mesozoic magmatism and mineralization on Northeast Russia with allowance for $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dates and trace-element data on igneous and mineralized rocks // Gold Mineralization and Granitoid Magmatism of North Pacific. SVKNII DVO RAN, Magadan, 2000, vol. 1, pp. 181–205.
- [8] Voroshin, S.V., Tyukova, E.E., Newberry, R.J., and Layer, P.W. Orogenic gold and rare metal deposits of the Upper Kolyma district, Northeastern Russia: relation to igneous rocks, timing, and metal assemblages // Ore Geol. Rev. 2014, vol. 62, pp. 1–24.
- [9] Fridovsky, V.Y., Goryachev, N.A., Krymsky, R.S. et al. The Age of gold mineralization in the Yana–Kolyma Metallogenic Belt, Northeastern Russia: first data of Re–Os Isotope geochronology of native gold // Russian Journal of Pacific Geology, 2021, vol. 15, pp. 293–306.
- [10] Akinin V.V., Alshevsky A.V., Polzunenkov G.O., Sergeev S.A., and Sidorov V.A. The Age of the Natalka Orogenic Gold Deposit (U–Pb, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Re–Os constrain) // Russian Journal of Pacific Geology, 2023, vol. 17, No. 6, pp. 570–585. Doi: 10.1134/S1819714023060027

РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫЕ ЦВИТТЕРЫ СЕВЕРНОГО ПЛУТОНА, ЧУКОТКА

Виктор Алексеев

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»,
199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия

RARE-METAL ZWITTERS OF THE SEVERN Y PLUTON, CHUKOTKA

Viktor Alekseev

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 2, 21st Line, Vasilievsky island,
St. Petersburg, 199106, Russia

Abstract. The presence of zwitter – quartz-topaz-zinnwaldite metasomatites of the greisen formation, spatially and genetically related to lithium-fluoric granites, is justified in Severny pluton. The zwitter of the Severny pluton contain rare-metal (Nb, Ta, REE, Y, W, Sc, Sn, Bi) mineralization, the prospecting potential of which requires assessment.

1. Введение

Метасоматиты являются признанным индикатором гидротермального оруденения. Еще в средние века немецкие горняки использовали околорудные «грейзены» и «цвиттеры» для поисков оловянных месторождений в Рудных Горах. В.И. Коваленко определил цвиттер как грейзеновую породу, «в состав которой входят (в разных зонах) железистая слюда, топаз, кварц и ряд рудных минералов (касситерит, вольфрамит, колумбит и др.)» [1, с. 43]. Цвиттеры – наиболее высокотемпературные и высокофтористые метасоматиты грейзеновой формации, отличающиеся повышенными содержаниями Li, Rb, Cs, Ta, Nb, Sc. Они повсеместно связаны пространственно и генетически с литий-фтористыми гранитами. За полувековую историю научного изучения цвиттеров сложилось представление, что они составляют основу (базовую формацию) крупнейших оловорудных месторождений [2]. На Северо-Востоке цвиттеры отмечены на месторождениях Невское, Кестер, Депутатское, Полярное, Одинокое, Экуг [3, 4, 5]. Экспедициями Санкт-Петербургского горного университета в 1990–2011 гг. цвиттеры были установлены в процессе картирования метасоматитов Северного гранитного плутона, на восточном побережье Чаунской губы [5, 6]. Доклад посвящен минералого-петрографической характеристике цвиттеров Северного плутона и сопутствующей редкометалльной минерализации.

2. Основной раздел

Северный плутон включает интрузии четырех интрузивных комплексов: 1) пургинского комплекса биотит-роговообманковых гранитов; 2) ичувеевского дайкового комплекса монцогранитов, граносиенитов; 3) чаунского комплекса лейкогранитов; 4) пыркакайского комплекса литий-фтористых гранитов. Преобладают лейкограниты чаунского комплекса. Пыркакайский комплекс входит в состав позднемелового Дальневосточного пояса Li-F гранитов [5] и является рудоносным компонентом альб-сеноманской окраинно-континентальной магматической провинции, выделенной в работе [7]. Главные рудные образования района – жилы турмалинитов с богатой касситеритовой минерализацией (месторождения Ергувеев, Кекурное, Стремительное, Террасовое, Утиное, Глубокое, Пыркакайское). В центральной части плутона, сложенной средне- и крупнозернистыми биотитовыми лейкогранитами, оконтурены поля распространения тел цвиттеров – пластовых залежей, гнезд и субвертикальных зон мощностью до 4,5 м и длиной до 70 м. Наиболее крупные поля цвиттеров площадью до 2 км² находятся в районе месторождений Кекурное и Глубокое.

Выделены циннвальдит-кварцевые и топаз-кварцевые цвиттеры. Циннвальдит-кварцевые метасоматиты состоят из кварца и темной слюды (циннвальдита или Li-содержащего сидерофиллита) с примесью (1–10%) топаза и флюорита. Топаз-кварцевые цвиттеры сложены

кварцем и топазом, содержат примесь флюорита и циннвальдита (1–10%). Цвиттеры содержат реликты гранитов в виде частично замещенного биотита, сильно корродированных зерен альбита и ортоклаза (Рисунок 1, *a, б*). Текстура цвиттеров массивная, структура мелко- или среднезернистая, лепидогранобластовая. Ксеноморфные зерна слюды и короткостолбчатый топаз образуют гнезда и прожилковидные обособления в гетеробластовом кварцевом агрегате. Топаз сосредоточен на контактах слюды и кварца, образует сростки с флюоритом. Акцессорные минералы тяготеют к слюдяным и топазовым обособлениям (Рисунок 1, *в, г*).

Цвиттеры имеют вольфрамово-редкометалльную геохимическую специализацию (Nb, Ta, REE, Y, W, Sc, Sn, Bi) и содержат следующие акцессорные минералы: иттрофлюорит, монацит-(Ce), арсенопирит, Sn-Nb-W-содержащий рутил, вольфрамооксиолит, W-содержащий ильменит, халькопирит, лёллингит, As-торит, Hf-содержащий циркон, ксенотим-(Y), черновит-(Y), берилл, W-содержащий колумбит-(Mn), ишикаваит, торутит, висмутопирохлор, уранополикраз, рувельтит, висмутин, самородный висмут, молибденит, галенит, пирротин, цейнерит (Рисунок 1, *в, г*).

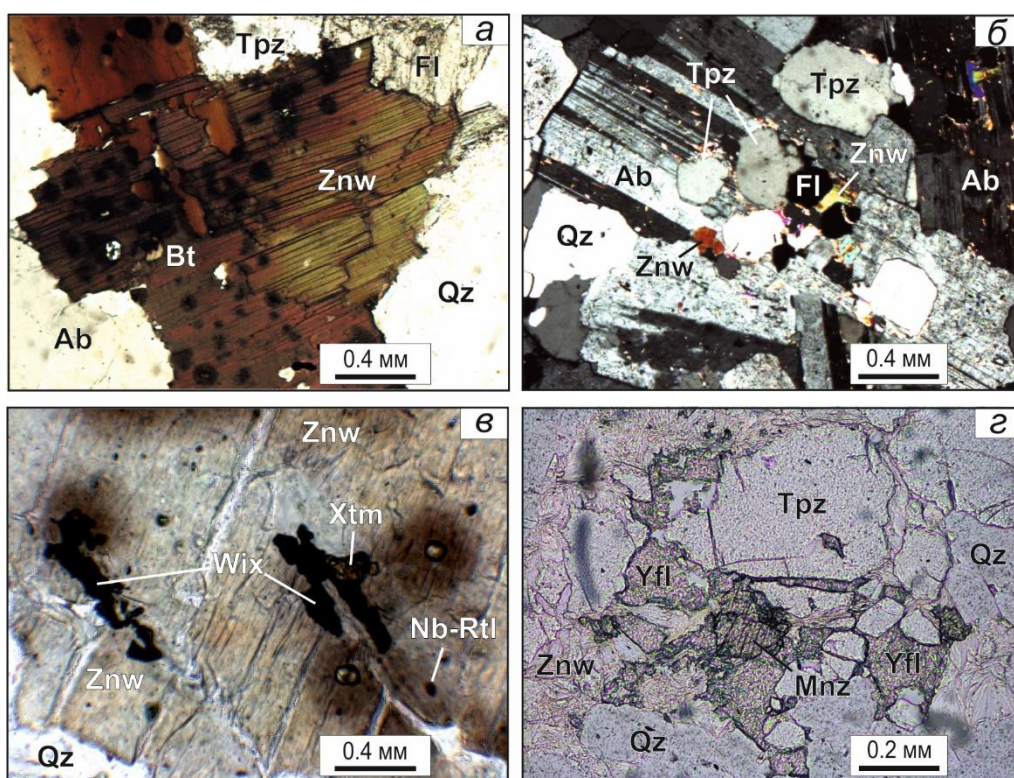


Рисунок 1 – Структуры замещения и редкометалльные минералы в цвиттерах Северного плутона: *a* – замещение магматического биотита циннвальдитом; *б* – замещение альбита топазом, флюоритом и циннвальдитом; *в* – включения вольфрамооксиолита, ксенотима-(Y), Nb-содержащего рутила в циннвальдите; *г* – монацит-(Ce), иттрофлюорит в кварц-топазовом гнезде. Минералы: Ab – альбит, Bt – биотит, Fl – флюорит, Mnz – монацит-(Ce), Nb-Rtl – Nb-содержащий рутил, Qz – кварц, Tpz – топаз, Wix – вольфрамооксиолит, Yfl – Y-содержащий флюорит, Znw – циннвальдит

На современной дневной поверхности промышленных концентраций редкометалльных и вольфрамовых минералов в цвиттерах не выявлено. Возможно, на глубоких горизонтах имеются залежи редкометаллоносных и вольфрамоносных цвиттеров, имеющие промышленное значение.

3. Выводы

1. Обосновано выделение цвиттеров Северного плутона – кварц-топаз-циннвальдитовых метасоматитов грейзеновой формации, пространственно и генетически связанных с литий-фтористыми гранитами.

2. Цвиттеры Северного плутона содержат редкометалльную (Nb, Ta, REE, Y, W, Sc, Sn, Bi) минерализацию, поисковые перспективы которой требуют оценки.

4. Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Чаунского горно-геологического предприятия, Минобрнауки (гос. контракт № 14.740.11.0192, гос. задание № 5.2115.2014/К).

5. Литература:

- [1] Kovalenko V.I., Kuzmin M.I., Kozlov V.D. Metasomatic zwitter and associated rare metal mineralization (based on the examples of deposits in Mongolia and Czechoslovakia) // Metasomatism and ore formation. Moscow: Nauka, 1974. P. 42-53. (in Russian).
- [2] Thomson I.N., Tananaeva G.A. Base formation of tin ore zwitter and their relationship with associated ore deposits // Stages of mineral formation. Moscow: Nauka, 1989. P. 72-78. (in Russian).
- [3] Geology of tin ore deposits of the USSR / Ed. by S.F. Lugov. Vol. 2. Tin Ore Deposits of the USSR. Book 1. Moscow: Nedra, 1986. 429 p. (in Russian).
- [4] Borodkin N.A., Pristavko V.A. Identification of zwitter based on petrochemical and geochemical criteria // Native Geology. 2012. No. 4. P. 49-56. (in Russian).
- [5] Alekseev V.I. Lithium-fluoric granites of the Far East. SPb.: National mineral resources university (Mining University), 2014. 244 p. (in Russian).
- [6] Alekseev V.I. About an origin of lithium-fluoric granite in the Severny massif (Chukotka) // Proc. Russian Miner. Soc. 2005. Vol. 134. No. 6. P. 19-30 (in Russian).
- [7] Khanchuk A.I., Grebennikov A.V., Ivanov V.V. Albian-cenomanian orogenic belt and igneous province of Pacific Asia. Russian Journal of Pacific Geology. 2019. Vol. 13. N 3, p. 187-219. (in Russian).

**ЗОЛОТО-ТАЛЛИЕВЫЙ ПАРАГЕНЕЗИС РУД ХОХОЙСКОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ (АЛДАНСКИЙ ЩИТ)**

Галина Анисимова, Лариса Кондратьева
ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

**GOLD-THALLIUM PARAGENEZIS OF THE KHOKHOYSKOE DEPOSIT
(ALDAN SHIELD)**

Galina Anisimova, Larisa Kondratieva
Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. Further study of the mineralogy of the Khokhoi gold deposit is due to the fact that thallium minerals (weissbergite, avicennite, yankovicite, parapierotite) were discovered in its ores for the first time in Yakutia, and most importantly, a new mineral amgaite was discovered - the first natural compound of thallium with tellurium, along with them were found unidentified thallium antimonates. Thallium minerals are indicators of high-quality gold ores and are characteristic of Carlin-type deposits, all this attracts a lot of attention to them. Most thallium minerals in the Khokhoi deposit are represented by supergene minerals (oxides, tellurates and antimonates), sulfides and sulfosalts occur sporadically. Avicennite, amgaite and unidentified thallium antimonate have a colloform and kidney-shaped texture with a concentrically and rhythmically zonal, kidney-shaped and spherulitic structure of the aggregate. This indicates their simultaneous formation from colloidal solutions, rhythmic crystallization and partly replacement. Moreover, they are the main concentrators of the deposit's native gold. Selective intense (sometimes finely dispersed) saturation with gold is noted in amgaite, less commonly in avicennite, and thallium antimonates contain almost no gold. The close paragenesis of gold and amgaite is associated with the presence of tellurium in its composition, an important absorbent of gold.

1. Введение

Дальнейшее изучение интересной и разнообразной минералогии Хохойского золоторудного месторождения вызвано тем, что в его рудах впервые для Якутии были обнаружены минералы таллия (вейсбергит, авиценнит, янковицит, парапьеротит), а самое главное открыт новый минерал амгаит – первое природное соединение таллия с теллуром [1, 2, 3, 4], наряду с ними были найдены неидентифицированные антимоанаты и карбонаты таллия. Минералы таллия являются индикаторами качественных золотых руд и что очень важно они характерны для руд месторождений Карлин-типа, все это привлекает к ним большое внимание.

Геология и вещественный состав руд месторождения

Хохойское месторождение находится в Верхнеамгинском рудном районе, расположенном на северном склоне Алдано-Станового щита на стыке двух крупных структурных единиц Олекминской гранит-зеленокаменной области и Алданской гранулит-гнейсовой области, в зоне субмеридионального глубинного Амгинского разлома (структурного шва) [1].

Из рудных минералов единственным макроминералом Хохойского месторождения является пирит, который всегда преобразован в гетит или гематит. Все другие рудные минералы образуют микровключения в пирите и жильных минералах. К ним относятся арсенипирит, галенит, антимонит, халькопирит, борнит, сфалерит, бертьерит, шеелит, касситерит, минералы таллия (вейсбергит, янковицит, парапьерротит), ртути (киноварь, колорадоит), самородное золото и серебро. Гипергенные минералы представлены ярозитом, авиценнитом, амгаитом, смитсонитом, хлораргиритом и бисмоклитом.

Золотое оруденение Хохойского рудного поля имеет гипогенно-гипергенную природу. Рыхлые золотоносные образования являются вторичными, их формирование связано с окислением, дезинтеграцией и переотложением в карстовых полостях первичных руд – пирит-адуляр-кварцевых метасоматитов, образованных в результате кремнекалиевого метасоматоза карбонатных пород.

2. Результаты исследований

Проведено изучение гипергенных минералов таллия и их взаимоотношений с самородным золотом.

Морфология таллиевых минералов. Преобладают агрегаты колломорфной структуры (рисунок 1). Наблюдается переход секториальных кристаллов в сферические формы (рисунок 1, а-с). Часто характерны колломорфные формы и сферолиты (рисунок 1, е).

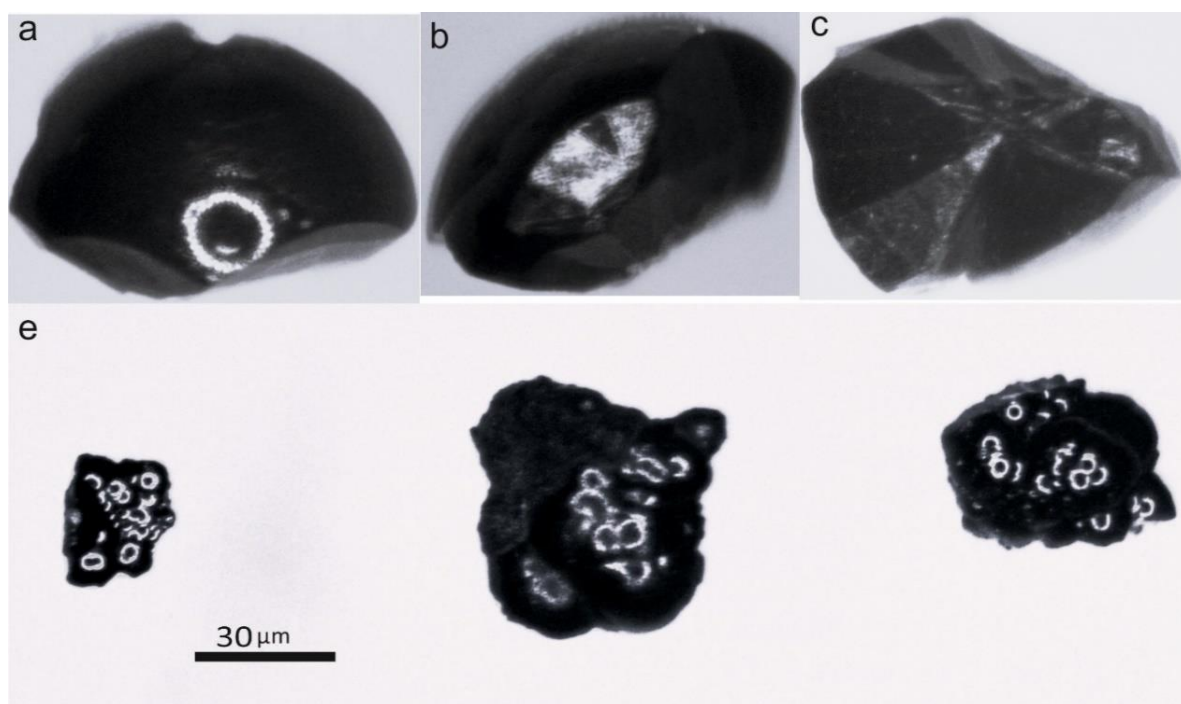


Рисунок 1 – Морфология гипергенных минералов теллура: а-с – переход секториальных кристаллов в сферу
а – сферическая форма (вид сверху), b – комбинация двух видов (вид сбоку), с – секториальные кристаллы (вид снизу), е – колломорфные формы

Колломорфные структуры хорошо демонстрируются при исследовании образцов в отраженном свете (рисунок 2). Они представлены следующими разновидностями: ритмично-зональными, где наблюдается чередование авиценнита, антимоната таллия и амгаита (рисунок 2, а, b), концентрически-зональными (рисунок 1, с), почковидными и сферолитовыми (рисунок 2, d, e, f). Иногда в массивном антимонате таллия наблюдаются концентрически зональные агрегаты его Mn-Fe разновидности (рисунок 2, g). Также отмечаются замещение авиценнита массивной текстуры амгаитом пористого строения (рисунок 2, g) и реликты авиценнита и амгаита в антимонате таллия (рисунок 2, i). Химический состав минералов таллия приведен в таблице 1. Анализы амгаита некондиционны ввиду его пористого строения.

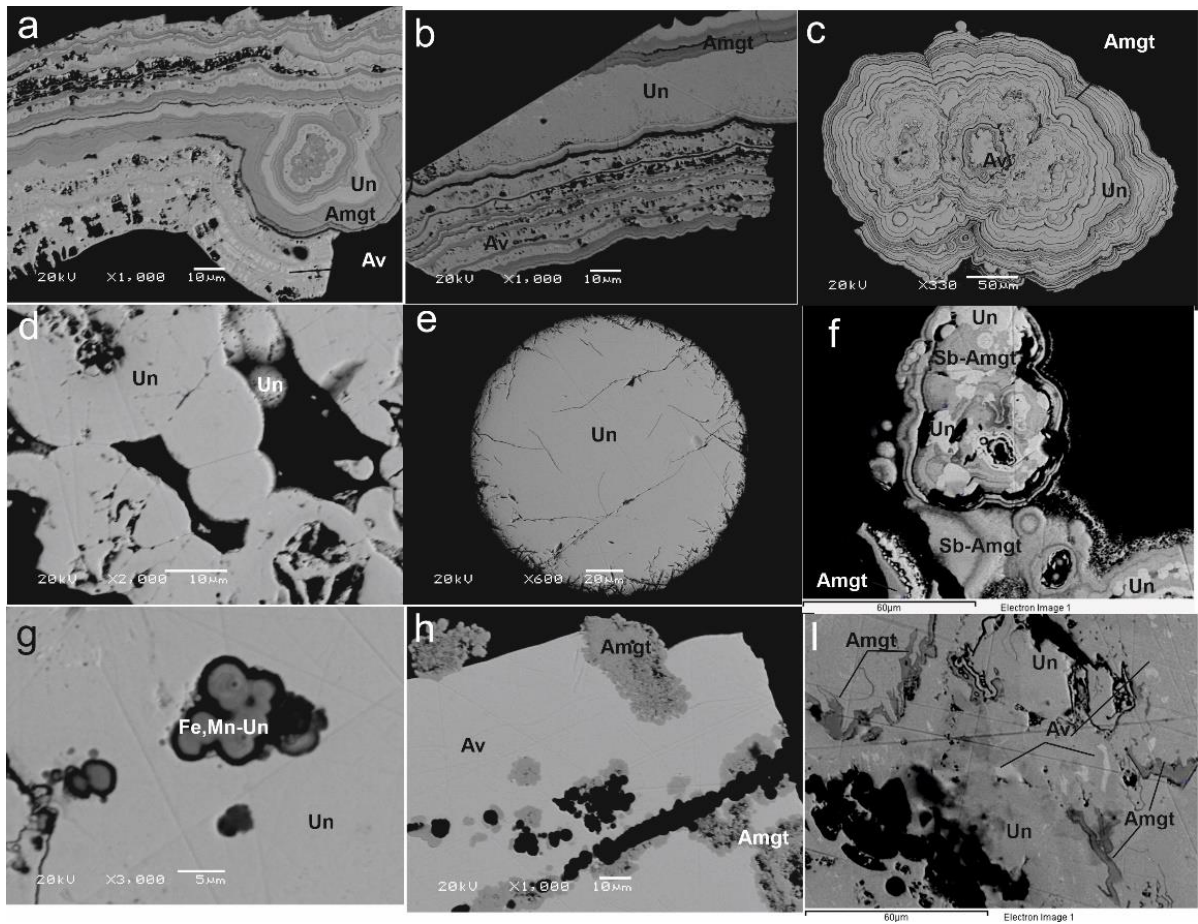


Рисунок 2 – Коллоидная и почковидная текстура коллоидных агрегатов минералов таллия: а, б – структура агрегата ритмически-зональная, с – концентрически-зональная, d – почковидная, в пустотках отмечаются сферолитовые агрегаты неидентифицированного антимоната таллия (Un), е – сферолитовая f – в центре включения антимоната таллия (Un) в Sb-амгаите (Sb-Amgt), в оторочке ритмически зональные агрегаты антимоната (Un) и амгаита (Amgt), g – неидентифицированный антимонат таллия (Un) массивного строения с включениями сферолитов его Fe, Mn-содержащей разновидности, h - замещение массивного авиценнита (Av) амгаитом (Amgt) пористого строения, I – реликты авиценнита (Av) и амгаита (Amgt) в матрице неидентифицированного антимоната таллия (Un). Снято на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6480LV

Таблица 1 – Химический состав гипергенных минералов таллия, масс. %

Минерал	Tl	Te	Sb	Mn	Ca	O	Total
Авиценнит	91.87					7.04	98.90
	93.08					6.87	99.95
	95.81					5.89	100.70
Неидентифицированный антимонат таллия	79.77		10.74			9.63	100.13
	79.40		11.04			9.40	99.85
	79.14		10.96			9.64	99.74
	79.41		10.84			9.30	99.55
	79.80		11.14			9.76	100.70
Амгаит	62.10	20,14				8,16	91,10
	61.45	19,10			1,62	9,96	92,12
	60,85	11,22		1,68		10,07	84,83
	64,73	15,87	3,49		1,36	9,85	93,72

Парагенезис гипергенных таллиевых минералов с самородным золотом. Ранее была описана тесная ассоциация самородного золота с авиценнитом [1, 2, 3]. Дальнейшие исследования показали парагенезис благородного металла со всеми гипергенными минералами таллия, но с некоторыми отличиями его содержания. При этом замечена наибольшая насыщенность золотом

у амгаита (рисунок 3, a-d). Золото в таллиевом минерале концентрически-зональной структуры преимущественно занимает его центральную часть. Нередко интенсивная вкрапленность благородного металла в тесном сростании с авиценнитом также отмечается в ядерной части концентрически-зональных агрегатов всех трех гипергенных минералов таллия (рисунок 3, f). В антимонате таллия самородное золото встречено в единичном случае: более крупные выделения металла заключены в пустотках минерала таллия почковидной структуры (рисунок 3, g).

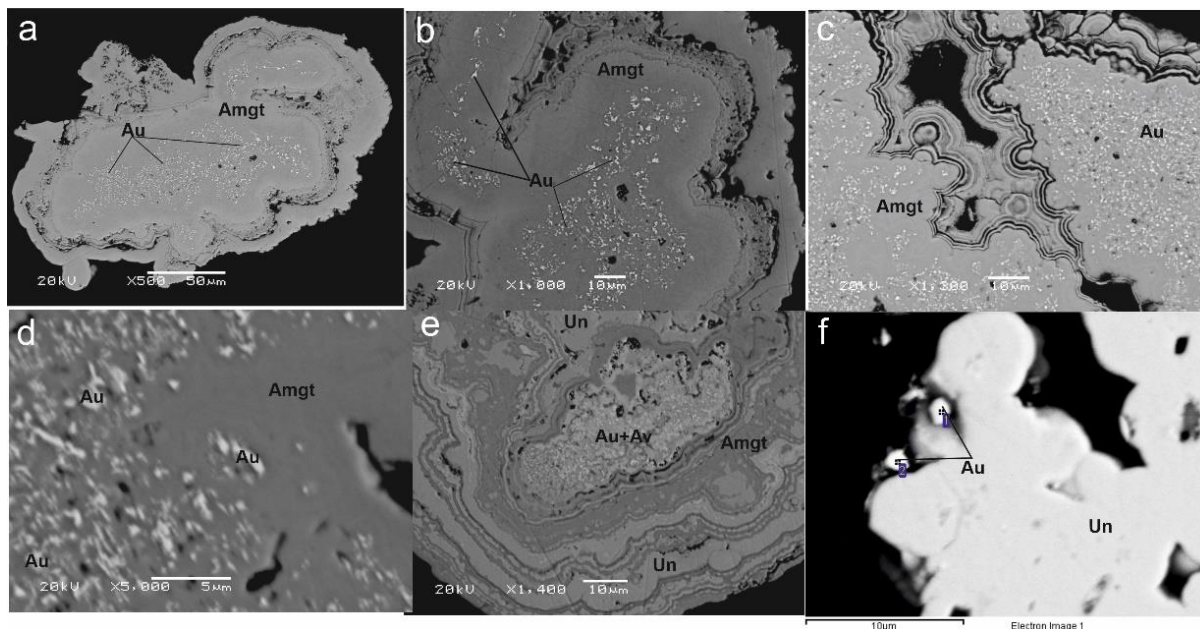


Рисунок 3 – Ассоциация самородного золота с гипергенными минералами таллия:

a-c – интенсивная вкрапленность самородного золота (Au) в амгаите (Amgt), f – ассоциация самородного золота (Au) с авиценнитом (Av) в ядерной части агрегата, g – вкрапления массивного золота (Au) в пустотках неидентифицированного антимоната таллия (Un). Снято на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6480LV

В протолочках проб были найдены минералы темного цвета с проблесками золотистого цвета. Изучение его под рудным и сканирующим электронным микроскопами приводится таблице 2 и на рисунке 4. Оторочка образца представлена амгаитом с вкраплениями самородного золота. Судя по аналитическим данным трудно сказать о центральной части образца - теллурат ли это золота и таллия, либо высокая нанонасыщенность золотом амгаита или теллурид золота и таллия.

Таблица 2 – Результаты микрозондового анализа фрагмента рисунка 4, с, масс. %

№ анал.	O	Ag	Te	Au	Tl	Сумма
1				93.85		93.85
2				94.10		94.10
3				98.43		98.43
4	4.18	3.89	5.36	51.33	20.85	85.61
5	4.51	5.16	5.70	55.53	19.31	90.21
6	6.33	4.53	7.68	54.55	21.48	94.57
7			7,77	59,29	15,69	82,74
8			8,33	52,74	22,62	83,69
9			8,62	56,63	22,66	87,91

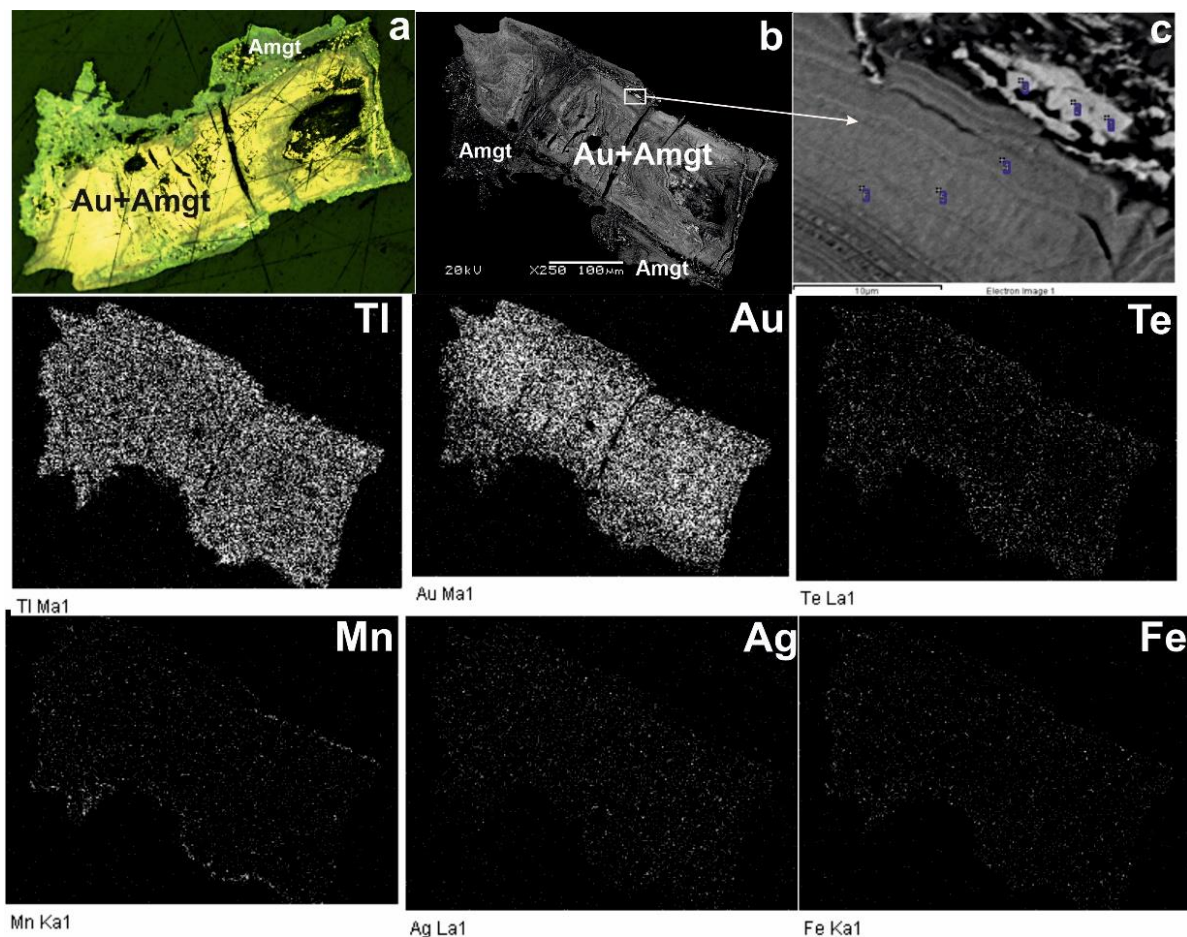


Рисунок 4 – Золотосодержащий амгаит (Au+Amgt) в отраженном свете (а), в обратно рассеянных электронах (b), увеличенный фрагмент с b и растровые картины распределения элементов (Au, Tl, Ag, Te, Fe и Mn) в нем. Снято на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6480LV

3. Обсуждение

Коллоидные структуры обусловлены выпадением тонкодисперсных осадков (коллоидов). Такие структуры гипергенных минералов таллия образовались при одновременном выпадении коллоидных растворов в зоне окисления карстовых полостей.

По данным [5] тесная парагенетическая ассоциация золота с инфильтрационными гидроксидами железа, реже марганца, объяснима либо их совместным осаждением из растворов, либо абсорбцией золота новообразованными осадками вторичных гидроксидов. Это, вероятно обусловлено преимущественно коллоидальным переносом по крайней мере части тонкодисперсного золота. Подобный механизм описывают для месторождений кор выветривания юга Сибири Калинин и др. [7]. По аналогии с этим можно объяснить и тесный парагенезис золота с теллуратами и оксидами таллия в Хохойском месторождении. Избирательная высокая золотонность амгаита видимо связана с присутствием в его составе теллура, который является сорбентом золота. В литературе описывается минерал – хонсаит (Au_3TlTe_2) - первый природный теллурид золота и таллия со следующим химическим составом: Au 56.25%, Tl 19.46% и Te 24.29% [7]. Наши аналитические данные (таблица 2) с некоторой долей условности соотносятся с этим составом, но отличия заключаются в частом присутствии серебра и кислорода.

4. Выводы

1. Большинство минералов таллия в Хохойском месторождении представлены оксидами (авиценнит), теллуратами (амгаит) и антимонатами (неидентифицированный антимонат таллия); сульфиды (вейсбергит) и сульфосоли (янковицит, парапьеротит) встречаются спорадически.

2. Авиценнит, амгаит и неидентифицированный антимонат таллия имеют колломорфную и почковидную текстуру, что свидетельствует об их одновременном образовании из коллоидных растворов, ритмической кристаллизацией и отчасти замещением.
3. Оксиды, теллулаты и антимонаты таллия являются основными концентраторами золота. Отмечается тесное срастание с самородным золотом, что должно учитываться при выборе технологии извлечения благородного металла.
4. Тесная парагенетическая ассоциация золота с теллуратами и оксидами таллия видимо обусловлена преимущественно коллоидальным переносом тонкодисперсного золота.
5. Предстоит дальнейшее изучение неидентифицированного антимоната таллия и выяснение механизма тесного срастания золота с амгаитом.

5. Благодарности

Исследование выполнено за счет государственного задания ИГАБМ СО РАН.

6. Литература:

- [1] Anisimova G.S., Kondratieva L.A. and Kardashevskaja V.N. Characteristics of Supergene Gold of Karst Cavities of the Khokhoy Gold Ore Field (Aldan Shield, East Russia)// Minerals 2020, 10, 139.
- [2] G.S.Anisimova, L.A.Kondratieva and V.N.Kardashevskaja Weissbergite (TlSbS₂) and Avicennite (Tl₂O₃), Rare Thallium Minerals: First Findings in Yakutia // Geology of Ore Deposits, 2022, Vol. 64, No. 7, pp. 424-431.
- [3] Kondratieva, L.; Anisimova, G. Minerals of Hg, Tl and As of Khokhoy deposit (Aldan shield). In Proceedings of the Geology and Mineral Resources of the North-East of Russia: Materials of the XII All-Russian Scientific and Practical Conference Dedicated to the 65th Anniversary of the Institute of Geology of Diamond and Precious Metals, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia, 23–25 March 2022; pp. 184–188.
- [4] Kasatkin, Anatoly V., Galina S. Anisimova, Fabrizio Nestola, Jakub Plášil, Jiří Sejkora, Radek Škoda, Evgeniy P. Sokolov, Larisa A. Kondratieva, and Veronika N. Kardashevskaja. (2022) "Amgaite, Tl₃+2Te₆+O₆, a New Mineral from the Khokhoyskoe Gold Deposit, Eastern Siberia, Russia" Minerals 12, no. 9: 1064
- [5] Wilson, A.E. The economic significance of non-hydrothermal transport of gold, and of the accretion of large gold nuggets in laterite and weathering profiles in Australia//ICAM 81. Proc. 1 Int.Congr. Appl. Mineral. Johannesburg, 1983. P. 229-234.
- [6] Kalinin Yu.A., Roslyakov N.A., Prudnikov S.G. Gold-bearing weathering crusts of southern Siberia. Novosibirsk: Academic Publishing House "Geo", 2006. 337 p.
- [7] Rice, C.M.; Welch, M.D.; Still, J.W.; Criddle, A.J.; Stanley, C.J. Honeaite, a new gold-thallium-telluride from the Eastern Goldfields, Yilgarn Craton, Western Australia. Eur. J. Miner. 2016, 28, 979–990.

**МИНЕРАЛЫ-ИНДИКАТОРЫ ПРЕДПОЛОЖИТЕЛЬНО
ДОКЕМБРИЙСКИХ АЛМАЗОНОСНЫХ ПОРОД СЕВЕРО-ВОСТОКА
СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ**

Валентин Афанасьев, Николай Похиленко, Екатерина Барабаш
ФГБУН «Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева»,
630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3

**INDICATOR MINERALS OF PRESUMABLY PRECAMBRIAN DIAMONDIFEROUS
ROCKS OF THE NORTHEASTERN SIBERIAN PLATFORM**

Valentin Afanasiev, Nikolai Pokhilenko, Ekaterina Barabash
Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3, Akademika Koptyuga ave.,
Novosibirsk, 630090, Russia

Abstract. So far, the possibility of existence of Precambrian diamondiferous magmatites has been based mainly on diamonds. The absence of their indicator minerals was explained by increased mechanical wear of diamonds, at which the indicator minerals are completely destroyed by abrasion. However, there is evidence of the presence of pyrope in Lower Cambrian sediments in the northeast of the Siberian Platform, which indicates the Precambrian age of the bedrock springs. In addition, in the Kyutyungde River basin in the area of the Sololian protrusion of Precambrian rocks (southern part of the Olenek Rise), we found an unusual association of pyrope in modern alluvium, which is not found anywhere else. Its main features are: a very small number of pyrops in schlich samples, while diamonds are more abundant than pyrops; the pyrope association contains an anomalously high number of pyrops of the diamond association - up to 40-50%, which is not typical for Phanerozoic kimberlites. Taking into account the geological position (Precambrian rocks protrusion), such pyrops give grounds for a cautious assumption about the presence of diamondiferous rocks of Precambrian age in this area.

1. Введение

Проблема докембрийской алмазности Сибирской платформы поставлена давно [1], но в последнее время активно разрабатывается главным образом нами [2]. По нашему мнению, без учета возможности докембрийской алмазности невозможно разобраться в минерации россыпей алмазов северо-востока и всего обрамления Сибирской платформы. Безрезультатные поиски фанерозойских коренных источников этих алмазов на протяжении более чем 70 лет дают ясное понимание того, что необходимо менять парадигму коренной алмазности и включать в нее докембрийскую эпоху. К сожалению, типы коренных источников докембрийских алмазов пока неизвестны [3], поскольку неизвестны минералы-индикаторы этих источников, сопутствующие алмазам в россыпях. Отсутствие индикаторов связано с тем, что при повышенной степени механического износа, характерной для потенциально докембрийских алмазов, индикаторные минералы не имеют шансов сохраниться. Единственным путем обнаружения индикаторов докембрийских алмазносных пород, равно как и их алмазов, служит опробование древних отложений – потенциальных коллекторов таких минералов. Тяготение потенциально докембрийских алмазов к выходам докембрийских пород служит важнейшим критерием и для поиска индикаторных минералов докембрийских источников алмазов.

2. Результаты исследования

Сведений об индикаторных минералах и алмазах из древних отложений Сибирской платформы очень мало. Наибольшее их количество найдено и описано Э.А. Шамшиной в нижнекембрийских конгломератах северо-востока Сибирской платформы: две пробы получены

в низовьях реки Лена, одна в приустьевой части реки Беенчима и одна в районе устья реки Чускуна [4]. В эти отложения индикаторные минералы могли попасть только из более древних, протерозойских источников. Оказалось, что в большинстве своем они представлены гранатами, из которых основную долю составляют пиропы, аналогичные пиропам из кимберлитов. На представленной в книге диаграмме показаны точки составов 230 зерен гранатов, большинство точек расположены в поле составов пиропов лерцолитового парагенезиса (около 200 зерен), есть пять зерен алмазного парагенезиса (Рисунок 1).

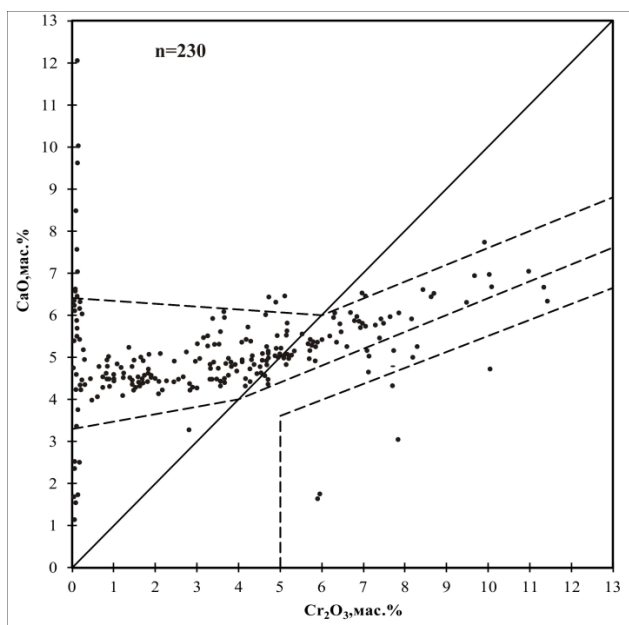


Рисунок 1 – Диаграмма составов гранатов из нижнекембрийских отложений северо-востока Сибирской платформы [4].

Достоверные диагностированные пикроильмениты отсутствуют. Судя по составам пиропов, они могут происходить из протерозойских кимберлитов или лампроитов.

Нами изучены одно зерно пироба и 39 хромитов из нижнекембрийских отложений; минералы получены в ходе полевых работ С.А. Грахановым и переданы нам для изучения в рамках совместных работ. В пробе Ерк-1 на левом берегу реки Оленек в пределах Оленекского поднятия найден один пироб фиолетового цвета (хромистый) размером около 1,5 мм (Рисунок 2а, б).

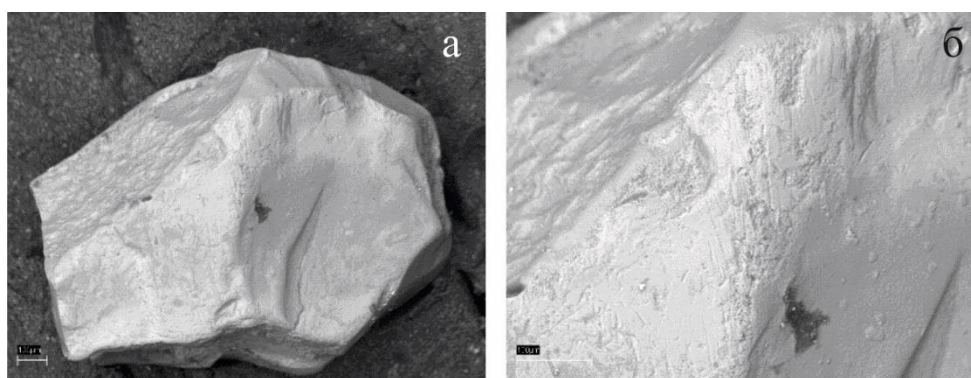


Рисунок 2 – Морфологические особенности пироба и хромита из нижнекембрийских отложений. А, б - пироб из нижнекембрийских отложений: слабый механический износ, видны царапины; гипергенная коррозия отсутствует; а – общий вид, б – детали рельефа

Все хромиты имеют размер менее 0,5 мм, по морфологии относятся к т.н. «ложным» индикаторам кимберлитов [5].

Таким образом, находки пиропов в нижнекембрийских и вендских отложениях северо-востока Сибирской платформы однозначно свидетельствуют о существовании на этой территории

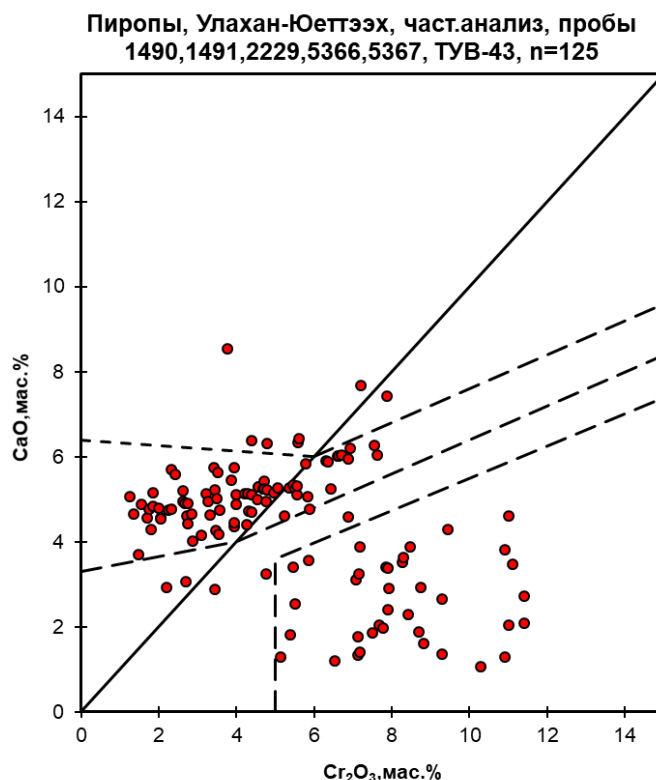


Рисунок 4 – Сводная диаграмма составов пиропов из аллювия реки Улахан-Уэттях

3. Обсуждение результатов исследования

Таким образом, по пиропам бассейны рек Улахан-Уэттях, Куччугуй-Уэттях, Дебенгде, располагающиеся на площади выходов протерозойских – нижнекембрийских отложений в пределах поднятия, резко выделяются на фоне соседних ореолов, в первую очередь к западу, источниками которых являются фанерозойские кимберлиты, в том числе среднепалеозойские алмазоносные кимберлиты. Оленекское поднятие активно воздымается с начала мезозоя и за это время можно предполагать снос с поднятия в западных румбах, но не в обратном направлении, поэтому минералогическая ситуация в пределах поднятия определенно указывает на местные источники глубинных минералов. Такого распределения составов пиропов, как на Рисунке 4, нет ни в одной фанерозойской кимберлитовой трубке Сибирской платформы, и это позволяет предполагать возможность существования более древних источников алмазов. Тип коренного источника определить затруднительно, можно предположить, что это кимберлиты или лампроиты.

4. Выводы

Предположение о существовании на территории Сололийского выступа докембрийских алмазоносных пород высказано впервые. Чтобы получить аргументацию за или против этой гипотезы необходимо провести специализированное крупнообъемное опробование вендских прибрежно-морских отложений, развитых на этой территории. Мы предполагаем высокую вероятность обнаружения в них глубинных минералов, что определенно укажет на существование докембрийской эпохи алмазоносного магматизма и позволит локализовать местоположение этих магматитов.

4. Благодарности

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН (№ 122041400157-9).

5. Литература:

- [1] Metelkina M.P., Prokopchuk B.I., Sukhodolskaya O.V., Frantsesson E.V. Precambrian diamondiferous formations of the world. – M.: Nedra, 1976 – 134 p.
- [2] Afanasiev V.P., Pokhilenko N.P. Approaches to the diamond potential of the Siberian craton: A new paradigm // Ore Geology Reviews 147 (2022) – 104980.
- [3] Afanasyev V.P., Lobanov S.S., Pokhilenko N.P., Koptil V.I., Mityukhin S.I., Gerasimchuk A.V., Pomazansky B.S., Gorev N.I. Polygenesis of diamonds of the Siberian Platform // Geology and Geophysics – 2011a. – Vol. 52, № 3. – P. 335-353.
- [4] Shamshina E.A. Minerals of kimberlite rocks in different-age sediments of the north of the Siberian Platform. – Yakutsk: YaF SB AS USSR, 1986. – 112 p.
- [5] Afanasyev V.P., Pokhilenko N.P., Logvinova A.M., Zinchuk N.N., Efimova E.S., Safyannikov V.I., Krasavchikov V.O., Podgornykh N.M., Prugov V.P. Features of morphology and composition of chromspinelides of diamondiferous areas in connection with the problem of "false" indicators of kimberlites // Geology and Geophysics. – 2000v. – Vol. 41., № 12. – P. 1729-1741.

ПРИЗНАКИ КИМБЕРЛИТОВОГО МАГМАТИЗМА НА ЮЖНОМ ФЛАНГЕ ВИЛЮЙСКОЙ СИНЕКЛИЗЫ

Валентин Афанасьев, Николай Похиленко
ФГБУН «Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева»,
630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3

SIGNS OF KIMBERLITE MAGMATISM ON THE SOUTHERN FLANK OF THE VILYUI SYNECLISE

Valentin Afanasiev, Nikolai Pokhilenko
Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3, Akademika Koptyuga ave.,
Novosibirsk, 630090, Russia

Abstract. We list the currently known locations of kimberlite indicator minerals on the south-southeast flank of the Vilyui syncline. A conclusion is formulated about the presence of Middle Paleozoic and Mesozoic kimberlite bodies here. The possible location of these kimberlites is discussed.

1. Введение

Кимберлитовые тела среднепалеозойского возраста известны к югу от города Якутск (Менда-Барылайское кимберлитовое поле). Однако признаки кимберлитового магматизма распространены значительно шире.

На территории Якутского погребенного сводового поднятия и в его периферии единичные пиропы впервые были найдены в 1965 г. в аллювиальных отложениях верхнего течения р. Кенкеме А.Е. Киселевым [1]. В 2002-2003 гг. в процессе проведения полевых работ на р. Кенкеме геологами ГУП Якутской поисково-съёмочной экспедиции Б.П. Подъячевым и Т.В. Бикбаевой [2] в косовых гравийно-галечных отложениях среднего течения р. Кенкеме близ озера Аппа-Анны из двух проб объемом по 1 м³ извлечено 46 пиропов размером от 0,25 до 1,2 мм и 10 зерен пикроильменита; эти индикаторы кимберлитов были описаны нами [3, 4]. В работе [5] приведены данные о находках индикаторных минералов кимберлитов во внутренних частях Виллюйской синеклизы. В ходе полевых работ в бассейне реки Намана (приток реки Лена) геологи Амакинской экспедиции обнаружили единичные зерна индикаторных минералов.

Нашими работами пиропы найдены на реке Чакая (приток реки Кенкеме) примерно в 60 километрах к северо-западу от города Якутска. Изучены зерна пироба из неогеновых отложений, вскрытых в карьере строительных материалов. Проанализировано 141 зерно пироба. Распределение их составов характерно для юрско-меловых неалмазоносных кимберлитов типа трубок Обнажённая, Муза, но не свойственно продуктивным среднепалеозойским кимберлитам. Выполненные исследования позволили установить связь кимберлитового магматизма с позднеюрской-раннемеловой тектоно-магматической активизацией северо-востока Азии [6].

Индикаторные минералы, по составу и морфологическим особенностям соответствующие среднепалеозойским кимберлитам, (24 пироба, в том числе 1 алмазной ассоциации, и 282 пикроильменита) найдены в верховьях реки Марха (левый приток реки Лена) у самого уреза юрских отложений, которые являются здесь промежуточным коллектором этих индикаторов [7]

Недавние наши работы по реке Синяя (левый приток реки Лена) позволили обнаружить пиропы в нижнем ее течении. По морфологическим признакам (наличие признаков гипергенной коррозии и повышенный механический износ) пиропы происходят из среднепалеозойских кимберлитов.

2. Возможная локализация кимберлитовых тел

В указанных выше случаях индикаторные минералы кимберлитов были найдены либо в русловом аллювии в районах денудации юрских отложений, либо в неогеновых отложениях. Во всех случаях индикаторные минералы имели признаки «древности» в форме гипергенной коррозии, либо механического износа, которые указывают на переотложенный характер минералов и привнос их со стороны. Поэтому важно определить направление перемещения минералов для понимания местоположения их коренных источников.

Указанные находки индикаторов можно рассматривать в контексте развития Вилуйской синеклизы и Алданской антеклизы. Вилуйская синеклиза начала развиваться в конце палеозоя и была объектом осадконакопления на протяжении мезозоя. Основным источником сноса обломочного материала с южных румбов в это время была Алданская антеклиза. Поэтому можно с осторожностью предполагать основным направлением переноса индикаторных минералов с Алданской антеклизы в сторону Вилуйской синеклизы. Следовательно, местоположение кимберлитов можно предполагать на территории Алданской антеклизы. Однако наше шлиховое опробование рек Буотама и Туолба не выявило в их аллювии индикаторных минералов. При этом нужно отметить неблагоприятные условия шлихового опробования из-за большого количества песка из размывших на этой территории юрских отложений. Однако возможна и другая причина. Наше шлиховое опробование верховьев реки Тюнг к северо-западу от Вилуйской синеклизы показало полное отсутствие не только индикаторов кимберлитов, но и в целом минералов тяжелой фракции в русловом аллювии. Это связано с тем, что длительная денудация пермских и юрских отложений на этой территории в связи с воздыманием с конца палеозоя Анабарской антеклизы и прогибанием Вилуйской синеклизы привела к тому, что весь обломочный материал был перенесен в сторону синеклизы и полностью оголился карбонатный плотик. Но индикаторные минералы и алмазы сохранились здесь в массовом количестве в карстовых депрессиях; одна из них была найдена нами в устье ручья Атырджак (приток реки Тюнг). Этот вариант нужно проверить и на Алданской антеклизе на ее открытых территориях: возможно, в карсте, который хорошо фиксируется аэромагнитными аномалиями, будут найдены индикаторы кимберлитов.

3. Выводы

Присутствие индикаторных минералов кимберлитов на южной периферии Вилуйской синеклизы указывает на наличие в регионе кимберлитовых тел. Возраст этих тел среднепалеозойский и мезозойский, его можно определить по химическому составу и морфологическим особенностям пиропов [8]. Наиболее вероятно нахождение кимберлитовых тел на склоне Алданской антеклизы, примыкающем к Вилуйской синеклизе.

4. Благодарности

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН.

5. Литература:

- [1] Kiselev A.E. Aquagenic and ash tuffs of the Lena-Vilyuyskaya oil-and-gas bearing province // Soviet Geology, 1970. – No. 3. – P. 85-97.
- [2] Podyachev B.P., Izbekov E.D., Bikbaeva T.V. Signs of diamond potential in the Yakutsk vicinities // Science and Technology in Yakutia, 2003. – No. 2 (5). – P. 61-65.
- [3] Afanasyev V.P., Zinchuk N.N., Izbekov E.D., Podyachev B.P. Prospects of diamond potential of the southern side of the Vilyui syncline // Otechestvennaya geologiya. 2007. – № 1. – P. 119-122.
- [4] Izbekov E.D., Podyachev B.P., Afanasyev V.P. Signs of symmetric diamond potential of the eastern part of the Siberian Platform (relative to the axis of the Vilyuyskaya syncline) // DAN, 2006. – Vol. 411, № 3. – P. 352-353.

- [5] Bozhevoly I.I., Chernyi S.D. Regularities of the Middle Paleozoic kimberlite fields of the southeastern part of Yakutian diamondiferous province // *Otechestvennaya Geologiya*, 1997. – No. 5. – P. 7-9.
- [6] Afanasyev V.P., Pokhilenko N.P., Grinenko V.S., Kostin A.V., Malkovets V.G., Oleinikov O.B. Kimberlite magmatism of the southeastern flank of the Vilyui syncline // *DAN*, 2020. – T. 490. – №2. – P. 1-5.
- [7] Afanasyev V.P., Pokhilenko N.P., Kuligin S.S., Samdanov D.A. On the prospects of diamond potential of the southern flank of the Vilyui syncline // *Geology of Ore Deposits*, 2020. – Vol. 62, No. 6. – P. 561-567.
- [8] Egorova E.O., Afanasiev V.P., Pokhilenko N.P. On the Middle Paleozoic kimberlite magmatism of the north-east of the Siberian platform // *DAN*, 2016. – V. 470, № 6. – P. 692-695.

НЕОБЫЧНОЕ ПРОЯВЛЕНИЕ КИМБЕРЛИТОВОГО МАГМАТИЗМА НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Екатерина Барабаш, Валентин Афанасьев, Михаил Вавилов, Николай Похиленко
ФГБУН «Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева»,
630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3

UNUSUAL KIMBERLITE MAGMATISM IN THE NORTHEAST OF THE SIBERIAN PLATFORM

Ekaterina Barabash, Valentin Afanasiev, Mikhail Vavilov, Nikolai Pokhilenko,
Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3, Akademika Koptyuga ave.,
Novosibirsk, 630090, Russia

Abstract. Kimberlite indicator minerals (KIMs) from the watershed of the Kyr-Razboinik River (tributary of the Olenyok) are of two groups distinguished according to morphology: (i) minerals derived directly from weathered primary kimberlite deposits known in the area and (ii) placer minerals redeposited from older host formations. Compositions for both groups of pyrope are characteristic of Jurassic-Cretaceous age kimberlites. This indicates that already in the Middle Paleozoic, deep metasomatism in some areas is similar to Mesozoic metasomatism.

1. Введение

На северо-востоке Сибирской платформы пространственно совмещены кимберлиты трех эпох кимберлитового магматизма (среднепалеозойской, триасовой и юрско-меловой). Продуктивные кимберлитовые тела связаны только со среднепалеозойской эпохой. Наиболее вероятно, это обусловлено последующим уменьшением мощности литосферы и общим увеличением интенсивности вторичного обогащения перидотитов мантии в ряду возрастов проявлений кимберлитов Сибирской платформы: средний палеозой – нижний триас – верхняя юра и связано с воздействием на нижние уровни литосферы среднепалеозойского и пермско-триасового плюмов [1]. Поэтому при оценке перспективности площади на коренную алмазоносность ключевое значение имеет возраст коренных источников.

Для оценки перспективности коренной алмазоносности бассейна р. Кыра–Разбойник была изучена морфология и состав индикаторных минералов кимберлитов (ИМК) из ореолов рассеяния и коренных источников, известных в пределах изучаемой площади.

2. Обсуждение результатов исследования

ИМК на исследуемой территории представлены пиропом, пикроильменитом и хромитом. Морфология ИМК показывает, что в бассейне р. Кыра–Разбойник присутствуют две группы ИМК: минералы прямого сноса с эродируемых в настоящее время кимберлитовых тел и переотложенные из ранее существовавших верхне- и среднепалеозойских коллекторов. Минералы прямого сноса характеризуются минимальным износом и отсутствием гипергенной коррозии (Рисунок 1А). Для переотложенных ИМК характерна средняя до высокой степень механического износа (Рисунок 1Б) и наличие следов гипергенной коррозии на пироплах (Рисунок 1В) [2].

На карте отмечены пробы, в которых присутствуют пиропы и пикроильмениты, которые по морфологическим особенностям относятся к переотложенным (Рисунок 2). Видно, что пиропы с повышенной степенью механического износа и каплевидным рельефом тяготеют преимущественно к приустьевым частям ручьев вблизи из впадения в р. Оленек, однако окатанные пикроильмениты распространены не только в долине р. Оленек, но и вдоль всего изученного участка рек Хос-Терюття и Кыра-Разбойник.

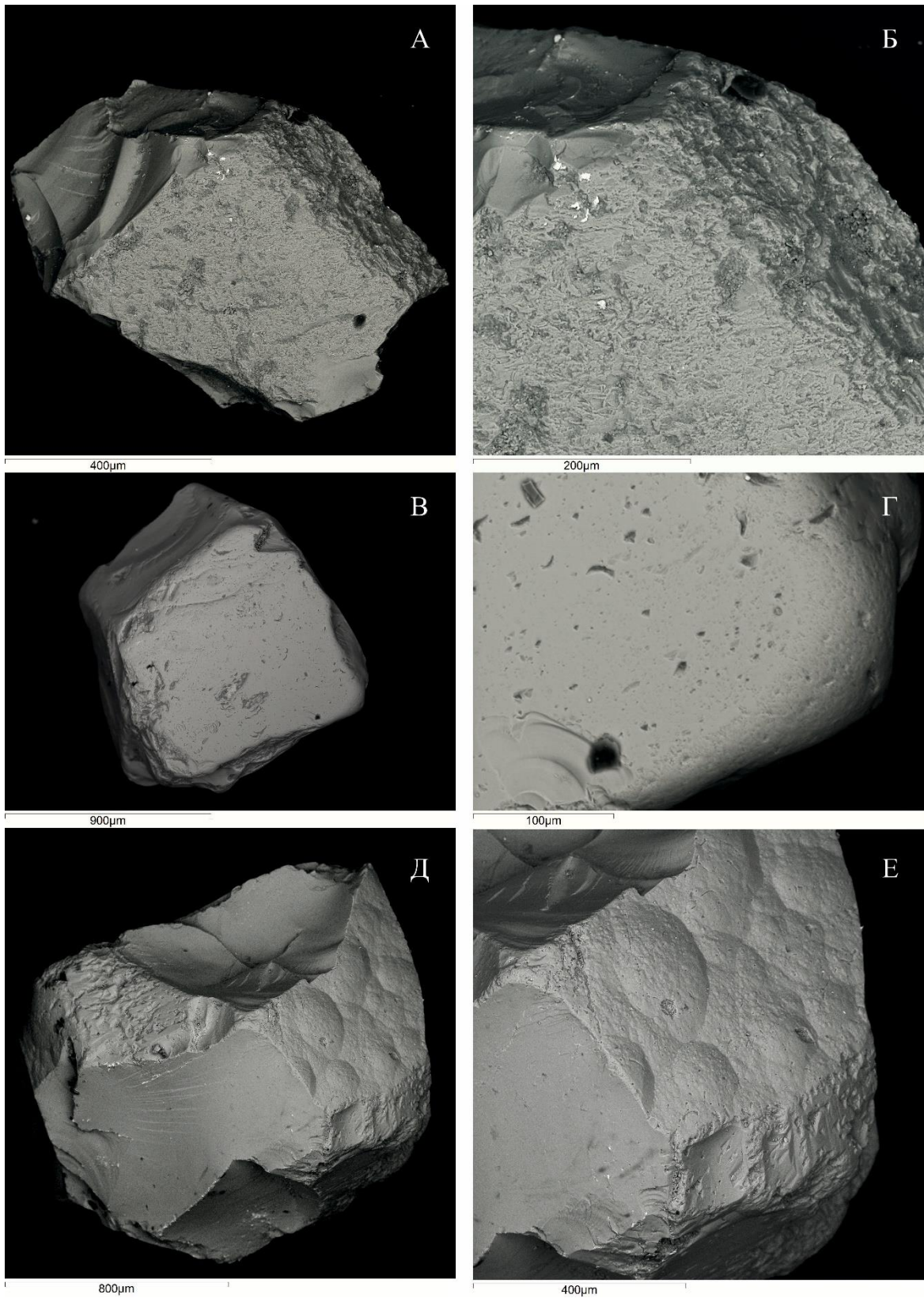


Рисунок 1 – Морфологические особенности пиропов бассейна р. Кыра-Разбойник. А, Б - пироп со слабым механическим износом, В, Г - средняя степень механического износа пиропов, механогенная полировка ребер и вершин, Д, Е - пироп с каплевидным рельефом гипергенного растворения

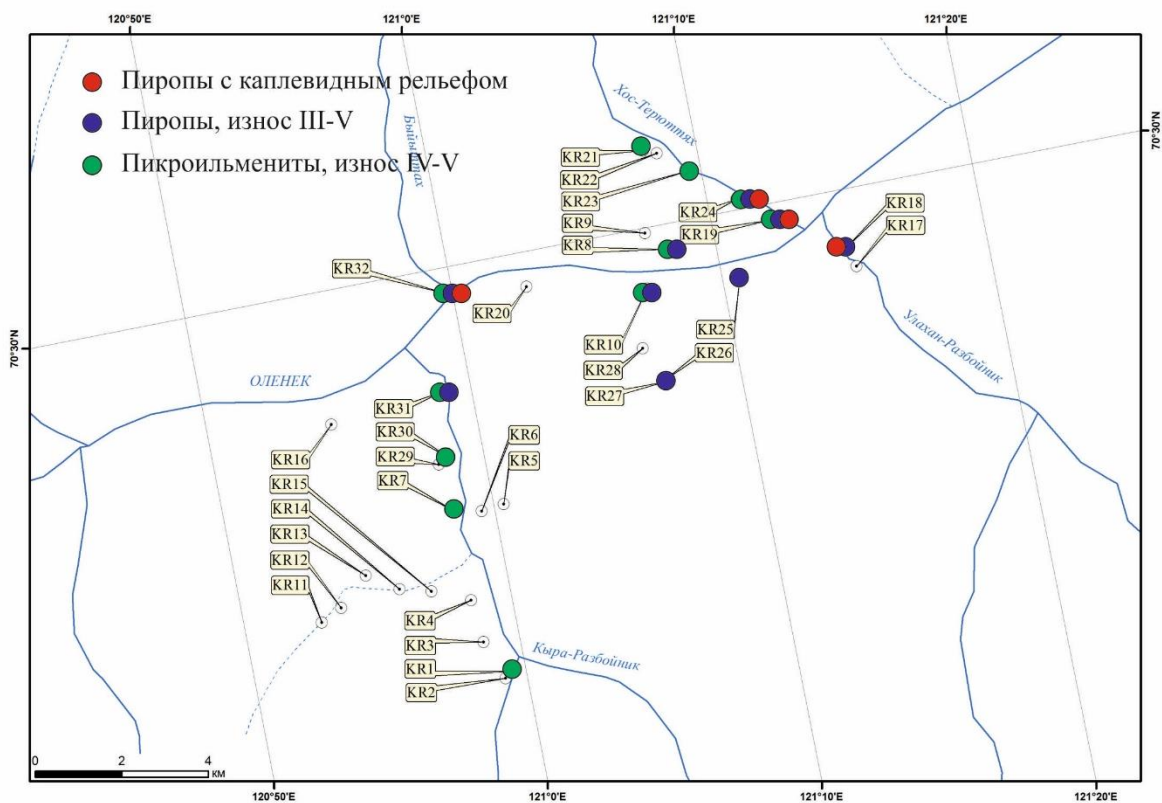


Рисунок 2 – Карта фактов, распределение ИМК с признаками переотложения из среднепалеозойских коллекторов

Был изучен химический состав пиропов, как интегральных проб, так и отдельной выборки со следами механического износа и каплевидным рельефом (Рисунок 3). Пиропы изучаемого района главным образом малохромистые ($\text{Cr}_2\text{O}_3 < 10 \text{ мас.}\%$) и низкокальциевые ($\text{CaO} < 8 \text{ мас.}\%$). Данный район интересен тем, что по морфологическим особенностям ИМК представлены смесью минералов прямого сноса без признаков механического износа, соответствующих местным юрским кимберлитам, и переотложенных из ранее существовавших палеозойских коллекторов, соответствующих среднепалеозойским кимберлитам [3]. Однако распределение составов пиропов на диаграмме $\text{CaO-Cr}_2\text{O}_3$ [4] для тех и других групп пиропов практически одинаковое. Такое распределение составов, как правило, характерно для кимберлитов юрско-мелового возраста и обусловлено тем, что мощный глубинный метасоматоз в мезозое переработал основание литосферы и изменил характер гранатсодержащих пород [5, 6]. Это не исключительный случай. На Марха-Тюнгском междуречье в большинстве проанализированных проб составы пиропов из руслового аллювия показывают «вилку», у которой одна ветвь соответствует среднепалеозойским кимберлитам, другая – мезозойским. Между тем, все пиропы по морфологическим признакам соответствуют среднепалеозойским кимберлитам. По всей видимости, уже в среднем палеозое местами литосферная мантия была переработана метасоматозом, результаты которого оказались близки к более позднему мезозойскому. Этим объясняется схожесть распределения составов пиропов из среднепалеозойских и мезозойских кимберлитов для указанных площадей.

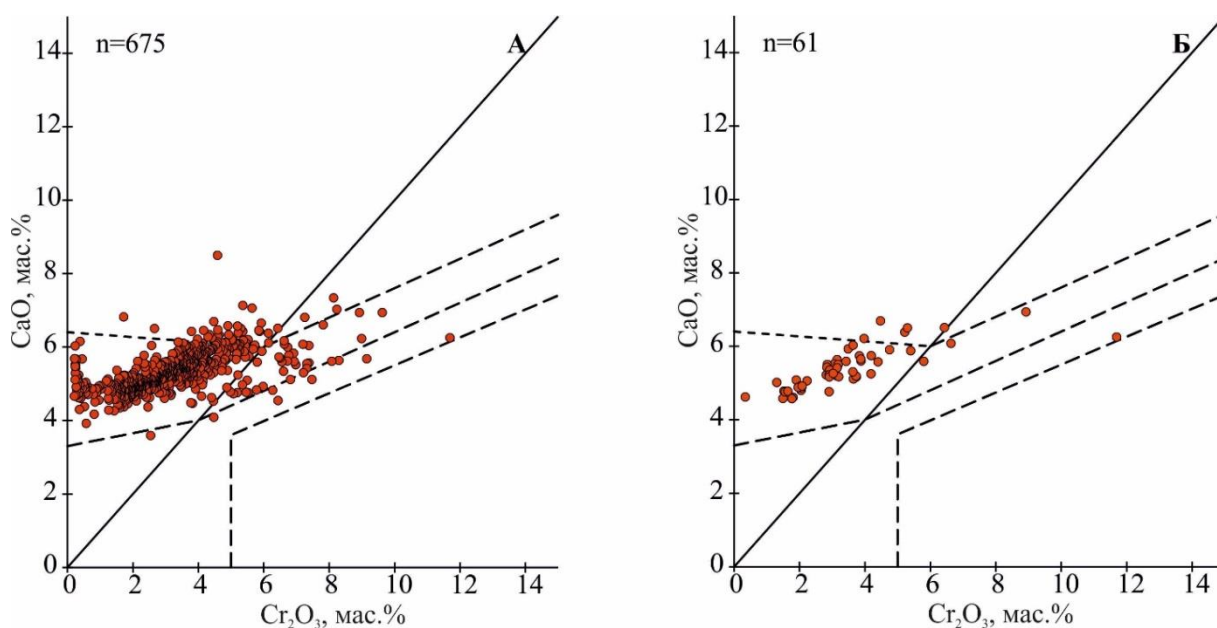


Рисунок 3 – Диаграммы составов пиропов бассейна р. Кыра-Разбойник: А – интегральная проба, Б – пиропы с признаками переотложения из среднепалеозойских коллекторов.

3. Выводы

Указанные примеры могут свидетельствовать о том, что уже в среднем палеозое глубинный метасоматоз на некоторых территориях давал результаты, сходные с мезозойским метасоматозом. Поэтому при прогнозировании кимберлитов с точки зрения возраста необходимо учитывать не только составы пиропов, но и их морфологические особенности.

4. Благодарности

Авторы благодарны сотрудникам Аналитического центра многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН (г. Новосибирск, Россия), где проводились аналитические исследования.

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН (№ 122041400157-9).

5. Литература:

- [1] Pokhilenko N.P., Afanasiev V.P., Agashev A.M., Pokhilenko L.N., Tyckov N.S., Lithospheric mantle composition and structure variations under the Siberian Platform kimberlite fields of different ages // *Geodynamics and Tectonophysics*, 2022, Т. 13, № 4.
- [2] Barabash E.O., Afanasiev V.P., Pokhilenko N.P., Ivanov P.O. Primary diamond deposits in the Kyra-Razboinik catchment (tributary of Olenek river): potential appraisal // *Geology and mineral resources of North-East Russia*, 2022, pp. 274-279
- [3] Afanas'ev V.P., Agashev A.M., Pokhilenko N.P. Dispersion halos of kimberlite indicator minerals in the Siberian platform: history and formation conditions // *Geology of Ore Deposits*, 2013, vol. 55, № 4, pp. 256-264.
- [4] Sobolev N.V., Lavrent'ev Yu.G., Pokhilenko N.P., Usova L.V. Chrome-rich garnets from the kimberlites of Yakutia and their parageneses // *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1973, vol. 40, pp. 39–52
- [5] Pokhilenko N. P. et al. Carbonatite metasomatism of peridotite lithospheric mantle: implications for diamond formation and carbonatite-kimberlite magmatism // *Russian Geology and Geophysics*, 2015, vol. 56, №. 1-2, pp. 280-295.
- [6] Pokhilenko N.P., Sobolev N.V., Kuligin S.S., Shimizu N. Peculiarities of distribution of pyroxenite paragenesis garnet in Yakutian kimberlites and some aspects of the evolution of the Siberian craton lithospheric mantle // *Proc. 7 IGC, Cape Town*, 1999, vol. 2, pp. 689-698.

УСЛОВИЯ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОБРАЗОВАНИЯ МИНЕРАЛОВ АПАТИТ-МАГНЕТИТОВЫХ РУД МАССИВА ТОМТОР

Леонид Баранов¹, Александр Толстов²

¹ АК «АЛРОСА» (ПАО), 630007, Россия, г. Новосибирск, ул. Советская 5

² ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

CONDITIONS AND SEQUENCE OF FORMATION OF MINERALS OF APATITE- MAGNETITE ORES OF THE TOMTOR MASSIF

Leonid Baranov¹, Aleksandr Tolstov²

¹ PJSC «ALROSA», 5, Sovetskaya str., Novosibirsk, 630007, Russia

² Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. This paper presents the results of a study of the mineral composition of phosphorites of the Tomtor massif based on materials from wells 801 and 59. In the course of studying the mineral composition of phosphorites using optical, electron scanning microscopy and microprobe analysis, the relationships of minerals were determined, the conditions and sequence of their formation were established. It has been established that the formation of phosphorites took place in 4 stages: magmatic, metasomatic, hydrothermal, hypogene. During the magmatic stage, with the participation of liquid immiscibility, the Fe-P melt was separated from the silicate (foidolite) melt, from which apatite-magnetite ores were formed, in some cases with the participation of crystallization differentiation. At the contact of silicate (Si, K) and Fe-P (Fe) rocks, with the participation of metasomatism, massive biotite deposits (Si, Al, K + Fe, LE) were formed. Later, hydrothermal processes were superimposed on the rocks, introducing sulfide and carbonate (and associated REE) mineralization. Like the entire massif, the phosphorites were subject to hypogene changes of oxidative and reduction stages, which determined their final appearance in near-surface conditions, transforming them into limonite-francolite lateritic weathering crusts.

1. Введение

Массив Томтор – один из крупнейших в мире комплексов ультраосновных щелочных пород и карбонатитов (УЩК), включающий одноименное месторождение Nb и REE. Попутные полезные компоненты руд, связанные с массивом Томтор: Ti, V, Al, P, Zr, Sr, U, Th. Последние работы по минерации массива свидетельствуют о потенциале марганцевого и благороднометалльного оруденения массива [1, 2, 3]. Сегодня Томторское месторождение в корях выветривания по запасам и концентрациям Nb и REE превышает аналоги и является уникальным [4, 5, 6].

Первые исследования массива были в большей мере направлены на изучение особенностей уникальных эпигенетических руд – в них был детально охарактеризован вещественный состав, подсчитаны запасы, разработана технология их переработки и интерпретирован генезис [3, 7]. Работы последних лет направлены на изучение вопросов комплексной рудоносности массива, в частности минерализации, происхождения и времени образования апатит-магнетитовых руд (фоскоритов) [2, 4, 6, 8]. Фоскориты, в первую очередь, являются ценной рудой на железо и фосфор, однако, как нами было показано ранее, исследуемые породы могут содержать REE, Nb, Y в достаточном количестве для попутного извлечения и, таким образом, являются природнолегированной рудой. В незначительных количествах в фоскоритах также присутствуют Th, U, Sc. Помимо этого, минералогические находки благородных металлов в фоскоритах, диктуют необходимость установления природы их появления и обоснованию возможности выявления зон их повышенных концентраций, что в будущем позволит провести минерогеническую переоценку массива Томтор на комплекс полезных компонентов, включая

Рисунок 1 – Схематическая геологическая карта массива Томтор. Условные обозначения: 1 – Mz-Kz отложения (на разрезе); 2 – траппы; 3 – пермские отложения; 4 – V венд; 5, 6 – рифей; 7 – карбонатиты анкеритовые; 8 – анкерит-шамозитовые породы; 9 – фосфорно-редкометалльные карбонатиты; 10 – апатит-микроклин-слюдистые породы; 11 – карбонатиты безрудные; 12 – кальцит-микроклин-слюдистые породы; 13 – карбонатитовые брекчии; 14 – фоскориты; 15 – жильные у/о породы; 16 – фойдолиты; 17 – щелочные породы; 18-20 – фениты; 21 – жилы; 22 – разломы; 23 – скважины.

В пределах массива Томтор фоскориты выявлены в северо-восточной и южной частях, вблизи границ карбонатитового ядра и щелочных сиенитов, в зонах распространения фойдолитов; они характеризуются широкими вариациями минерального состава и текстурно-структурных особенностей. Текстурно-структурные особенности фоскоритов массива Томтор зависят от преобладания породообразующего минерала и взаимоотношений с вмещающими породами. Граница фоскоритов с фойдолитами и щелочными породами проходит по массивному и пятнистому магнетиту. Граница их с метасоматизированными фойдолитами (апофойдолитами) в редких случаях проходит по магнетиту, аналогично границе со щелочными сиенитами, но чаще присутствует переходная зона: апофойдолит – биотит – апатит – магнетит, которая может быть дополнительно осложнена карбонат-сульфидными прожилками. Мощность отдельных участков переходной зоны может варьировать в широких пределах – от первых миллиметров до первых десятков метров, при этом взаимоотношения участков не являются постоянными. Непосредственно вблизи зоны контакта для фоскоритов характерна пятнистая и, реже, прожилковая текстура, а на относительном удалении – массивная. При наложении гидротермальных процессов текстура может приобретать характер брекчиевидной. Структуры также различны. По относительному размеру зерен присутствуют равномернозернистая, неравномернозернистая, порфиробластическая и порфирокластическая структуры. По абсолютному размеру структуры могут варьировать от гигантозернистых до тонкозернистых (Рисунок 2).

Породообразующие минералы фоскоритов Томтора в большинстве своем – магнетит, апатит и биотит. В них обнаружено большое разнообразие второстепенных, аксессуарных и вторичных минералов, среди которых: клинопироксены, амфибол, нефелин, гранат, циркон, скаполит, хлорит, барит, баритоцелестин, ильменит, ульвешпинель, армалколит, гетит, рутил, титанит, пирохлор. Широкое минеральное разнообразие связано с разными этапами и стадиями их формирования.

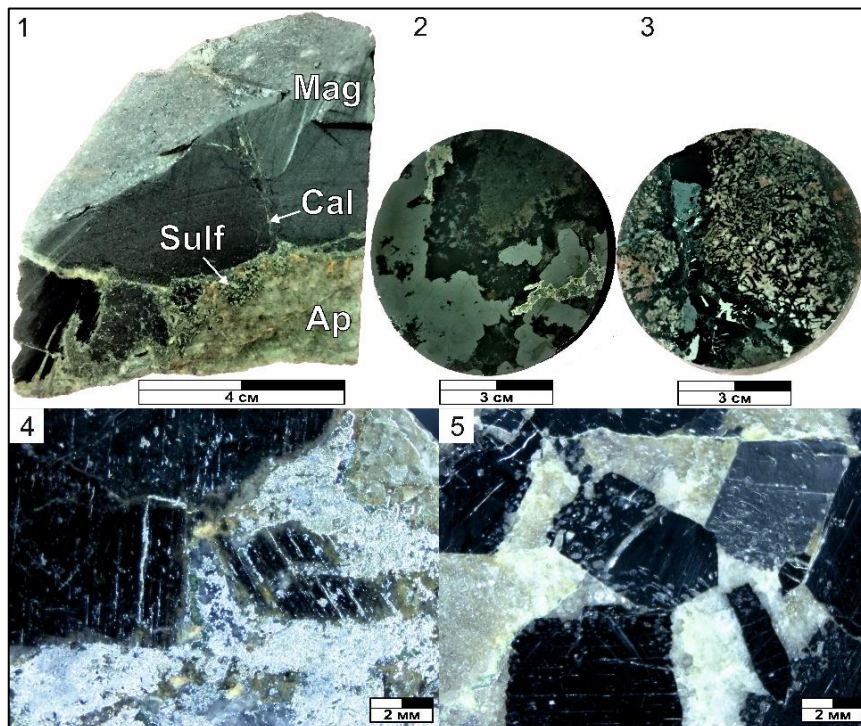


Рисунок 2 – Фоскориты массива Томтор. 1-3 – фотографии образцов. 4,5 – фотографии фоскоритов под биноклем

Магнетит. По морфологическим особенностям выделяются две разновидности магнетита. К первой (Mag-1) относится массивный магнетит с характерными структурами твердофазного распада ильменита (Илм-1) (Рисунок 4-1). Ко второй разновидности (Mag-2) относится магнетит вблизи и внутри прожилков карбонатного, сульфидного, биотитового и смешанных составов. Такой магнетит образует зоны в массивном магнетите первой разновидности, но с отсутствием структур распада ильменита, а также выделения неправильной формы со следами растворения без структур распада в прожилках, секущих массивный магнетит первой разновидности (Рисунок 3-2,5,6).

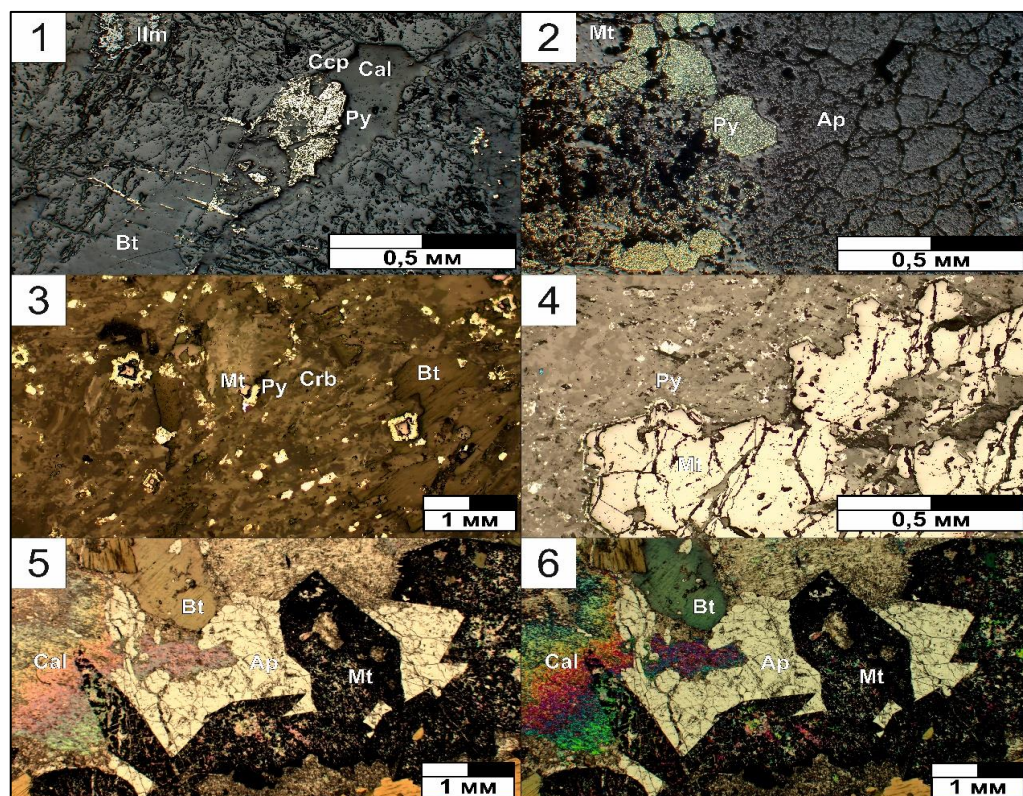


Рисунок 3 – Фоскориты массива Томтор (скв. 59). 1-4 – аншлифы, 5,6 – шлифы из скважины 59

Апатит. Выделены 5 генераций апатита: первично-магматический апатит из измененных вмещающих пород (Ap-1) (Рисунок 4-2,3); массивный магматический апатит фоскоритов (Ap-2); зернистый апатит фоскоритов (Ap-3) (Рисунок 3-5,6; Рисунок 4-4); гидротермально-измененный апатит (Ap-4) и гипидиоморфнозернистый гидротермальный апатит (Ap-5). Первично-магматический апатит измененных вмещающих пород Ap-1 характеризуется неправильными формами выделения и каплевидными включениями эгирин-авгита и нефелина, что свидетельствует об их одновременной кристаллизации из фойдолитового расплава. Апатит (Ap-2) представлен образованиями массивной текстуры на контакте с массивным магнетитом и гиганто-/ крупнозернистым биотитом. На контакте с карбонатными и сульфидными прожилками, секущих массивный апатит (Ap-2) наблюдаются зернистые скопления апатита (Ap-3). В Ap-2 в тройных точках сочленения зерен апатитов углы между границами трех зерен близки к 120° , что может свидетельствовать о стремлении агрегата к равновесной форме его составляющих, приближающихся к равновесной ячейке Коксетера. Размеры зерен в таких агрегатах, как правило, выдержаны. С другой стороны, зернистый агрегат апатита со схожими взаимоотношениями между зернами и локальным изменением состава апатита вблизи границ зерен может образовываться в результате кристаллизационной дифференциации. В апатит-калишпат-карбонатных участках наблюдается собирательная

перекристаллизация гипидиоморфного апатита вдоль прожилков рутилового состава, что указывает на наличие и более поздних генераций апатита, потенциально связанного с прожилками различного состава. По границам зерен апатита и вдоль секущих их прожилков наблюдается изменение состава апатита – уменьшенное содержание Sr и REE, относительно центральных участков таких зерен (Ap-4). Гидротермальный апатит (Ap-4) также может образовывать сливные массы.

Данные генерации апатита не содержат включений, за исключением карбонатных гнезд. Ap-5 приурочен к апатит-карбонатным прожилкам и апатит-калишпат-карбонатным участкам в апатит-магнетитовых рудах и характеризуется большим количеством газовой-жидких включений. Взаимоотношение гидротермального апатита (Ap-5) с вмещающими его агрегатами карбоната, идиоморфизм апатита данной разновидности, а также карбонатные включения в таком апатите указывает на их совместное образование.

Биомит. Биотит представлен преимущественно гиганто-/крупнозернистыми агрегатами (до 5 см) и их срастаниями. В породе слагает бочонковидные агрегаты диаметром до 2 см и высотой до 7 см. Ассоциирует в магнетитовых рудах преимущественно с сульфидными прожилками, положительно коррелируя с их мощностью. Наиболее крупные агрегаты встречаются на границе магнетитовых руд с вмещающими щелочными сиенитами, а также в апатитовых участках руд на контакте с магнетитом. Биотитовые агрегаты на контакте с вмещающими фойдолитами встречаются существенно реже и уступают в размерах и идиоморфизме биотитам, расположенным на границах магнетитовых руд с вмещающими щелочными сиенитами. Редко встречаются мелкозернистые образования в апатите, ассоциируя с карбонатными гнездами.

Наблюдаются сливные агрегаты биотита, формирующие прожилки, секущие магнетит, и отдельные участки, содержащие частично растворенные вкрапленники калиевого полевого шпата и других минералов. В крупных пластинчатых агрегатах биотита отмечаются вкрапленники титанита с цирконом и калиевым полевым шпатом. На границах крупных пластинчатых сростков биотита титанит и калиевый полевой шпат образуют мелкокристаллические аллотриоморфнозернистые агрегаты в кальцитовом матриксе. В биотитовых агрегатах, секущихся карбонатными прожилками, отмечается зональность: на контакте с карбонатными прожилками биотит более железистый, чем в центре пластинок (Рисунок 4-5,6).

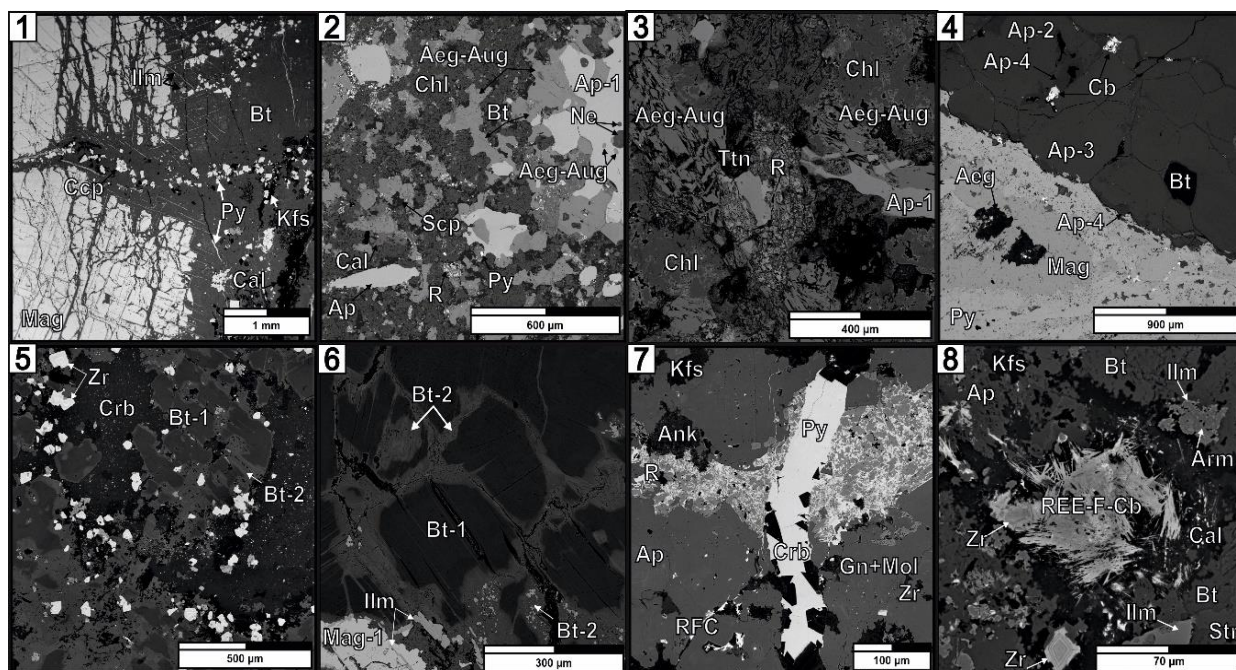


Рисунок 4 – Фоскориты массива Томтор, скважина 801. Фотографии – SEM (BSE)

Карбонаты. Наибольшим распространением в фоскоритах Томтора пользуются кальцит, доломит, анкерит и сидерит, которые встречаются в минеральной ассоциации со всеми минералами фоскоритов. Карбонаты кальция, магния и железа чаще всего образуют сливные агрегаты и выполняют прожилки. В редких случаях обнаруживаются раскристаллизованные карбонатные участки и отдельные зональные кристаллы, слагающие карбонатные гнезда в апатите. Широкой распространенностью пользуется стронцианит, выполняющий прожилки и слагающий выделения неправильной формы в карбонатных гнездах в апатите. Сложные карбонаты и фторкарбонаты – карбоцернаит, амбатоаринит, бастнезит, паризит и синхизит приурочены к карбонатным гнездам в апатите и представлены игольчато-волокнистыми агрегатами и выделениями неправильной формы совместно с кальцитом, анкеритом и стронцианитом (Рисунок 4-7,8).

3. Выводы

Изученные взаимоотношения породообразующих минералов фоскоритов с вмещающими породами, характерные морфологические особенности, а также наличие нескольких генераций указывают на широкое участие в их формировании магматического, метасоматического, гидротермального и гипергенного этапов.

В магматический этап при участии жидкостной несмесимости от силикатного (фоидолитового) расплава был отделен Fe-P расплав, из которого образовались апатит-магнетитовые руды, в отдельных случаях с признаками участия кристаллизационной дифференциации.

На контакте силикатных (Si, K) и Fe-P (Fe) пород, при широком участии метасоматоза были образованы массивные выделения биотита (Si, Al, K + Fe, LE).

Позже на образовавшиеся породы были наложены гидротермальные процессы, привнесшие сульфидную, карбонатную и связанную с ней REE минерализацию.

Как и все породы массива Томтор, фоскориты были подвержены гипергенным изменениям окислительной и восстановительной стадий, определивших их конечный облик в приповерхностных условиях и преобразовавшим их до латеритных лимонит-франколитовых кор выветривания с широким проявлением сидеритизации.

4. Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГАБМ СО РАН.

5. Литература:

- [1] Lapin A.V., Tolstov A.V. Oxidative and reducing stages of formation of the hypergenesis zone of carbonatites and their ore-bearing capacity // *Geology of ore deposits*. 1991. Vol. 33. No. 4. pp. 81-91. (In Russian).
- [2] Tolstov A.V. Mineralogy and geochemistry of apatite-magnetite ores of the Tomtor massif (Northwestern Yakutia) *Russian Geology and Geophysics*. 1994. T. 35. № 9. С. 76-84.
- [3] Tolstov A.V., Gunin A.P. Comprehensive assessment of the Tomtor deposit // *Bulletin of the Voronezh State University. Series: Geology*. 2001. No. 11. pp. 144-160. (In Russian).
- [4] Skublov S.G., Tolstov A.V., Baranov L.N., Melnik A.E., Levashova E.V. First Data on the Geochemistry and U-Pb age of zircons from the Kamaphorites of the Tomtor alkaline-ultrabasic massif, Arctic Yakutia // *Chemie der Erde - Geochemistry*. 2020. T. 80. № 3. С. 125505.
- [5] Baranov L.N., Tolstov A.V. Sulfide mineralization of apatite-magnetite ores of the Tomtor massif // In the collection: *Geology and mineral resources of the North-East of Russia. Materials of the XI All-Russian Scientific and practical conference*. Yakutsk, 2021. pp. 138-141. (In Russian).
- [6] Baranov L.N., Tolstov A.V. The role of foscorites in mineralogy of the Tomtorsky ore field // *Natural resources of the Arctic and Subarctic*. 2022. Vol. 27. No. 2. pp. 195-206. (In Russian).
- [7] Lapin A.V., Kulikova I.M., Tolstov A.V. Distribution of REE, Y, Sc, and Th in the Unique complex rare-metal ores of the Tomtor depozit // *Geochemistry International*. 2016. T. 54. № 12. С. 1061-1078.

- [8] Tolstov A.V., Cherenkov V.G., Baranov L.N. Genesis and age of the ore column of the Tomtorskoy niobium deposit and rare earths, Northeast of the Siberian platform *Ores and metals*. 2020. No. 4. pp. 32-44.
- [9] Lapin A.V., Tolstov A.V. Minerageny of carbonatite weathering crust / *Methodological guide* / Ser. A series of methodological manuals on forecasting and prospecting for mineral deposits in the regional geological study of the subsurface. Moscow. GEOS Publishing House. 2011. 308 p.
- [10] Pokhilenko N.P., Afanasyev V.P., Tolstov A.V., Kruk N.N., Pokhilenko L.N., Ivanova O.A. Prospects of development and problems of development of the raw material base of scarce strategic types of solid minerals of Siberia // *Geology of ore deposits*. 2023. Vol. 65. No. 5. pp. 476-492.

ОСОБЕННОСТИ ОСВОЕНИЯ РОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Наталья Батугина, Евгений Хоютанов
ФГБУН «Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр. Ленина, 43

FEATURES OF THE DEVELOPMENT OF PLACER GOLD DEPOSITS IN MODERN CONDITIONS

Natalia Batugina, Yevgeniy Khoютanov
Chersky Mining Institute of the North, SB RAS, 43, Lenin ave., Yakutsk, 677980, Russia

Annotation. The article considers influence of features of structure of placer deposits and distribution of useful components in them on efficiency of resource-saving extraction of reserves of valuable mineral raw materials. It is shown that, taking into account the cluster organization of the productive thickness of gold-containing sands, the error of geometrization for some areas of work may exceed 100%. Estimation errors have been determined, approaches that can be used in the management of exploration processes have been shown, production and enrichment. It has been shown that among the main reasons for errors in estimating reserves are the inaccuracy of determination of morphology and structure of the deposit, primarily its width, as well as the content of gold in sands.

1. Введение

В Якутии добыча золота в промышленных масштабах ведется уже почти 100 лет. Последние 30 лет республика развивает золотодобычу в рыночных условиях, пережила спады и подъемы, и к 2023 г. нарастила общее производство по сравнению с 1991 г. на 17 тонн (1991 г. – 33 т, 2023 г. – 50 т). При этом российская золотодобыча выросла в 2 раза, а мировая добыча увеличилась в 1,5 раза.

За эти годы золотодобывающая промышленность Якутии существенно изменила свою структуру. Если в 1991 г. россыпи обеспечивали 90% — (29523 кг), то в 2023 г. их доля составила 24% (12 т). Но говорить о прекращении добычи из россыпей в целом не приходится. Однако за 30 лет добыча золота из коренных месторождений Якутии выросла с 4 до 38 тонн или в 9,5 раз.

В республике на балансе числится 723 месторождения. Запасы золота: балансовые – 289 т, забалансовые - 17 т. Аллювиальные россыпи различного возраста, распространенные в Верхне-Индибирском, Адычанском, Куларском, АллахЮньском, Южно-Якутском и других золотоносных районах. Наиболее высокий удельный вес по запасам категорий В+С₁ и С₂ имеют Южно-Якутский (41,0%) и Верхне-Индибирский (30,3%) золотоносные районы.

Производительность (производственная мощность) участков по горной массе на открытых работах за 30 летний период выросла в 12 раз по отдельным месторождениям. Это объясняется увеличением объема вскрышных работ в связи увеличением глубины отработки. В настоящее время обрабатываются месторождения с коэффициентом вскрыши от 2,1 до 6, редко 7,2 и выше. Можно отметить постоянное снижение среднего содержания золота в песках. В среднем содержание золота в песках за анализируемый период уменьшилось в 2 раза, с 1,8 г/м³ до 0,8-0,9 г/м³. Существенно снизились параметры кондиций, так бортовые содержания в пробе даже для удаленных участков составляют 30-50 мг/м³ против 70-80 мг/м³ в начале 2000-х годов, минимально-промышленные содержания в среднем снизилось с 0,2 г/м³ до 0,1 г/м³. Вместе с тем, запасы большинства россыпных месторождений не позволяет обеспечить финансовую устойчивость предприятиям, поскольку имеет место ухудшение горно-

геологических условий, усложнение строения россыпей, снижение содержания золота в песках с одновременным увеличением объема переработки горной массы.

Большие затраты на разведку, оценку, опережающее и эксплуатационное опробование россыпных месторождений и их участков, дополняются случаями не подтверждения и занижения запасов на 10 – 30 % и более, пропуска промышленных запасов при непредставительном и малообъемном опробовании [1] и (или) редкой сети разведочных выработок. Это свидетельствуют о необходимости совершенствования средств и методов повышения достоверности исходных и формализованных данных и их геометризации. За последние 20 лет по Оймяконскому, Нерюнгринскому и Алданскому районам Республики Саха (Якутия) доля простых по геоморфологии залежей уменьшилась более, чем вдвое при одновременном увеличении числа сложных.

На россыпях, для которых, как правило, характерно неравномерное распределение полезных компонентов в продуктивной толще, при валовой добыче происходит разубоживание запасов бедными песками. Это приводит к увеличению объемов перерабатываемой горной массы, уменьшению в ней среднего содержания металла и коэффициента его извлечения, а в итоге – к повышению себестоимости конечной продукции. Кроме того, затраты на добычу металла по причине зависимости от мощности торфов, песков в целом и их продуктивного слоя, гипсометрии, гранулометрического состава золота и его среднего содержания, доли глины в песках и др. даже в пределах одной россыпи изменяются от участка к участку в несколько раз. Однако при оконтуривании и оценке запасов данное обстоятельство, как правило, не учитывается не в полной мере, что приводит к существенным ошибкам в определении экономически целесообразных границ их разработки [2-3]. Некоторые из балансовых блоков, предназначенных к отработке, оказываются в действительности убыточными. В то же время определенная часть забалансовых запасов, обычно теряемых в недрах, могла бы с полным основанием вовлекаться в эксплуатацию, поскольку это экономически целесообразно.

2. Основной раздел

Эффект от освоения однородной по технологическим свойствам части месторождения (например, в объеме годовой добычи) можно представить в виде:

$$\mathcal{E} = \frac{SmyG_aJ(1-L)}{(1-D)}J(P-C), \quad (1)$$

где S , m – площадь и мощность заданного блока соответственно; G_a – среднее содержание полезного компонента; J – коэффициент извлечения; L , D – потери и разубоживание, соответственно; P – цена единицы конечного продукта; C – затраты на единицу конечного продукта.

Для формулы (5) относительную ошибку расчета эффекта от освоения месторождения или его участка можно представить в виде:

$$\frac{\sigma_{\mathcal{E}}}{\mathcal{E}} \approx \left(\frac{\sigma_S}{S}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{y}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{G_a}}{G_a}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_J}{J}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_L}{L} \cdot \frac{L}{1-L}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_D}{D} \cdot \frac{D}{1-D}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_P}{P} \cdot \frac{1}{1-K}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_C}{C} \cdot \frac{K}{1-K}\right)^2, \quad (2)$$

где σ_x – средняя квадратическая ошибка аргумента (S , m , y , G_a , J , L , D , P , C); коэффициенты: $f(L) = \frac{L}{1-L}$; $f(D) = \frac{D}{1-D}$; $f_P(K) = \frac{1}{1-K}$; $f_C(K) = \frac{K}{1-K}$; $K = \frac{C}{P}$.

Степень и характер влияния прочих параметров (y) на относительное изменение прибыли горного предприятия были рассмотрены в [6]. В данном исследовании описано влияние геологических параметров (x) на эффективность освоения россыпных месторождений.

Для решения рассматриваемой задачи важно, что величина затрат (С) зависит от многих геологических параметров, а ошибка прогноза затрат – от ошибок их определения. Надежное определение среднеквадратической ошибки затрат (σ_C) возможно из построения и анализа статистической многофакторной модели затрат от геологических переменных. Однако заведомо можно сказать, что одним из основных геологических факторов, влияющих на уровень затрат, будет ошибка геометризации запасов, которая не нашла прямого отражения в (1). Ошибочная геометризация приводит к бросовым горным выработкам, росту (в несколько раз) потерь и разубоживания, нерациональному выбору системы ведения горных работ и её параметров, техники и технологии добычи, другим негативным последствиям.

Ошибка оценки геологических параметров на практике достигает существенных значений, что приводит к неверному расчету эффекта от освоения месторождения или его участка. Систематические ошибки занижения среднего содержания (G_a), площади балансовых запасов (S), мощности продуктивных пластов (m) и запасов (Q) достигают по россыпным месторождениям золота, олова, алмазов при существенно непредставительном опробовании 25 – 90 %, а прирост балансовых запасов при представительном опробовании на ряде объектов доходит до 100 – 200 % [1, 7].

Сравнение данных, полученных по данным разведки и разработки золотосодержащих россыпных месторождений, показывает, что погрешности подсчета их запасов колеблются от -7 до +32 %, а погрешности подсчета ширины россыпи – от -50 до +10 % [1].

Рассмотрим примеры относительной ошибки среднего содержания (G_a), площади балансовых запасов (S), мощности продуктивных пластов (m) и получаемого эффекта (Э) по отдельным россыпным месторождениям, обрабатываемым на территории Якутии (таблица 1).

Таблица 1 – Расчеты погрешности определения основных параметров по ряду россыпей Якутии*

Название россыпного месторождения	Относительная ошибка определения, % (\pm)			
	Площади (S)	Мощности песков (m)	Среднего содержания (C)	Ошибка в эффекте, %
Ручей Сохатиный–Малый Сохатиный	-25.4	-18.5	-15.2	-34.9
Менджель	-12.0	11.4	18.8	25.1
Ольчан-Смородина	-7.9	16.4	-46.7	50.1
Ручей Вилка	-13.3	13.2	8.9	20.7
Ручей Кенер-Сала	12.3	19.1	12.5	26.0
Ручей. Хатыннах	-24.1	-13.0	-9.1	-28.8
Эбир-Хая	8.2	-10.4	-18.2	-22.5

* по данным золотодобывающих предприятий

Приведенные данные свидетельствуют о важности достижения максимально точного модельного представления о реальной морфологии россыпных месторождений. Анализ данных разведки и эксплуатации россыпных месторождений в бассейне р. Колымы и в верховьях р. Индигирки показал, что одной из основных причин ошибочной оценки эффекта от освоения россыпных месторождений является неточность определения морфологии и структуры россыпи, при этом погрешности зависят, в первую очередь, от ширины россыпей и содержания золота. При существующей технике и технологиях

добычи и переработки песков не качественная горно-геологическая подготовка месторождений и их участков снижает эффект от освоения на 20–60%.

Характерными примерами нерационального освоения россыпей Якутии в целом является уровень извлечения из песков мелкого и тонкого золота, когда в целом эффективно извлекается 97–98 % золотин с размерами более 0.2 мм. Извлечение класса 0.1–0.2 мм не превышает 60%. а класс менее 0.1 мм при традиционных схемах обогащения может уходить в хвосты. При разведке и разработке россыпей определяется и подсчитывается содержание только извлекаемого золота, поэтому на всех отработанных и обрабатываемых месторождениях практически неизвестным остается полное содержание золота (с учётом всего спектра гранулометрического состава) и, соответственно, доля теряемой ценности. Класс менее 0.1 мм составляет на большом числе месторождений 20 % и более [8].

Следует отметить уникальный эксперимент П.А. Аммосова, описанный в [9]. Из уральских россыпей золота он отобрал 160 т песка, которые после тщательного перемешивания разделил на несколько частей и последовательно обработал различными способами (таблица 2).

Таблица 2 – – Содержание золота в россыпях при разных способах обработки песков

Способ обработки песков	Содержание золота, г/т
Промывка 100 т песков без амальгамации на обыкновенных грохотах	0.4
Более тщательная ручная промывка 8 т песка	0.55
Промывка 30 т песка с амальгамацией	5.1
Обыкновенная доменная плавка 50 т песка на чугуна	94
Растворение нескольких проб песка по 4.5 кг в царской водке и осаждение железным купоросом	117

При традиционном способе опробования россыпных месторождений с крупным золотом содержание металла в песках из-за существенной не представительности геологического опробования может систематически занижаться до 2–10 и более раз, что приводило и приводит к пропуску промышленных участков и (или) так называемым «коэффициентам намыва» золота [9]. Следует отметить закономерности роста ошибок геометризации и оценки всех геологических параметров (запасов, среднего содержания, распределения запасов по сортам руд, обогатимости, коэффициента извлечения и др.) по мере уменьшения размеров участков месторождения (подсчетных блоков). Так, ошибки в оценке геологических показателей в пределах участков месячной отработки значительно выше таковых для участков годовой отработки [1].

Более представительное опробование россыпных месторождений, уточняющее сплошность, мощность и площадь запасов продуктивных песков, обеспечивает рост запасов в среднем в 2.5 раза с повышением среднего содержания полезного компонента.

Изменчивость геологических показателей в геологическом пространстве является природным неотъемлемым свойством геологических тел. При последовательном увеличении, например, минимального промышленного содержания полезного ископаемого россыпь начинает терять свою конфигурацию, затем теряет сплошность и распадается на несколько самостоятельных тел, линз, гнезд, лент и т.п.

Неоднородность свойств вмещающих пород, изменчивость мощности песков, их

промывистости, среднего содержания и других факторов приводят к тому, что поблочная производительность труда и себестоимость добычи горной массы на одном и том же месторождении может изменяться в 2 – 5 раз.

Не отрицая значимости различных инновационных геотехнологических решений и усовершенствований, акцентирует внимание на важном направлении снижения влияния рассмотренных выше особенностей россыпных месторождений, связанном с повышением точности и достоверности модельных представлений об осваиваемых объектах на основе широкого применения интенсивно развивающихся информационных технологий и расширяющихся возможностях существующих и новых методов компьютерного моделирования. В числе последних можно отметить апробированный обобщенный метод математической морфологии для 3D-анализа форм геологических границ продуктивных толщ месторождений различных форм. Другим вариантом улучшения контроля качества и оценки запасов, определения взаимосвязей внутри продуктивных толщ, прогнозирования качества золота может быть комплексный подход к выполнению такого рода работ. Он основан на одновременном применении в различных вариациях дополняющих друг друга методов машинного обучения, геостатистики, блочного моделирования, кластерного анализа. Еще одним из важных аспектов рассмотренной проблематики является сближение зарубежных и российских способов подсчёта запасов и оценки их достоверности с использованием сильных сторон блочного моделирования, компенсирующего некоторые недостатки традиционных методов расчетов, основанных очень часто на однократной оценке ТЭО кондиций. Но эти актуальные темы связаны с другими исследованиями и выходят за рамки данной статьи.

3. Выводы

В условиях ухудшения качества минерально-сырьевой базы золотодобычи значимость более точной и достоверной оценки основных геологических показателей на разных стадиях разведки и оценки россыпных месторождений и их участков возрастает.

На практике имеется много случаев не подтверждения балансовых запасов и пропуска промышленных. Ошибки оценки россыпей связаны, в основном, с неправильным определением их типа, сложности, характера распределения полезного компонента в продуктивной толще. Самым точным методом определения ошибок оценки россыпей мог бы быть тот, в котором сравниваются запасы месторождений до и после отработки. Однако, реализовать такой подход в реальности невозможно, поэтому морфология продуктивных россыпных тел и внутреннее строение их запасов определяется с погрешностями, зависящими от стадии изучения георесурса и методики выполнения оценок.

Любая ошибка в определении какого-либо фактора на одном этапе освоения россыпей отражается на последующем. Недостаточная технологическая изученность месторождений и их участков с кластерной формой распределения полезного компонента в продуктивных песках может приводить к пропуску участков балансовых запасов из-за систематических занижений содержаний при существенно непредставительном опробовании и недостаточной разрешающей плотности сети разведки. Площади балансовых и забалансовых запасов, мощности продуктивных пластов могут занижаться в разы. При первичной геолого-экономической оценке месторождения, проектировании предприятия, расчётах «ущерба» от потерь ценного минерального сырья в недрах, изучении ожидаемой эффективности и полноты

извлечения полезного компонента при обогащении добываемых песков обозначенные особенности россыпей, как правило, учитываются не в полной мере.

Суммарно это способствует: ошибочному выбору способов вскрытия и разработки; недостаточному уровню адаптации парка техники к реальным горно-геологическим условиям разработки; нерациональным схемам обогащения со сниженным извлечением полезных компонентов до 30 – 40 %; систематическим ошибкам завышения среднего содержания и запасов по месторождению в целом и по выемочным блокам; постоянным расхождениям данных об извлечении компонентов при добыче и обогащении; неоправданно высокому уровню потерь и разубоживания; уменьшению прибыли до 80 – 150 % от возможной.

Резервы, связанные с высококачественным геологическим обеспечением приисков, должны учитываться в числе основных для совершенствования организационно-технических подходов к разработке имеющих кластерное строение россыпей.

4. Благодарности.

This work has been supported by the grants the Russian Science Foundation, RSF № 24-28-20376.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-28-20376).

5. Литература:

- [1] Batugin S. A., Cherny E. D. Theoretical foundations of sampling and assessment of deposit reserves. Novosibirsk: Nauka, 1998, 344 pp.
- [2] Troitsky V.V. Methodological and legal problems associated with the replenishment of placer gold deposits and their development // Zolotodobycha, 2015, vol. 8. URL: <https://zolotodb.ru/article/11307>.
- [3] Shurygin D. N., Vlasenko S. V., and Shutkova V. V. Estimation of the error in the calculation of mineral reserves taking into account the heterogeneity of the geological space, IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci., Russky Island, 4–6 March 2019, Vol. 272. DOI: 10.1088/1755-1315/272/2/022139.
- [4] Rogova T. B., Shaklein S. V. Application of geoinformation technologies in assessing reserves of coal deposits in Kuzbass // Mineral Resources of Russia. Economics and Management, 2021, vol. 1-6, pp. 47-53.
- [5] Vikentyev V. A., Karpenko I. A., Shumilin M. V. Expertise in calculating reserves of ore deposits. Moscow: Nedra, 1988, 199 pp.
- [6] Batugina N. S., Gavrilov V. L., Tkach S. M. Error in changing the profit of a mining enterprise when developing a complex deposit // Mining Journal, 2018, vol. 12, pp. 41-45. DOI: 10.17580/gzh.2018.12.06.
- [7] Batugina N. S., Gavrilov V. L., Tkach S. M. Cluster organization of placer deposits in Yakutia and the use of its features in geotechnologies // Mining Journal, 2019, vol. 2, pp. 16–19. DOI: 10.17580/gzh.2019.02.03
- [8] Ermakov S. A., Burakov A. M., Kasanov I. S. Minimization of processing volumes of gold-bearing sands from alluvial deposits of Yakutia according to the criterion of the maximum size of substandard raw materials // Mining informational and analytical bulletin, 2014, vol. 4, pp. 138 – 149.
- [9] Batugin S.A., Yakovlev V. L. Patterns of development of mining: monograph. Yakutsk: YSC SB RAS, 1992, 116 pp.

**ХИМИЧЕСКИЕ СОСТАВЫ ПЛАГИОГНЕЙСОВ ТРОНДЪЕМИТОВОГО И
ТОНАЛИТОВОГО СОСТАВА В БИЛЛЯХСКОЙ ЗОНЕ ТЕКТОНИЧЕСКОГО
МЕЛАНЖА АНАБАРСКОГО ЩИТА**

Василий Березкин, Борис Герасимов, Александр Кравченко
ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

**PLAGIOGNEISS WITH TRONDJEMITIC AND TONALITIC GEOCHEMISTRY OF THE
BILLYAKH ZONE
TECTONIC MELANZ OF THE ANABAR SHIELD**

Vasiliy Beroyzkin, Boris Gerasimov, Aleksandr Kravchenko
Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. On the Anabar Shield, in the paragneiss series, plagiogneisses similar to trondhjemites and tonalites were discovered. Such rocks have long been known in the neighboring orthogneiss sequence. It has been shown that the chemical compositions of gneisses in different positions are very similar.

1. Введение

В гранулитовых блоках Анабарского щита сложенных в основном эндербитогнейсами и реставрируемых как существенно вулканогенные, встречаются породы по химизму сходные с тронджемитами и тоналитами. А в существенно парагнейсовой толще с мраморами и кальцифирами такие породы неизвестны. В статье приведены данные о присутствии и в парагнейсах пород с такими составами.

Билляхская зона тектонического меланжа(ЗТМ) и щит в целом покрыт государственным картированием масштаба 1:200000, местами более детальным картированием, а также многочисленными научными исследованиями [1,2,3]. Наши работы связаны с прогнозом золота и др. металлов и сосредоточены в Билляхской ЗТМ [4,5] . В процессе работ было отобрано значительное количество проб всех видов пород. Здесь картирование масштаба 1:200000 проведено под руководством Б.Г. Лопатина [6]. Образцы изучались под оптическим микроскопом и микрозондом; анализы пород выполнялись обычным химическим методом или рентгенофлуоресцентным методом (СРМ-18/СМ-1) в ИГАБМ; редкоземельные и другие элементы – LA-ICP-MS в Институте нефтегазовой геологии и геофизике (Новосибирск).

К сожалению, общепринятого ограничения химического состава тронджемитов и тоналитов не существует. В таблице 2 принят вариант, учитывающий рекомендации [7,8]. К тому же широко применяется термин плагиограниты, химические отличия их от тронджемитов призрачны. Эффузивными аналогами принимаются риолиты и дациты с Na уклоном.

2. Геология

На рисунке 1 представлен упрощенный вариант Схематической геологической карты [4], достаточно близкая к карте [6]. На ней выделяются две серии пород из трех на щите: хапчанская (верхняя) и верхнеанабарская, переработанные в зоне меланжа их части (показаны другими значками).

Хапчанская серия отличается значительной пестротой своего состава и обычно разделяется на две толщи. Верхняя сложена гранатсодержащими плагиогнейсами, гнейсами разной меланократовости до гранулитов. В некоторых из них, кроме биотита и ортопироксена присутствуют кордиерит, силлиманит (высокоглиноземистые гнейсы), графит. В последних иногда гранат не наблюдается.

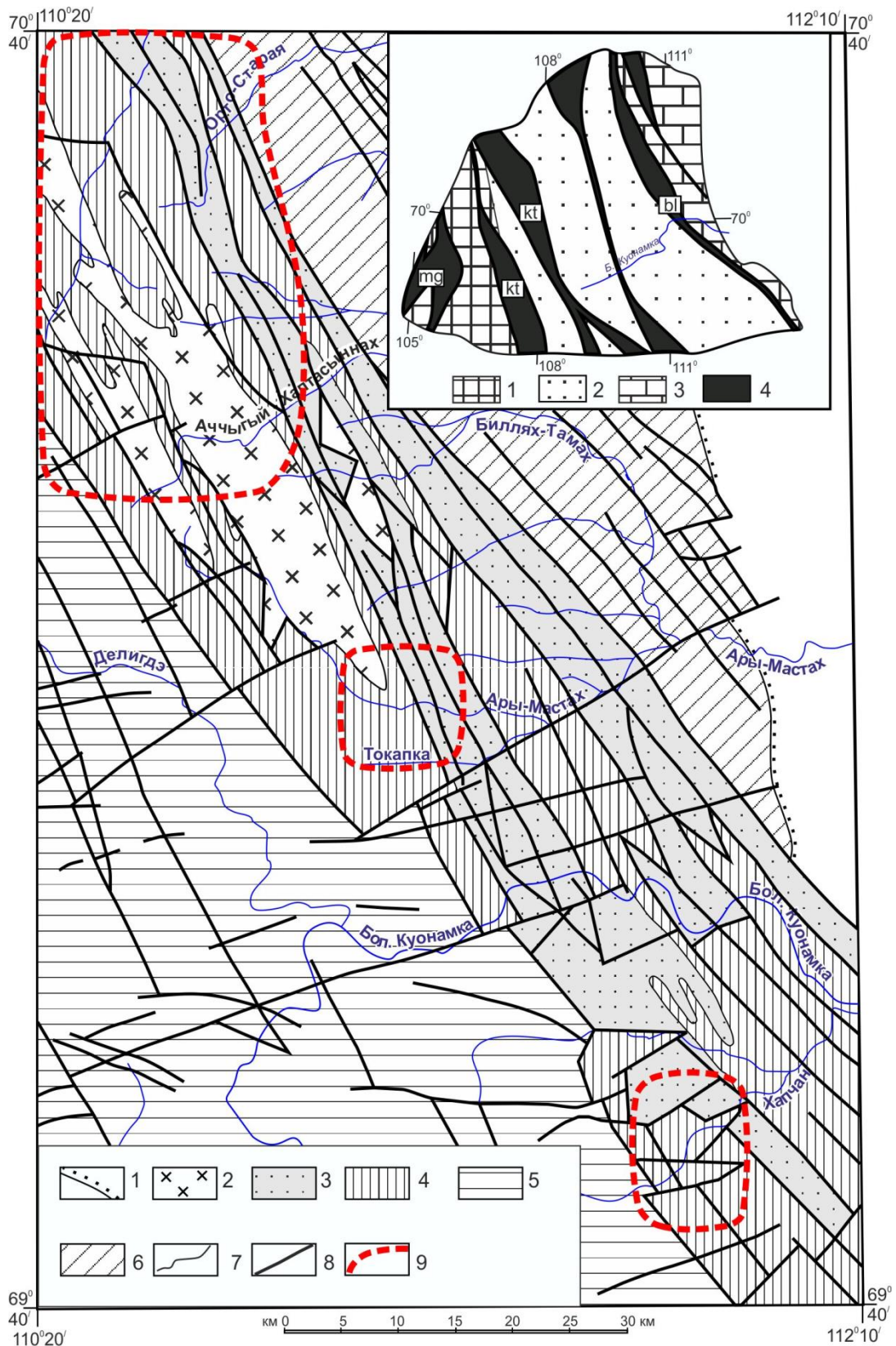


Рисунок 1 – Схематическая геологическая карта Билляхской зоны тектонического меланжа.

1 – позднепротерозойские отложения Сибирской платформы; 2 – гранитоиды билляхского комплекса: Билляхский массив, сателлит (мелкие тела не показаны); 3 – переработанные в зоне меланжа породы гранулитовой хапчанской серии; 4 – те же анабарской серии; 5 – гранулитовая верхнеанабарская серия; 6 – гранулитовая хапчанская серия; 7 – геологические границы; 8 – разломы; 9 – район работ.

На врезке тектоническая схема Анабарского щита. 1-3 – террейны: 1 – Маганский, 2 – Далдынский, 3 – Хапчанский, 4 – зоны тектонического меланжа (mg – Маганская, kt – Котуйканская, bl – Билляхская).

В Нижней тоще преобладают различные известкособитовые породы – клинопироксеновые, биотит-клинопироксеновые плагиогнейсы с подчиненными роговой обманкой и скаполитом. В меланократовых плагиогнейсах, переходящих в кристаллические сланцы и диопсидовые породы наблюдаются андрадит, шпинель. К карбонатным породам относятся кальцифиры и мраморы, встречающиеся в виде редких линз и выклинивающихся маломощных прослоев. Некоторые породы нижней толщи образуют маломощные прослои в верхней или, наоборот, верхние попадают в нижней. Более детальная характеристика дается в цитированной литературе. В зоне меланжа ортопироксен встречается редко в реликтах. Значительно увеличивается количество роговой обманки, изменяются составы минералов.

3. Химические составы плагиогнейсов

Как видно в Таблице 2 трондьемиты и тоналиты верхнеанабарской и соответственно паратрондьемиты, паратоналиты хапчанской серий по единичным анализам и их средним составам обнаруживают близкие сходства, кроме несколько более высоком содержании Al_2O_3 в хапчанской. Это отразилось на распределение точек анализов на полевошпатовом треугольнике (Рисунок 2).

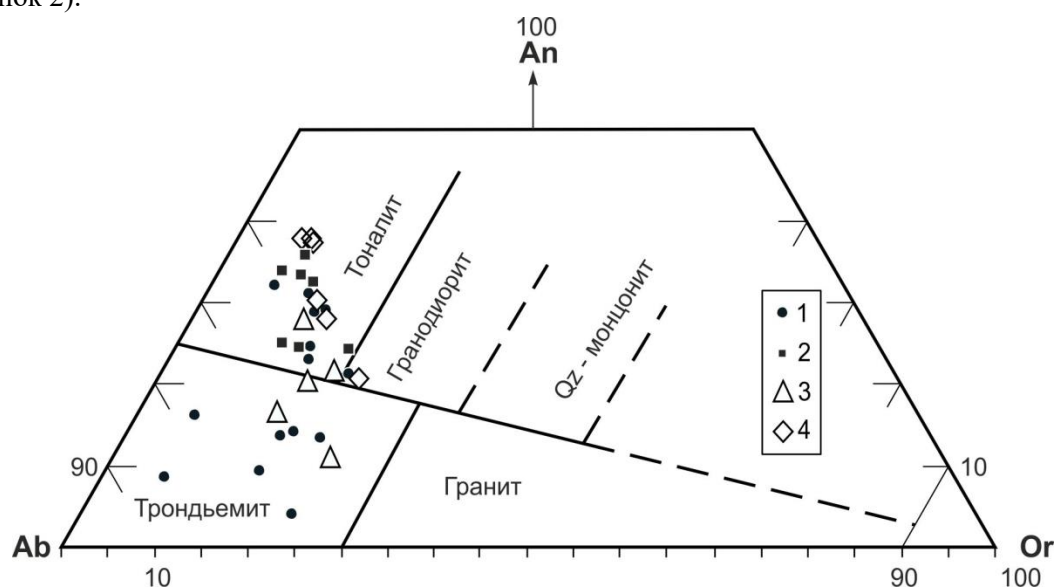


Рисунок 2 – Распределение фигуративных точек анализов на диаграмме Ab-An-Or [9]. Верхнеанабарская серия: 1 - трондьемиты, 2- тоналиты; хапчанская серия: 3-паратрондьемиты, 4 - паратоналиты.

В верхнеанабарской серии анализированы 14 трондьемитов и 7 тоналитов. Точки анализов всех последних оказались в своем поле, а точки трондьемитов разделились поровну на свое поле и в поле тоналитов, которые характеризуются пониженными содержаниями Al_2O_3 (Таблица 2). Одна проба, содержащая $K_2O = 2,33\%$ оказалась вблизи раздела гранодиорит – тоналит.

В хапчанской серии из 5 анализов паратрондьемитов 3 точки оказались в своем поле, 1 – в поле тоналитов, 1 – на границе между полями.

Пять анализов паратоналитов уверенно находятся в своем и лишь анализ с $K_2O = 2,50\%$ оказался на краю поля гранодиоритов. Весьма, вероятно, в пробах с повышенными K_2O при метаморфизме был принесен K_2O .

Таблица 1 – Химические анализы плагиогнейсов трондьемитового и тоналитового состава Билляхской зоны тектонического меланжа Анабарского щита

		Верхнеанабарская серия																					
		Трондьемиты														Тоналиты							
№ пробы авторск	S- 0116/ 7	S- 0226/ 8	S- 0313/3	S- 0329/ 12	S- 0509/ 4	IS- 3336/ 2	IS- 3120	RO- 79351	GeB- XG2/4 4	GeB- XG13 6	GeB- XG16 2	GeB- XG2/7 3	GeB- XG2- 73/2	GeB- XG2- 61/1	Средн n = 14	S- 0223/1	S- 0305/8	S- 0313/8	S- 0400/1	IS- 3136/4	RO- 9PA11	RO- 9PA3	Средн n = 7
№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		15	16	17	18	19	20	21	
SiO ₂	74,61	70,75	76,17	76,52	68,75	70,32	68,69	68,50	69,63	69,58	69,65	72,65	77,31	71,17	71,74	67,39	65,61	65,87	66,74	66,72	64,64	64,72	65,96
TiO ₂	0,32	0,34	0,32	0,21	0,13	0,49	0,59	0,47	0,31	0,82	0,55	0,48	0,21	0,47	0,41	0,66	0,54	0,42	0,30	0,50	0,92	0,40	0,54
Al ₂ O ₃	13,74	14,54	12,41	12,81	16,55	15,42	15,49	17,04	15,88	14,64	14,22	13,41	12,46	14,99	14,54	15,71	16,95	16,97	16,80	16,59	15,84	15,56	16,35
Fe ₂ O ₃	0,88	0,98	0,87	0,01	1,24	1,11	1,12	0,85	1,50	2,04	2,67	2,26	1,02	1,26	1,27	0,74	2,02	2,41	0,01	1,12	2,24	1,25	1,40
FeO	1,81	3,66	1,37	3,31	2,14	2,68	3,23	2,34	1,29	3,02	1,77	2,18	1,44	2,19	2,32	3,62	2,48	3,10	4,10	3,23	3,83	4,71	3,58
MnO	0,12	0,13	0,01	0,03	0,06	0,09	0,09	0,03	0,02	0,09	0,04	0,06	0,05	0,03	0,06	0,15	0,07	0,08	0,09	0,08	0,06	0,08	0,09
MgO	0,70	1,15	0,96	0,64	1,41	1,06	1,49	1,15	1,35	2,29	1,14	1,48	0,33	0,45	1,11	1,19	1,71	1,21	1,79	1,83	2,33	3,42	1,93
CaO	0,50	2,93	1,65	0,95	4,11	3,50	3,05	4,21	2,99	1,50	2,59	1,82	0,96	3,77	2,47	3,70	3,72	3,49	5,07	4,23	4,70	4,60	4,22
Na ₂ O	5,00	4,05	4,45	4,10	4,28	3,92	4,51	4,56	4,61	4,05	5,39	5,00	5,53	4,06	4,54	4,48	4,95	5,07	4,12	4,30	4,27	4,31	4,50
K ₂ O	2,27	1,36	1,73	1,36	1,20	1,28	1,60	0,79	2,33	1,91	1,92	0,63	0,69	1,46	1,47	2,16	1,69	1,31	0,89	1,23	1,00	0,74	1,29
P ₂ O ₅	0,05	0,10	0,06	0,05	0,12	0,13	0,14	0,06	0,10	0,06	0,06	0,04	0,00	0,14	0,08	0,18	0,25	0,06	0,09	0,15	0,17	0,21	0,16
		Хапчанская серия																					
		Паратрондьемиты							Паратоналиты														
№ пробы авторск	S- 0301/1	S- 0311/ 1	S- 0315/ 17	S- 0444/ 1	Lu/Ok -8198	Средн n = 5	S- 0308/ 2	S- 0400/ 1	S- 0430/ 6	S- 0510/ 5	S- 0510/ 9	S- 0514/ 6	Средн n = 6										
№ п/п	22	23	24	25	26		27	28	29	30	31	32											
SiO ₂	76,15	70,23	70,18	76,18	71,90	72,93	66,43	66,74	66,83	67,18	65,90	66,86	66,66										
TiO ₂	0,28	0,32	0,62	0,01	0,22	0,29	0,54	0,30	0,18	0,36	0,42	0,49	0,38										
Al ₂ O ₃	12,21	16,35	15,15	14,26	16,70	14,93	15,31	16,80	18,69	17,30	16,91	17,38	17,06										
Fe ₂ O ₃	1,41	1,07	0,80	0,43	0,84	0,91	2,87	0,01	1,67	1,52	2,87	2,29	1,87										
FeO	1,25	1,81	3,06	0,98	1,00	1,62	3,11	4,10	1,85	2,40	2,89	2,17	2,75										
MnO	0,02	0,13	0,06	0,01	0,03	0,05	0,08	0,09	0,05	0,05	0,03	0,05	0,06										
MgO	0,12	0,82	1,35	0,31	0,26	0,57	1,40	1,79	0,74	1,24	1,45	1,05	1,28										
CaO	1,75	2,86	2,58	1,90	3,48	2,51	3,08	5,07	4,92	4,15	3,71	4,87	4,30										
Na ₂ O	4,47	4,32	4,46	4,47	4,26	4,40	4,57	4,12	4,07	4,29	4,10	3,99	4,19										
K ₂ O	2,33	1,95	1,66	1,41	1,26	1,72	2,50	0,89	0,92	1,33	1,51	0,73	1,31										
P ₂ O ₅	0,02	0,13	0,07	0,03	0,05	0,06	0,12	0,09	0,06	0,17	0,21	0,12	0,13										

Пояснения к табл. 1. Анализы пород пересчитаны на 100% без учета летучих компонентов. Анализы из коллекций авторов с индексами S (А.П. Смелов, А.А. Кравченко) и GeB (Б.Б. Герасимов) выполнены химическим методом в ИГАБМ СО РАН, анализы RO взяты [2], US – из отчета Истомина В.А. и др. (1992).
 Минеральные составы проб (кроме плагиоклаза и кварца):
 1 – БиКпшРуд(ч)Акц; 2 – БиКпшРуд(ч)Сд; 3 – ОпрБиКпшСд;
 4 – КпрБиСдАкц; 5 – ОпрКпрБиРуд(ч); 6 – ОпрКв; 7 – ГрОпр;
 8 – ОпрКпр; 9 – КпрРоБиРуд(ч)АпАкц; 10 – БиКпш; 11 – ОпрБиКпшСд;
 12 – БиРуд(ч); 13 – Би; 14 – БиКпш; 15 – ОпрКпрБиРуд(ч)СдАпАкц;
 16 – ОпрБиРуд(ч)СдАп; 17 – ОпрБиРуд(ч)Сд; 18 – ОпрКпрБиРуд(ч)Сд; 19 – ОпрКпрАп; 20 – Опр; 21 – Опр; 22 – БиРуд(ч); 23 – РоБиРуд(ч);
 24 – БиРуд(ч)СдАкц; 25 – БиРуд(ч); 26 – Би; 27 – КпрРоБи;
 28 – КпрРоБи; 29 – РоБиСд; 30 – РоБиРуд(ч)Сд; 31 – КпрРоБиРуд(ч);
 32 – КпрРуд(ч)Сд. В редких шлифах встречаются Хл(по Би);
 Сер→МуСосс(по плагиоклазу). Сокращения: Акц – акцессорный минерал, Ап – апатит, Би – биотит, Гр – гранат, Кпш – калиевый полевоый шпат, Опр – ортопироксен, Ро – роговая обманка, Руд(ч) – рудный минерал черный, Сд – сульфиды, Сосс – сосюритовые агрегаты, Хл – хлорит.

Таблица 2 – Редкоземельные элементы в плагиогнейсах тоналитового и трондьемитового состава верхнеанабарской и хапчанской серий.

Оригинальн	S-0311/1	S-0409/1	RO-9PA11	RO-79351	S-0444/1
	1	2	3	4	5
La	22,24	18,65	30,00	22,00	10,99
Ce	8	4	0	0	5
Pr	40,63	35,31	56,00	27,00	12,76
Sm	5	6	0	0	8
Eu	3,720	3,198			0,99
Gd	13,50	10,35			
Tb	9	6			2,751
Dy	2,103	1,401	4,400	0,850	0,303
Ho	0,365	0,359	1,000	0,890	0,06
Er	1,440	0,816			0,207
Tm	0,177	0,087	0,400	0,096	0,03
Yb	0,990	0,522			0,153
Lu	0,201	0,102			0,042
	0,585	0,306			0,087
	0,084	0,036			0,012
	0,594	0,318	0,750	0,200	0,114
	0,081	0,051	0,130	0,250	0,018

Пояснение: В пробах Ro – PЗЭ определены нейтронноактивационным методом, а в S пробах – методом JSP.

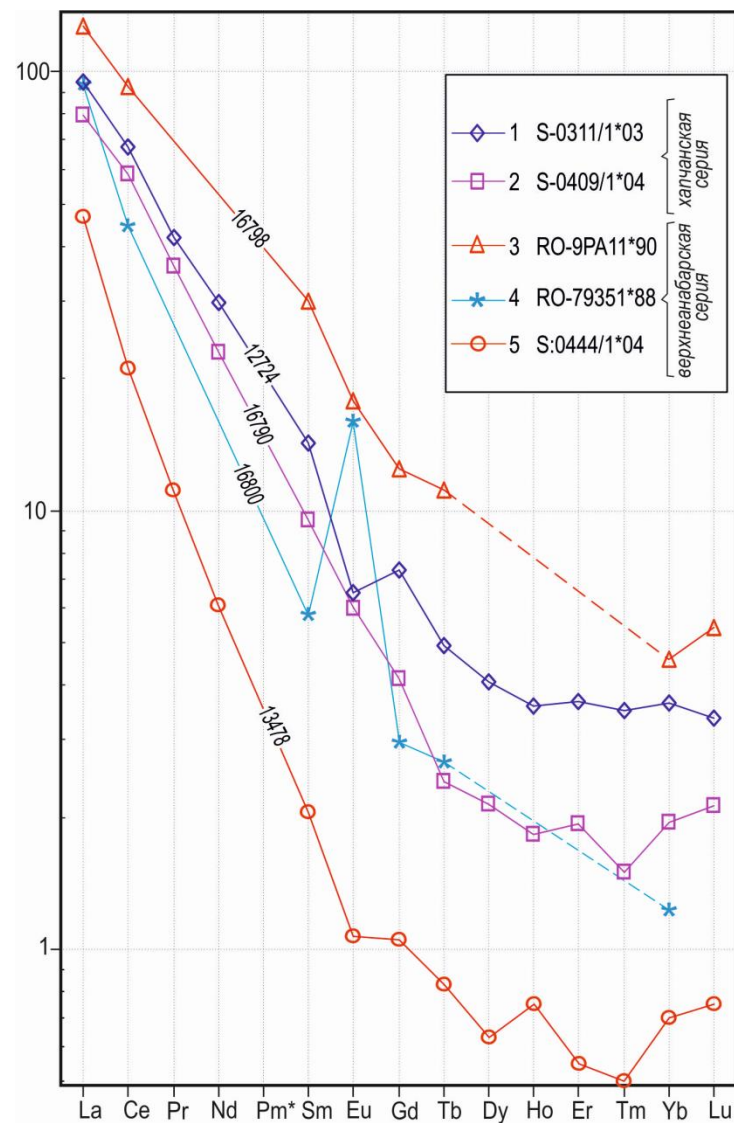


Рисунок 3 – Хондрит-нормализованное [10] Распределение PЗЭ в плагиогнейсах тоналитового и трондьемитового состава хапчанской (1,2) и верхнеанабарской (3,4,5) серий.

РЗЭ определены только в пяти пробах. (Таблица 2, Рисунок 3). Во всех пробах характерны дифференцированное распределение обогащенными легкими РЗЭ. В одной пробе верхнеанабарской серии определена (+) аномалия Eu, в другой пробе этой же серии и в 1 пробе хапчанской серии заметны (-) аномалии. Другие пробы обеих серий без аномалий. В работе [2] приведены данные по РЗЭ, в том числе в хапчанской в близких к рассматриваемым в разной степени, известняках, кальцифирах, мраморах, гранатсодержащих гнейсах почти во всех установлена -Eu.

Таким образом, наши ограниченные данные согласуются с О.М. Розен [2].

4. Обсуждение и выводы

Кроме известных на Анабарском щите трондjemитов и тоналитов, породы сходные с ними по химическому составу, хотя и редко, обнаружены в существенно карбонатно-парагнейсовой серии, слагающие определенные ритмы. Эти породы могут быть восстановлены как породы типа известковистых песчаников и алевролитов, декарбонатизированных при метаморфизме.

Главной особенностью рассматриваемых плагиогнейсов является повышенное содержание Na₂O. Это может быть обусловлено разными причинами. В осадочных породах: бывает аутигенный альбит; терригенный плагиоклаз был альбитизирован; Na-метасоматоз; наличие галита в исходных осадках. Последнее как-будто подтверждается тем, что видный специалист осадочной геологии докембрия О.М. Розен аргументировал аридный литогенез хапчанской серии [2]. Следовательно в первичных осадках могли быть не только галит, но и другие растворимые и летучие компоненты. Вероятно и сочетание этих причин.

Таким образом, на Анабарском щите имеется пример петрохимической конвергенции – образование пород близкого химического состава при наложенном процессе.

5. Литература:

- [1] Вишнеvский А.Н. Метаморфические комплексы Анабарского кристаллического щита. Л. Недра, 1978. 214 с.
- [2] Розен О.М., Андреев В.П., Белов А.Н. и др. The archaean of the Anabar Shield in problems of early evolution of the Earth. M. Science, 1988. 251 с.
- [3] Лутц Б.Г., Оксман В.С. Глубоко эродированные зоны разломов Анабарского щита. М. Наука, 1990. 260 с.
- [4] Смелов А.П., Котов А.Б., Сальникова Е.Б. и др. Возраст и продолжительность формирования Билляxской зоны тектонического меланжа, Анабарский щит. // Петрология, 2012. Т. 20. № 3. С. 315-330.
- [5] Gerasimov B., Beryozkin V., Kravchenko A. Typomorphic Features of Placer Gold from Bellyache Tectonic Melange Zone of the Anabar Shield and Its Potential Ore Sources (Northeastern Platform). Minerals 2020, 10, 281.
- [6] Лопатин Б.Г. Геологическая карта СССР. Масштаб 1:200000. Серия Анабарская. Листы R-49-XV, XVI. Объяснительная записка. М. 1972. 82 с.
- [7] Андреева Е.Д., Богатиxов О.А., Бородаевская М.Б. и др. Классификация и номенклатура магматических горных пород. М. Недра, 1981. 160 с.
- [8] Trondjemites, dacites- and related rocks //Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam-Oxford- New York, 1979, 488 pp.
- [9] O'Connor J.T. A classification for quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratios // US Geol. Surv. Profess. Pap. B. 1965. № 525. P. 79-84.
- [10] Sun Sh.S., McDonough. Chemical and isotopic systematics oceanic basalt: implications for mantle composition and processes // Magmatism in ocean basing / Eds. A.D. Saunders, M/J. Norry. Geol. Soc. Spec. Public. 1989. № 42. P. 313-345.

**ПЕТРОГРАФИЯ ПОРОД ЗЕЛЕНОКАМЕННОГО КОМПЛЕКСА
РУДОПРОЯВЛЕНИЯ УТАНАХ
(ВЕРХНЕ-ТИМПТОНСКИЙ ЗОЛОТОРУДНЫЙ РАЙОН)**

Николай Бондарь-Лунецкас, Александр Кравченко, Егор Иванов, Евгений Лоскутов
ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

**PETROGRAPHY OF THE ROCKS COMPOSING THE GREENSTONE COMPLEX
OF THE UTANAKH ORE OCCURRENCE
(UPPER TIMPTON GOLD MINING DISTRICT)**

Nikolay Bondar-Lunecas, Alexandr Kravchenko, Egor Ivanov, Evgeniy Loskutov
Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. The paper presents and discusses data on the petrography and petrochemistry of the diaphthorites with disseminated sulfides replasing the basic rocks in the area. As a result of the research, it was found that diaphthorites belong to the greenschist facies. In the progress of petrographic studies, the rocks were divided into two subfacies. The subfacies have some differences in the mineral composition of the rocks, which are well observed by microscopic study. First subfaction is represented by the mineral association of oligoclase, epidote, actinolite, biotite and muscovite. Second subfaction is represented by the albite-chlorite-sericite association.

1. Введение

Верхне-Тимптонский золоторудный район (ВТЗР) расположен в зоне сочленения Станового и Алданского доменов Алдано-Станового щита (АСЩ), различающихся геологическим строением (рисунок 1 врезка). В ВТЗР известны крупные россыпные месторождения золота рек Гонам, Тимптон, Иенгра и ручьев Скобельцинский, Колбочи, Утанах, Березовый, Юрский и других. На некоторых из них золотодобыча ведется с конца XIX века. Между тем сопоставимых по масштабам коренных источников золота до сих пор не установлено, их возможный тип не определен. Различными исследователями отмечена связь с фрагментами зеленокаменного комплекса и зонами диафтореза преимущественно зеленосланцевой фации (рисунок 1) [1; 2; 5].

Зеленокаменный комплекс пород впервые был выделен из состава диафторитов и закартирован как Холодниканский зеленокаменный пояс (ЗКП) Москвиченко Н.И. и Красниковым Н.Н [1; 2]. Комплекс сложен метаморфизованными вулканитами основного и среднего состава с прослоями ультраосновных пород и кварцитов. Петрология и изотопия пород зеленокаменного комплекса были изучены С.Н Лавриком [3]. Ими указывается, что метаморфизм пород проходил в условиях эпидот-амфиболитовой фации, и типичными минеральными парагенезисами являются: $Pl+Amf+Ep\pm Qz$ и $Pl+Mus+Qz\pm Ep$ ¹. На основании микрозондовых анализов сосуществующих амфибола и плагиоклаза определены параметры метаморфизма, которые соответствуют $T = 550^{\circ}C$, $P = 4-5$ кбар. Изучена Sm-Nd система в пяти пробах метавулканитов известково-щелочной серии холодниканского метаморфического комплекса и установлен нижнепротерозойский возраст их протолитов, составляющий $2,41\pm 0,08$ млрд. лет [3], Sm-Nd модельный возраст по девяти пробам комплекса варьирует в пределах 2,9 – 3,17 млрд. лет [4].

¹ Сокращения названий минералов: Ab – альбит, Act – актинолит, Amf – амфибол, An – анортит, Au – золото, Bt – биотит, Ep – эпидот, Hbl – роговая обманка, Chl – хлорит, Cal – кальцит, Mus – мусковит, Pl – плагиоклаз, Qz – кварц, Ser – серицит, Ttn – титанит (сфен). В круглых скобках далее приведены сокращения для малораспространенных минералов, в квадратных – реликтовых.

В петротипе Холодниканский зеленокаменный комплекс представлен серией маломощных тектонических пластин среди blastsилонитов, развитых по породам амфиболитового станового комплекса и гранулитовой сланцево-ортогнейсовой толщи. Кроме петротипа, так же выделены маломощные пластины пород зеленокаменного комплекса в плотиках полигонов отработанных россыпей, где наряду с амфиболовыми сланцами, значительный объем составляют микрогнейсы и слюдяные сланцы. Кроме этих пород в выходах наблюдаются карбонатные породы и железистые кварциты, отсутствующие в окружающих породах высокотемпературных фаций. Нельзя утверждать, что изученность зеленокаменного комплекса находится на высоком уровне. Трудности изучения связаны со сложной геологической историей развития района на стыке двух традиционно выделяемых областей щита: Алданской и Становой [4].

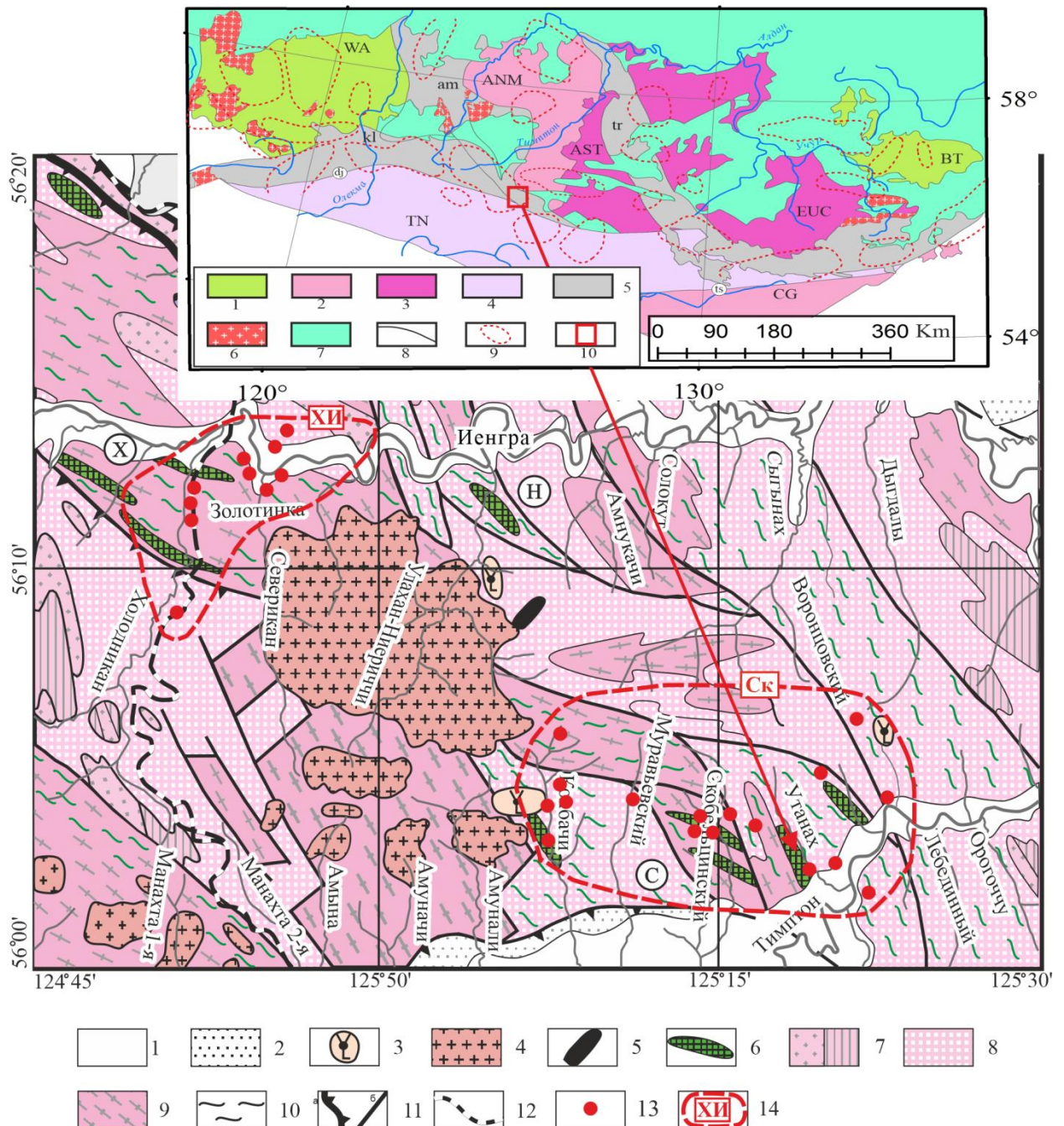


Рисунок 1 – Схематическая карта докембрия Иенгра-Тимптонского междуречья (составленная Смеловым А.П и Зедгенизовым А.Н). [Березкин и др., 2015]

1 – четвертичные отложения, 2 – юрские и меловые песчаники, алевролиты, аргиллиты, пласты каменных углей, пирокластиты; 3 – позднеюрские-раннемеловые граносиенит-порфиры, монцодиориты, кварцевые монцодиорит-порфиры; 4 – нерасчлененные граниты; 5 – ультрабазиты; 6 – фрагменты зеленокаменного комплекса: X - Холодниканские, Н - Неричинский, С - Скабельдинские; 7 – сланцево-парагнейсовая толща: а – с преобладанием кварцитов, б – с преобладанием гранат-биотитовых плагиогнейсов; 8 – сланцево-ортогнейсовая толща; 9 – амфиболит-плагиогнейсовый (становой) комплекс; 10 – blastsмилониты (диафториты); 11 – разрывные нарушения: а - надвиги, б - разломы; 12 – АЯМ; 13 – рудопроявления; 14 – рудные поля: СК - Скобельцинское; ХИ – Холодникан-Иенгринское. Врезка: 1 – гранит-зеленокаменные террейны (WA – Западно-Алданский, BT – Батомгский); 2 – гранулит-гнейсовые террейны (ANM – Нимнырский, CG – Чогарский); 3 – гранулит-парагнейсовые террейны (AST – Сутамский; EUC – Учурский); 4 – тоналит-трондьемит-гнейсовые террейны (TN – Тындынский); 5 – зоны тектонического меланжа (am – Амгинская, kl – Каларская, tr – Тыркандинская); 6 – сшивающие раннепротерозойские граниты; 7 – чехол Сибирской платформы; 8 – разломы; 9 – рудные районы; 10 – площадь рисунка 1.

По данным [5] породы зеленокаменного комплекса подвергнуты диафторезу амфиболитовой и зеленосланцевой фаций. Возрастные границы зеленосланцевого диафтореза Станового структурного шва находятся в интервале от 286 до 170 млн лет [6]. Согласно Г.М Друговой [5] для амфиболитовой фации характерны вторичная гранобластовая, нематобластовая и пойкилобластовая структуры, возникновение гидроксилсодержащих минералов на месте высокотемпературных безводных. В породах основного состава наименее устойчивым является гиперстен, замещающийся биотитом и/или роговой обманкой. При полном замещении гиперстена амфиболом диопсид ещё сохраняется. Диопсид и коричневая роговая обманка превращаются в обыкновенную зеленую или голубовато-зеленую роговую обманку. Плагиоклаз в этой фации имеет содержание анортитовой составляющей до 70-80%. Для зеленосланцевой фации характерно образование апогранобластовой, апонематобластовой и аполепидобластовой структур. В этой фации происходит замещение зерен первичных минералов вторичными с образованием гомоосевых псевдоморфоз или с превращением в агрегат вторичных минералов при сохранении ранее существовавших форм. Эта особенность связывается предшественниками с участием в процессах летучих компонентов (главным образом воды и углекислоты). Весьма характерным является развитие псевдоморфоз актинолита по пироксенам и роговой обманке, образование включений эпидота и мусковита в альбитизированном плагиоклазе. Так же протекают процессы хлоритизации биотита и амфиболов. Этот процесс происходит с полной хлоритизацией биотита, но не приводит к полному исчезновению актинолита. Сланцеватость цементирующей массы, выражается в ориентировке слюд, хлорита и вытянутых зерен кварца, чаще всего обтекающей порфиробласты. Анализ данных по химизму диафторитов и петрографические наблюдения позволили [5] выделить в диафторитах зеленосланцевой фации две субфации. Первая – биотит-мусковитовая субфация характеризуется образованием двух главных парагенезисов $Ep-Act-Bt-Ab-(Qz)-(Cal)$ и $Ep-Bt-Mus-Ab-Qz-(Cal)$. Появление в породах актинолита или мусковита определяется содержанием калия в системе к моменту завершения диафторических преобразований. Диафторез протекал в наиболее высокотемпературной части зеленосланцевой фации (на границе с эпидот-амфиболитовой фацией), отмечается появление сине-зеленого амфибола, плагиоклаз отличается относительно высоким содержанием анортитовой составляющей (An до 15%). Вторая – кварц-альбит-мусковит-хлоритовая выражена интенсивным развитием хлорита, замещающего биотит и в меньшей степени актинолит. Хлоритизация актинолита приводит к исчезновению парагенезиса эпидот-актинолит, что указывает на относительно низкотемпературный характер изменений. Для этой субфации характерно окварцевание и повышение активности серы (пиритизация) и связанные с ними комплексы гидротермальных жил, являющиеся носителями золота. Одновременно с этим происходило образование почти чистого альбита в ассоциации с эпидотом и серицитизация плагиоклаза [5; 7].

Рудопоявление Утанахское расположено в низовьях руч. Утанах (Рисунок 1). Представлено сериями кварц-карбонатных жил с вкраплениями и гнездами пирита и халькопирита в диафоритах представленных выходами хорошо рассланцованных эпидот-биотит-амфиболовых и хлорит-мусковит-кварцевых сланцев.

2. Методы

Проведены петрографические исследования сланцев, в отделе ФХМА ИГАБМ СО РАН химическим методом определены содержания породообразующих элементов, выполнены микронзондовые исследования минералов. Результаты исследований приводятся и обсуждаются ниже.

3. Результаты

Петрографические исследования кристаллических сланцев рудопоявления Утанахское показывают, что можно выделить охарактеризованные [5] биотит-мусковитовую и кварцево-альбит-серицит-хлоритовую субфации зеленосланцевой фации. Породы биотит-мусковитовой субфации чаще всего представлены эпидот-биотит-амфиболовыми сланцами с минеральным составом: $Pl_{(0-15)}$ -30%; Mu -10%; Bt -15%; Qz -10%; Ep -25%; Amp -5%, а так же включениями Ttp до 5% и Cal - до 5%. Кварц-альбит-серицит-хлоритовая субфация представлена эпидот-хлоритовыми и слюдяными сланцами с минеральным составом: $Pl_{(0-5)}$ -30% (серицитизированный - 10%); Mu -15%; Chl -10%; Qz -15%; Ep -15%; а так же включениями Ttp до 5% и Cal - до 10%.

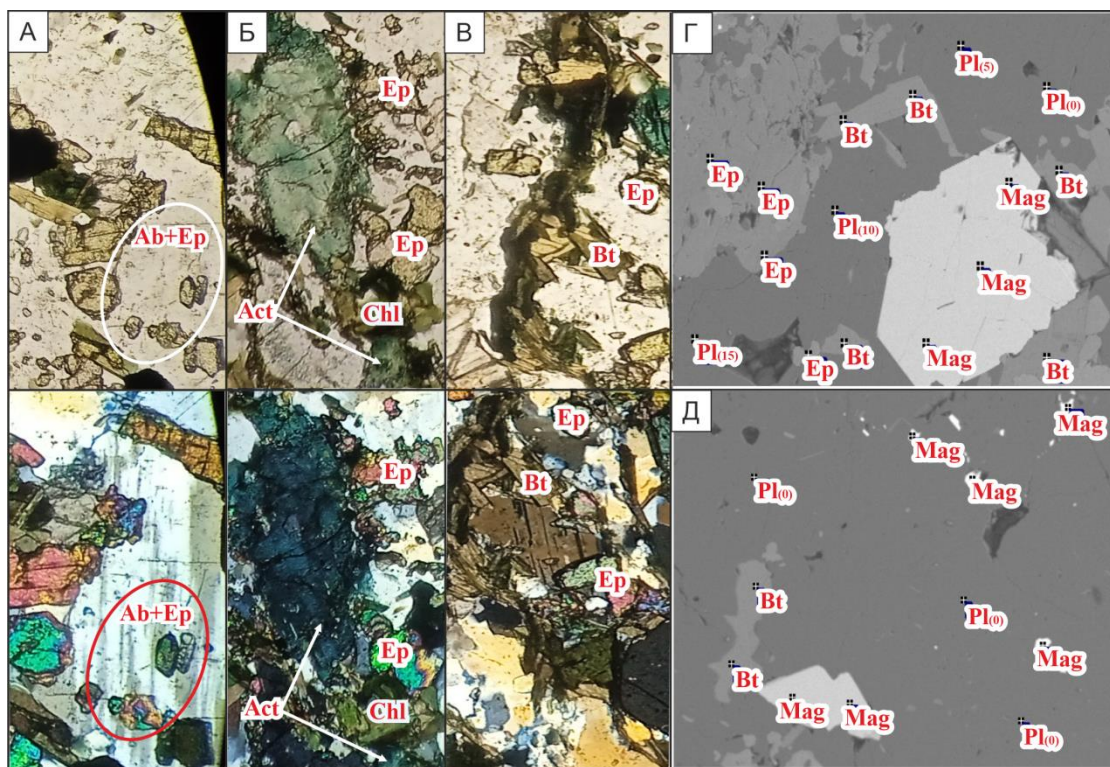


Рисунок 2 – Минеральные парагенезисы биотит-мусковитовой субфации. Шлиф Ут-7-20.

А-В – в проходящем свете. Сверху на рисунке николи параллельны, снизу николи скрещены. Г, Д – снимок электронного микроскопа. А – развитие эпидота по кристаллам альбита, Б – хлорит по актинолиту, В - биотит, Г – плагиоклаз Al_0 -до 15% с эпидотом и вкрапленность биотита с магнетитом, Д – альбит, и вкрапленность биотита с магнетитом

Диафориты биотит-мусковитовой субфации – характеризуются минеральной ассоциацией $Ab-Ep-Act-Bt-Qz-[Hbl]-(Cal)-(Chl)-(Pl_{0-15})$ наблюдаемой в образцах при микроскопическом описании. Плагиоклаз в породах представлен почти чистым альбитом (рисунок 2-Д) и редкими

зернами олигоклаза (рисунок 2-Г). Так же наблюдается мусковитизация и эпидотизация (рисунок.2-А). Группа эпидота в породах представлена эпидот-цоизитовым рядом, а так же редкими зернами ортита, зерна эпидота развиты по плагиоклазу вблизи темноцветных минералов. Группа амфиболов представлена сине-зеленым актинолитом в редких случаях замещённым на хлорит (рисунок 2-Б) и редкими зернами бурой роговой обманки (часто в реликтовой форме). Биотит в образцах низко титанистый или вовсе не имеет титана и имеет вид темно-зеленых, зеленых чешуек развитых по сланцеватости пород (рисунок 2-В). Кварц обнаружен во всех образцах, и чаще всего слагает линзы и прожилки (иногда катаклазированные), в парагенезисе с кальцитом. Изредка в породах данной субфации встречается сфен (титанит), в шлифах наблюдается в виде зерен неправильной формы и подверженный сильным изменениям, по всем зернам сфена наблюдается развитие рудного минерала (ильменит и магнетит). Текстурно-структурные особенности пород в шлифах выражаются в сланцеватости и катаклазе минералов. Весьма характерным является образование пайкилобластических включений эпидота и мусковита в альбитизированном плагиоклазе и сланцеватости цементирующей массы, ориентировкой слюд и хлорита.

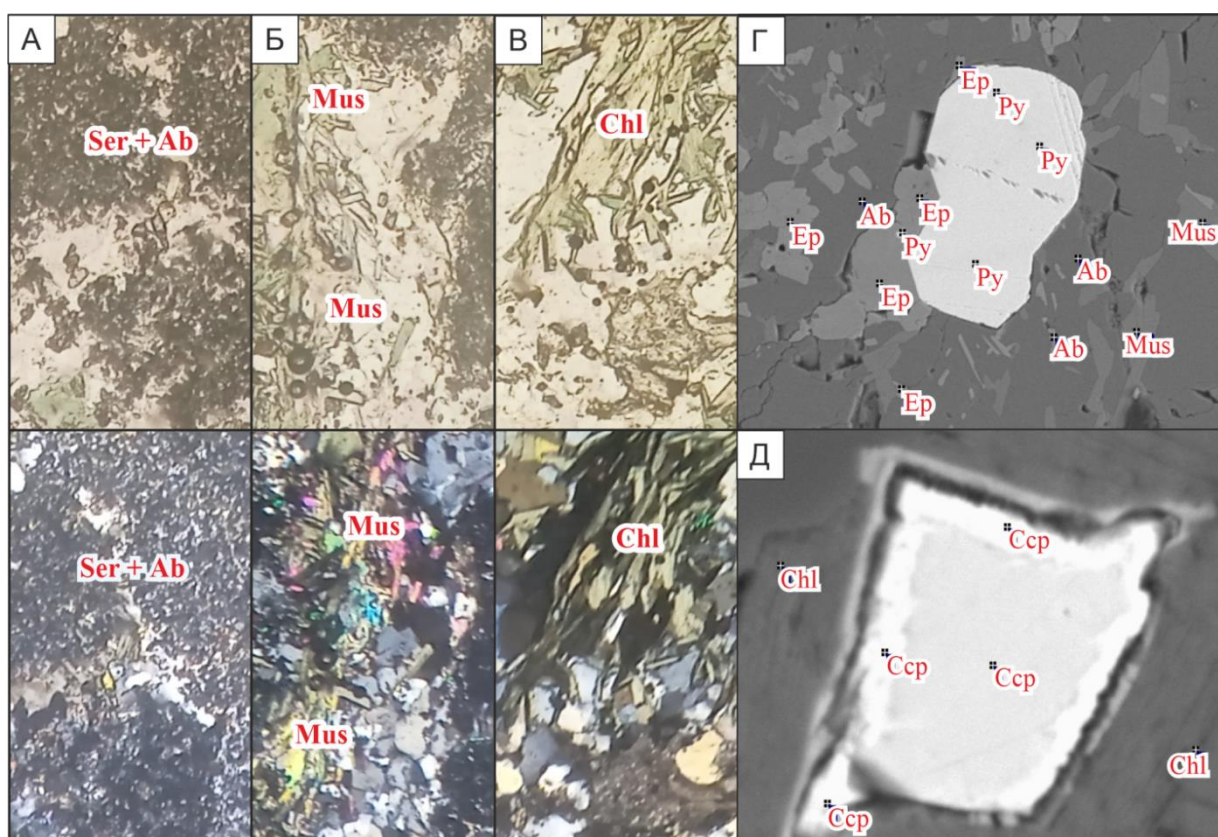


Рисунок 3 – Минеральные парагенезисы кварцево-альбит-серицито-хлоритовой субфации.
Шлиф Ут-19-20.

А-В – в проходящем свете. Сверху на рисунке николи параллельны, снизу николи скрещены. Г, Д – снимок электронного микроскопа. А – серицитизированный альбит, Б - мусковит, В - хлорит, Г – замещения на альбит и эпидот вблизи включения пирита, Д – хлорит окружающий халькопирит.

Диафориты кварцево-альбит-серицито-хлоритовой субфации характеризуются – минеральной ассоциацией Ab-Mus-Chl-Qz-Ser-Ep-Cal-(Bt)-(Act). Плагиоклаз в породах данной субфации представлен почти чистым альбитом $An_{0.5}$ (рисунок 3-Г,Д), интенсивно серицитизированным (рисунок 3-А). Мусковит развит по трещинкам, часто в ассоциации с хлоритом (рисунок 3-Б). Хлорит в данных породах развивается по биотиту и в меньшей степени актинолиту (рисунок 3-В). Кварц, как и в предыдущей субфации, развит во всех породах и частично катаклазирован. Серицитизация проявлена во всех породах, с разной интенсивностью. Наиболее интенсивная

серитизация обнаружена в породах с хлоритом, что связано с высвобождением калия при хлоритизации биотитов. Эпидот так же как и в породах биотит-мусковитовой субфации наблюдается в ассоциации с плагиоклазом, но его намного меньше и уже пропадает парагенезис Ep-Act, что как отмечается Г.М Друговой указывает на низкотемпературный характер изменений. Кальцит в породах наблюдается в ассоциации с кварцем в виде прожилков, а так же в виде самостоятельных зерен вблизи породообразующих минералов. Биотит остался лишь в виде редких реликтовых включений, в замещающей его массе хлорита. Актинолит так же как и биотит, редок и встречаются лишь его редкие реликтовые зерна. В биотит-мусковитовой субфации средние содержания породообразующих окислов составляют SiO_2 – 48,69%; TiO_2 – 1,15%; Al_2O_3 – 16,41%; Fe_2O_3 – 6,16%; FeO – 4,03%, MnO – 0,14%; MgO 4,45%; CaO – 9,98; Na_2O – 3,01; K_2O – 2,09%; H_2O – 1,72%; P_2O_5 – 0,65%; CO_2 – 0,59% в кварц-альбит-серицит-хлоритовой составляют SiO_2 – 49,36%; TiO_2 – 1,22%; Al_2O_3 – 14,04%; Fe_2O_3 – 4,97%; FeO – 6,29%; MnO – 0,16%; MgO 6,79%; CaO – 8,07; Na_2O – 2,41; K_2O – 1,02%; H_2O – 2,96%; P_2O_5 – 0,21%; CO_2 – 1,82%. На диаграммах ACF с конодами и полями по данным Г.М Друговой [5] точки составов диафторитов биотит-мусковитовой субфации находятся в треугольнике Ep-Bt-Act (рисунок 4-А). Точки кварц-альбит-серицит-хлоритовой субфации попадают в треугольник Ep-Chl-Cal (рисунок 4-Б), но расположены ближе к хлориту, что может свидетельствовать о неустойчивости эпидота и актинолита.

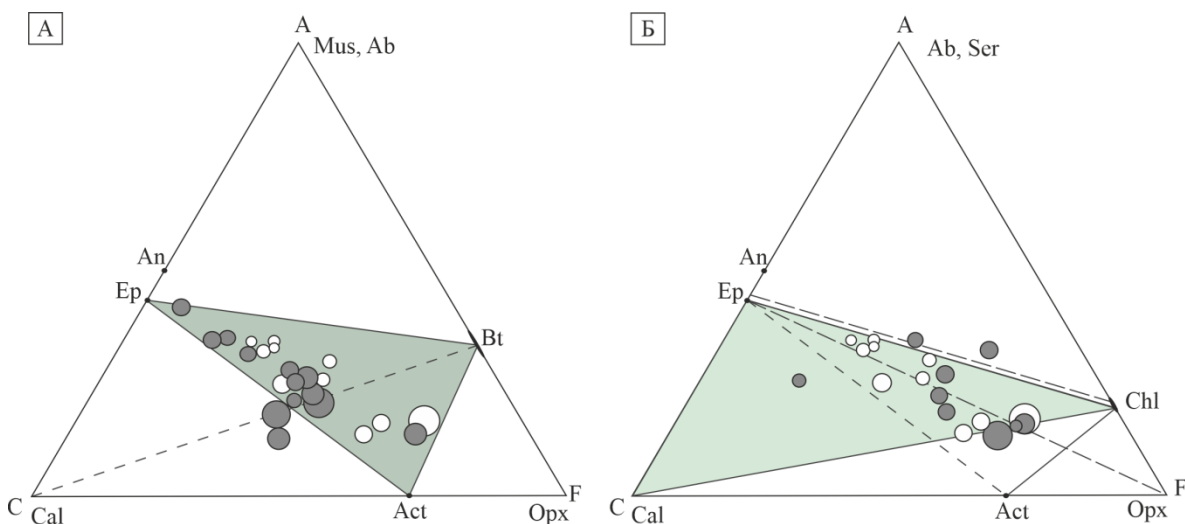


Рисунок 4 – Парагенетические диаграммы ACF для диафторитов зеленосланцевой фации

Коноды на рисунке построены в соответствии с парагенезисами выделенными Г.М Друговой [5] и соответствуют парагенезисам выделенным при петрографическом изучении пород рудопроявления Утанах. А – биотит-мусковитовая субфация, Б – кварцево-альбит-серицит-хлоритовая субфация. Сплошные линии – основные парагенезисы, прерывистые – редкие парагенезисы, черные круги – породы рудопроявления, белые – породы из коллекции Г.М Друговой (размер кругов прямо пропорционально зависит от количества $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + \text{п.п.п.}$).

Средние составы пород первой и второй субфаций имеют характерные отличия. Более высокие содержания Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , Na_2O , K_2O обнаружены в первой, а SiO_2 , FeO , MgO , CO_2 , H_2O во второй субфации.

Согласно полевым наблюдениям к породам первой субфации приурочены единичные выходы КПШ-эпидотовых метасоматитов, к породам второй субфации единичные золотосодержащие гидротермальные кварц-карбонатные жилы.

4. Выводы

По результатам петрографического исследования metabазитов рудопроявления Утанахское обнаружено две минеральные ассоциации Ab-Ep-Act-Bt-Qz-[Hbl]-(Cal)-(Chl)-(Pl₀₋₁₅), Ab-Mus-Chl-Qz-Ser-Ep-Cal-(Bt)-(Act) сопоставимые с ассоциациями биотит-мусковитовой и кварцево-альбит-серицит-хлоритовой субфаций зеленосланцевой фации. Породы биотит-мусковитовой субфации отличаются относительно высоким содержанием Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, Na₂O, K₂O, а кварцево-альбит-серицит-хлоритовой содержанием SiO₂, FeO, MgO, CO₂, H₂O, что свидетельствует об увеличении содержаний летучих веществ с уменьшением температуры метаморфизма пород зеленокаменного комплекса.

5. Благодарности

Исследования выполнены по плану НИР ИГАБМ СО РАН, проект № FUFГ-2024-0007.

6. Литература:

- [1] Moskovchenko N. I., Krasnikov N. A., Semenov A. P. Endogenous Evolution of Lithotectonic Complexes of the Aldanide–Stanovide Junction Zone //Precambrian Metamorphism of in the Baikal–Amur Railway Region. – 1983. – С. 97-127.
- [2] Krasnikov N. N. Structural evolution of rocks of the Kholodnikansky greenstone belt //early precambrian of the Aldan massif and its framing: collection of scientific papers. – 1985. – p. 163.
- [3] Lavrik S. N. Kholodnikansky greenstone belt (Aldan shield): the nature of protoliths of metamorphic rocks and their petrogenesis : dis. – Far Eastern geologist. Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 2006.
- [4] Beryozkin V. I. et al. Geological structure of the central part of the Aldan-Stanovy shield and chemical compositions of rocks of the Early Precambrian (South Yakutia) //Novosibirsk: Ed. SB RAS. – 2015.
- [5] Drugova G.A., Glebovitsky V.A. Chapter IV. Regional metamorphism // Geology and petrology of the southern framing of the Aldan shield / ed. by N.G. Sudovikov. Publishing house: Science. 1965. pp. 103-169.
- [6] Kotov A. B. et al. Age limits of the manifestation of green-slate diaphoresis in the zone of the Stanovoi structural seam //Reports of the Academy of Sciences. – Federal State Budgetary Institution "Russian Academy of Sciences", 2015. – vol. 463. – No. 6. – pp. 687-687.
- [7] Korikovskiy S. P., Kazmin Yu. B. Diaphorites and mylonites of the Stanovoi deep fault zone (Stanovoi ridge) //Petrography of metamorphic and igneous rocks of the Aldan shield. M., publishing house "Science. – 1964.

ОЦЕНКА НАЧАЛЬНЫХ ЗАПАСОВ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЯ МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА

Родион Васильев, Алексей Сивцев, Мария Карпова
ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова»,
677000, Россия, г. Якутск, ул. Белинского, 58

ESTIMATION OF INITIAL STOCKS BASED ON THE MATERIAL BALANCE EQUATION

Rodion Vasiliev, Alexey Sivtsev, Marya Karpova
North-Eastern Federal University, 58, Belinsky str., Yakutsk, 677000, Russia

Abstract. It was noted the need to assess the recoverable reserves of the main productive horizon of the Srednevilyui gas condensate field. Estimates of initial geological reserves of the productive horizon T₁-III in retrospect are given. From the point of view of the operation of the gas-mode deposit, the initial reserves of the productive horizon have been assessed using the material balance method. The most adequate gas reserves calculated in 2000 y. are shown. It has been concluded that some deviation from the estimated 2000 y. gas reserves is due to the high gas content in the formation waters under the gas-water contact.

1. Введение

В Центральной Якутии, где сосредоточено почти половина всего населения Республики Саха (Якутия) единственным источником энергоснабжения является газовое сырье. Сырьевой базой служит Средневилуйское газоконденсатное месторождение (ГКМ). Ежегодно из месторождения добывается порядка 1,8-1,9 млрд. м³ природного газа для нужд Центральной Якутии. Основная нагрузка по добыче природного газа приходится на продуктивный горизонт T₁-III содержащий большую часть запасов месторождения. Вместе с тем имеются инвестиционные проекты, связанные с существенным увеличением объемов газодобычи из месторождения. Поэтому адекватная оценка добычных возможностей месторождения представляется весьма актуальной задачей.

2. Основная часть

Вилуйская НГО включает в себя месторождения, преимущественно приуроченные Хапчагайскому и Логлорскому валам Вилуйской синеклизы Сибирской платформы (рис.1) [1]. В промышленной разработке находились Усть-Вилуйское газовое и Мастахское газоконденсатные месторождения. Краткий анализ разработки данных месторождений показал низкие величины коэффициента извлечения газа (КИГ) [2]. В качестве основных причин получения низких КИГ были указаны завышенная оценка начальных геологических запасов и высокие темпы добычи газа.

Балансовые запасы газа Средневилуйского ГКМ по мере увеличения степени разведанности переоценивались неоднократно. В таблице 1 представлены результаты подсчета начальных запасов газа продуктивного горизонта T₁-III на 1971, 2000 и 2012 годы, полученные объемным методом. К сожалению доступа, к актуальному отчету подсчета запасов не имеется. Но имея данные по движению запасов по месторождению можно их рассчитать. Так, на 01.01.2023 г на Государственном балансе РФ по основному продуктивному горизонту T₁-III Средневилуйского ГКМ числились 110,998 млрд. м³. С учетом накопленной добычи из горизонта 36,664 млрд. м³ начальные запасы оцениваются в 147,662 млрд. м³.

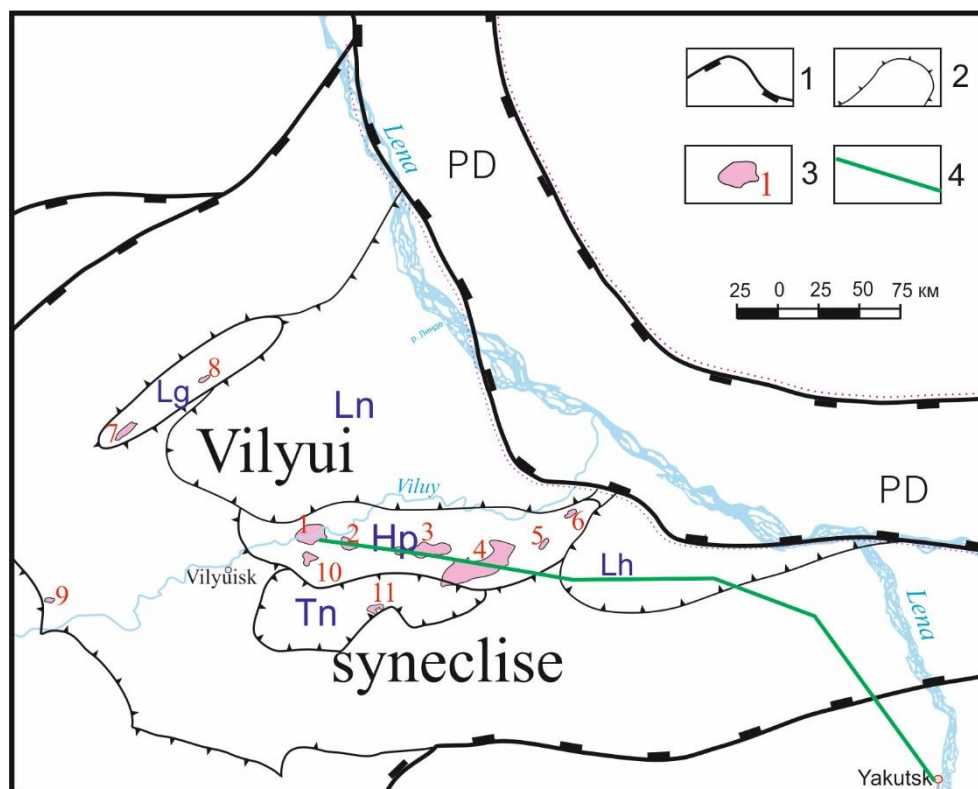


Рисунок 1 – Месторождения Вилу́йской НГО.

Условные обозначения: 1 – границы нефтегазоносной области; 2 – границы валов, поднятий, впадин; 3 – газоконденсатные месторождения: 1 - Средневилу́йское, 2 – Толонское, 3 – Мастахское, 4 – Собо́лох-Неджели́нское, 5 – Бада́ранское, 6 – Нижневилу́йское; 7- Среднетю́нское, 8 – Андыла́хское, 9 – Нижнетю́янское, 10 – им. Эва́льда Ту́ги, 11 – Хайла́хское. 4 – газопровод. Структурные единицы: PD – Предверхо́янский прогиб; Lg – Логлорский вал; Ln – Линденская впадина; Hp – Хапчагайский вал; Tn – Тангнары́нская впадина; Lh – Лунхинско-Кели́нская впадина.

Таблица 1 – Запасы природного газа продуктивного горизонта Т₁-III Средневилу́йского ГКМ

Пласты	Протокол №6133 15.01.71.	Протокол №105 20.12.00	Протокол №18/197 21.03.12	По данным Государственного баланса на 01.01.2023 г
	Нач. геол. запасы, млн. м ³	Нач. геол. запасы, млн. м ³	Нач. геол. запасы, млн. м ³	
	ABC ₁	ABC ₁	ABC ₁	
Т ₁ -III	125829	109966	132210	147662

Нужно заметить, что пересчет 2000 года (протокол ЦКЗ №105 от 20.12.2000 г.) под руководством Шабалина Владимира Петровича, который занимался изучением Средневилу́йского ГКМ с самого начала его разведки, притом на самом компетентном и ответственном уровне, может оказаться недалеким от истины.

Вместе с тем по всем промысловым характеристикам и особенностям геологического строения базовый продуктивный горизонт работает в газовом режиме [3, 4]. Данное обстоятельство позволяет оценить начальные запасы газа на основе уравнения материального баланса.

Согласно Государственному балансу на 01.01.2023 из залежи Т₁-III добыто 36664 млн. м³. Начальное пластовое давление – 25,9 МПа (255,6 атм), пластовая температура – (+55) С. На 01.01.2023 текущее пластовое давление составило 17,07 МПа (168,46 атм).

Критические давление и температура смеси пластового газа, рассчитанные по составу пластового газа, составили соответственно: 46,95 и 205,7.

$$P_{пр}(\text{нач}) = P/P_c = 255,6/46,95 = 5,44; \quad P_{пр}(\text{тек}) = P/P_c = 168,46/46,95 = 3,58$$

$$T_{пр} = T/T_c = 328/205,7 = 1,6$$

Коэффициенты сверхсжимаемости газа определённые по палеткам составили: $Z_{\text{нач}} = 0,8625$; $Z_{\text{тек}} = 0,815$

$$Q_{\text{зап}} = 36664 / ((1 - 168,46 / 0,815 \times 0,8625 / 255,6)) = 117151 \text{ млн. м}^3, \text{ или } \mathbf{117,151} \text{ млрд. м}^3.$$

Таким образом, начальные запасы продуктивного горизонта Т₁-III оцениваются всего 117,15 млрд. м³ природного газа. Надо заметить, полученная оценка наиболее близка с подсчетом начальных запасов по продуктивному горизонту Т₁-III от 2000 года в объеме 109,96 млрд. м³. Некоторое завышение оценки по методу материального баланса может быть обусловлено как не учтенными объемами газа при подсчете запасов в 2000 году, так и влиянием растворенных газов в подошвенных водах. Как известно, воды в подошвенной части сильно насыщены растворенными газами [5]. Также при объемном методе подсчета запасов газовой контактной обосновывается в контактовой зоне не полностью занятой водой. Как правило, под принятым газовой контактом газонасыщенность вод может достигать и 40%. Контакт обосновывается получением притока газа или воды при испытании интервалов. Данные газы, находящиеся ниже газовой контактной обязательно будут вносить определённый вклад в поддержании пластового давления. Точность измерения начальных и текущих пластовых давлений и их осреднение также сильно влияют на точность оценки запасов газа методом материального баланса.

Подсчеты запасов газа 2012 года и 2023 год представляются излишен завышенными.

3. Выводы

Общепризнанная практика разработки газовых месторождений показывает закономерное снижение пластовых давлений на всех этапах разработки и, соответственно, уменьшение добычных возможностей. В настоящее время добытый газ с Средневилюйского месторождения доставляется до потребителей по газотранспортной сети без применения компрессоров за счет пластовой энергии.

Оценка запасов газа методом материального баланса показывает завышенную оценку начальных запасов газа по объемному методу в 2012 году и на 2024 год. С учетом имеющегося негативного опыта разработки Усть-Вилюйского и Мастахского месторождений показавшего низкий КИГ данное обстоятельство должно насторожить.

Необходимо проводить исследования по оценке реальных остаточных извлекаемых запасов и прогнозу уровня падения пластового давления для установления периода работы газотранспортной системы без применения дожимных компрессорных станций. Целесообразность строительства дожимной компрессорной станции и его мощность также будут опираться на оценку остаточных извлекаемых запасов.

4. Литература:

- [1] Savronov, A.F. Geology of oil and gas // Yakutsk: YakD of GS SB RAS, 2000, 166 pp.
- [2] Sivtsev, A.I., Egorova, T.R. and Sivtsev, N.A. On the issue of recoverable gas reserves // Vestnik of the North-Eastern Federal University, Series: Science of the Earth, 2021, vol 3(23), pp. 58-65.
- [3] Sivtsev, A.I. Study of the heterogeneity of the T₁-III production horizon and its impact on the geological characteristics of the deposit (in the example of Srednevilyui gas condensate field) // Yakutsk, 2011, 146 pp.
- [4] Pogodaev, A.V. Hydrogeological conditions of formation and preservation of gas condensate deposits of Napchagai Megashaft of Vilyui Syncline // 2019, 158 pp.
- [5] Grubov, L.A. and Slavin, V.I. Comparative assessment of hydrodynamic conditions of different regions of the Yakut artesian basin due to oil and gas content // Leningrad: VNIGRI, 1971, pp. 184-202.

**ТИПОМОРФНЫЕ ПРИЗНАКИ РОССЫПНОГО ЗОЛОТА РЕЧ. ЛЕВЫЙ
УЛАХАН ХАПТАСЫННААХ (АНАБАРСКИЙ ЩИТ)**

Борис Герасимов¹, Роман Желонкин², Лариса Кондратьева¹

¹ ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

² АО «Алмазы Анабара», Россия, 899000, Якутск, ул. 50 лет Советской Армии, 86/3а

**TYPOMORPHIC SIGNS OF PLACER GOLD OF THE LEFT ULAKHAN
HAPTASYNNAAKH RIVER (ANABAR SHIELD)**

Boris Gerasimov¹, Roman Zhelonkin²

¹ Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

² JSC "Almazy Anabara", 86/3a, 50 years of the Soviet Army str., Yakutsk, 677004, Russia

Abstract. Typomorphic signs of placer gold of the Left Ulakhan Haptasynnaakh river, draining rocks of the central part of the Billyakh tectonofluid zone of the Anabar shield have been studied, in order to identify its possible primary sources. The predominance in the placer of gold of ore-habit and poorly rounded angular-cloddy grains with an unrounded micropitted-tubercular surface often with adhesions of variable aluminosilicate composition and relics of small growths of quartz and potassium feldspar, as well as the fraction proportion >0.5 mm to 40% allowed us to refer the studied gold to a autochthonous metal. The study of the nearby sulfidized rocks of the Haptasynnaakh zone showed that ore mineralization is represented by a variety of mineral forms. Pyrite is the main ore mineral. A wide range of telluride minerals has been identified, including predominating silver and bismuth tellurides. For the first time, lamellar and rod-shaped gold was identified from the crushed samples of mineralized rocks. Similar composition of mineral inclusions in placer gold of the Left Ulakhan Haptasynnaakh river and mineral parageneses of ores of the Haptasynnaakh ore zone allows us to assert that the ore occurrences of the zone are the primary sources of the studied gold. The discovery of gold of an ore habit of a fraction >0.5 mm in the placer indicates formation of a relatively large noble metal in deeper horizons of mineralization, than identified gold at this stage of research, that determines the positive prospects for further study of the Haptasynnaakh ore zone.

1. Введение

Исследование комплекса типоморфных признаков россыпного золота является целесообразным для потенциально золотоносных районов, где еще не обнаружены рудные месторождения, поскольку это может пролить свет на природу его коренных источников. На Анабарском щите до настоящего времени не выявлены промышленные россыпные (кроме проявлений) и рудные месторождения золота, хотя территория щита признается многими исследователями перспективным в этом отношении [1-6]. Нами изучены типоморфные признаки россыпного золота реч. Левый Улахан Хаптасыннаах, дренирующей сульфидизированные метаморфические породы центральной части Билляхской тектонофлюидной зоны (ТФЗ) Анабарского щита с целью выявления его типоморфных особенностей и потенциальных коренных источников.

2. Результаты и обсуждение

Основу Билляхской ТФЗ образует система сближенных разломов, трассированных бластомилонитами и катаклазитами, между которыми заключены пласты в различной степени

диафторированных гранулитов верхнеанабарской и хапчанской серий. В центральной её части расположен Билляхский плутон порфиробластовых гранодиоритов и гранитов (рисунок 1) [5]. Мелкообъемные пробы отбирались с русловых отложений верхнего и среднего течения реч. Левый Улахан Хаптасыннаах (рисунок 1). Русловой аллювий представлен в основном серыми гнейсами, розоватыми гранито-гнейсами и гранитоидами, весьма редко отмечаются мелкие обломки аляскитовых гранитов и жильного кварца. Глубина отбора проб составила 1-1,4 м. Выход тяжелого концентрата высокий.

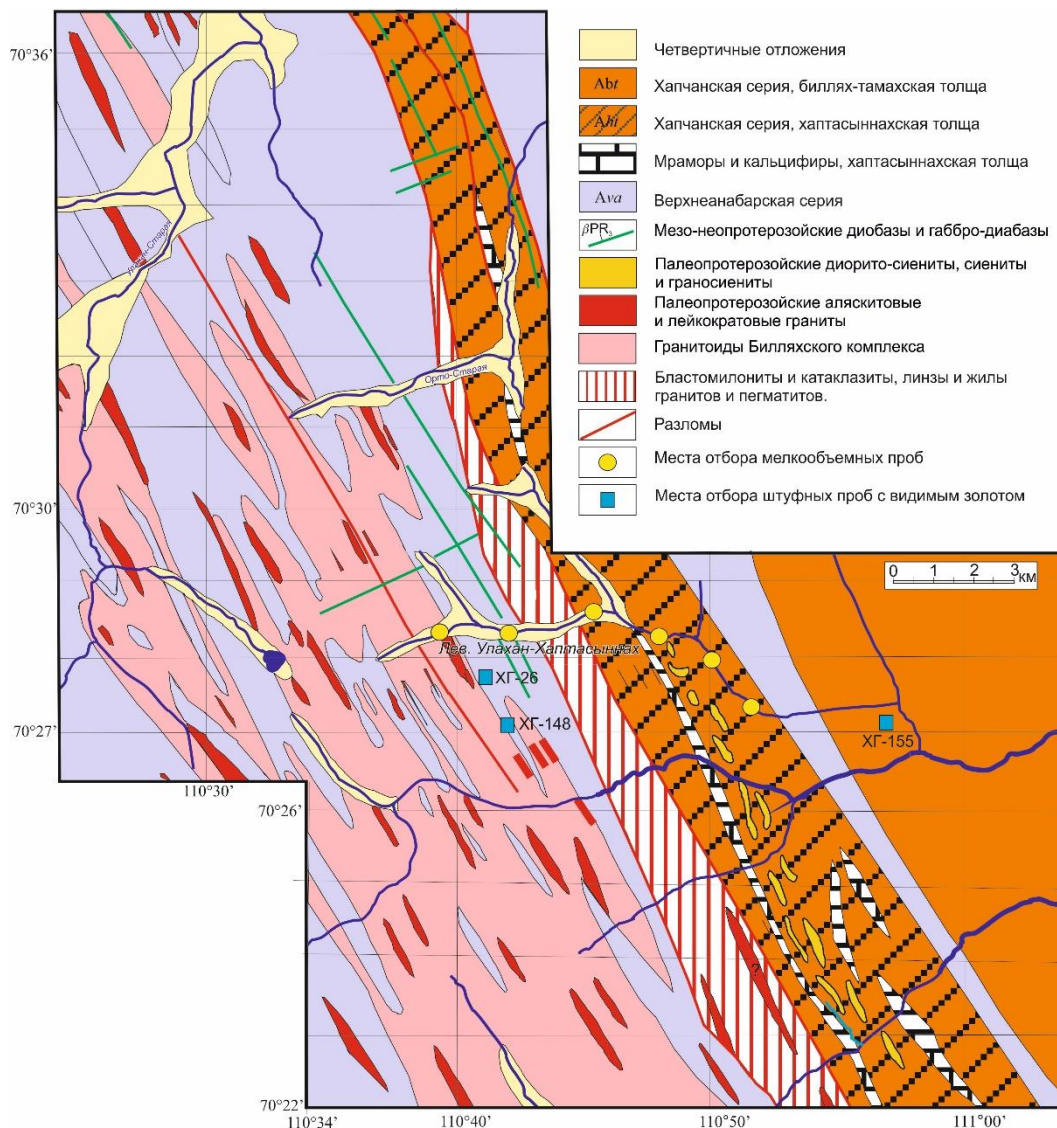


Рисунок 1 – Схема геологического строения центральной части Билляхской тектонофлюидной зоны [5] и места отбора проб.

Гранулометрический состав золота следующий: 1-2 мм – 2%, 0,5-1 мм – 38%, 0,25-0,5 мм – 38%, -0,25 мм – 22%. Оно характеризуется окатанными комковидными (30%), пластинчатыми (10%) и палочковидными (первые %) с тонкошагренево-поверхностью, слабоокатанными угловато-комковидными (60%) с мелкоямчато-бугорчатой поверхностью индивидами. Пробность его варьирует в широких пределах: весьма высокопробное (999-951‰) – 63%, высокопробное (950-900‰) – 10%, средней пробности (899-800‰) – 7%, относительно низкопробное (799-700‰) – 10% и низкопробное (699-400‰) – 10%. Микрондовым анализом в золоте определены минеральные включения кварца, калиевого полевого шпата, плагиоклаза, пирротина, гессита, теллурувисмутита и галенита (рисунок 2).

Исследование близлежащих сульфидизированных пород Хаптасыннахской зоны показало, что рудная минерализация характеризуется разнообразием минеральных форм. Сульфиды представлены главным образом пиритом, пирротином, реже арсенопиритом, халькопиритом, галенитом и сфалеритом (рисунок 3). Кроме этого установлены молибденит, герсдорфит, ковеллин, борнит, антимонит, акантит, хлораргирит, самородный висмут, золото и серебро. Широким распространением пользуется группа минералов теллура – петцит, гессит, теллуровисмутит. Самородное золото находится в индивидуальных зернах среди кварца и полевых шпатов (рисунок 4, а, б) и в сростании с пиритом (рисунок 4, в).

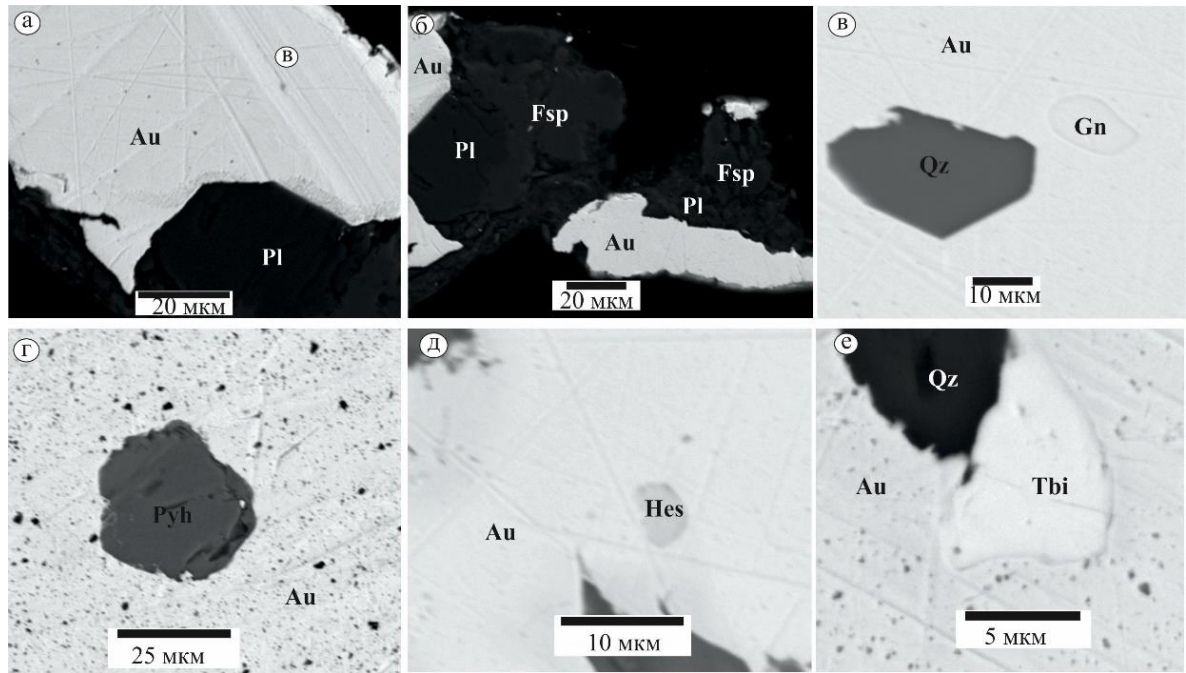


Рисунок 2 – Минеральные включения в золоте россыпи реч. Левый Улахан Хаптасыннах:
 а – кристалл плагиоклаза в низкопробном золоте; б – сростания плагиоклаза, калиевого полевого шпата и низкопробного золота; в – галенит рядом с кварцем в низкопробном золоте; г – относительно крупное изометричное зерно пирротина в высокопробном золоте; д – мелкое зерно гессита в относительно низкопробном золоте; е – теллуровисмутит в сростании с кварцем в относительно низкопробном золоте; обозначения минералов: Au – самородное золото, Pyh – пирротин, Hes – гессит, Gn – галенит, Tbi – теллуровисмутит, Qz – кварц, Fsp – калиевый полевой шпат; Pl – плагиоклаз.

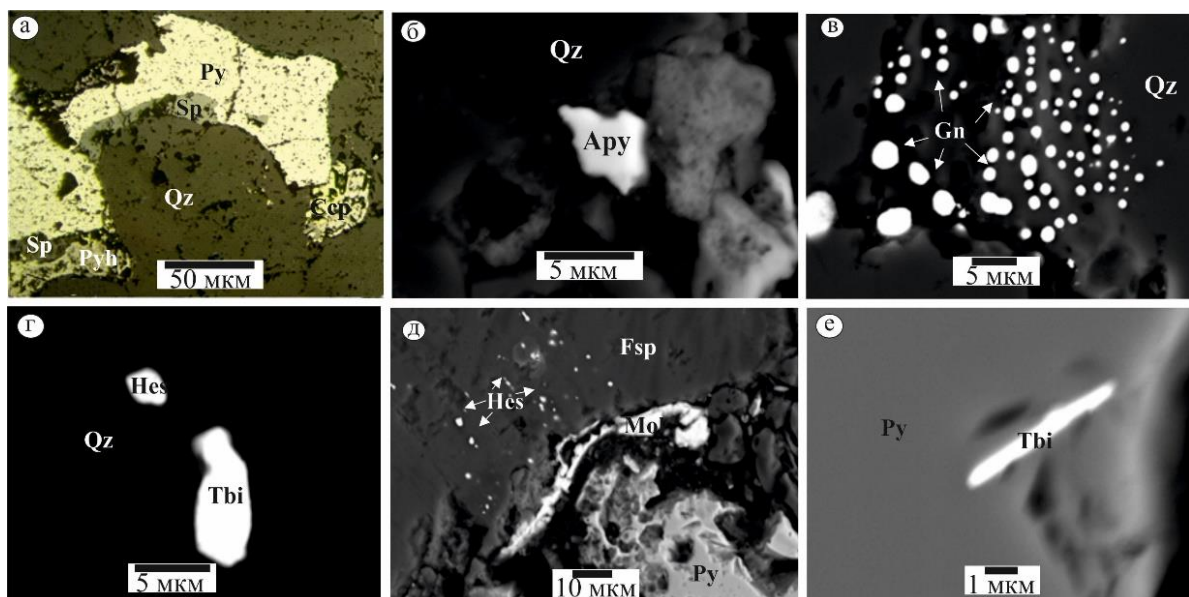


Рисунок 3 – Минеральный состав руд Хаптасыннахской рудной зоны:

а – основные рудные минералы в кварцевой матрице: пирит, пирротин, сфалерит, халькопирит; б – арсенопирит в кварце; в – вкрапленность галенита в кварце; г – микрозерна гессита и теллуровисмутита в кварце; д – прожилковидное выделение молибденита, окаймляющее пирит и рой весьма мелких зерен гессита в калиевом полево шпате; е – теллуровисмутит в пирите; обозначения минералов: Au – самородное золото, Py – пирит, Pyh – пирротин, Sp – сфалерит, Csp – халькопирит, Apy – арсенопирит, Hes – гессит, Gn – галенит, Tbi – теллуровисмутит, Mol – молибденит, Qz – кварц, Fsp – калиевый полевой шпат; Pl – плагиоклаз.

Из протолокчек штучных проб сульфидизированных мелко-среднезернистых биотитовых лейкократовых гнейсов было извлечено видимое рудное золото. Главнейшим породообразующим минералом золотоносных пород является калиевый полевой шпат. Плагиоклаз слабо серицитизирован. Количественно-минеральный и химический анализы позволили определить, что эта порода представляет собой метасоматически измененный высококалийевый гнейс. Всего извлечено 12 золотин размером <0,1 мм, которые представлены пластинчатой и палочковидной морфологией (рисунок 4, г-е). Их поверхность мелкоямчато-бугорчатая, «рыхлая», с мелкими сростками кварца и калиевого полевого шпата, а также примазками переменного (Na, K, Ca, Fe) алюмосиликатного состава. Золото имеет среднюю и высокую пробность.

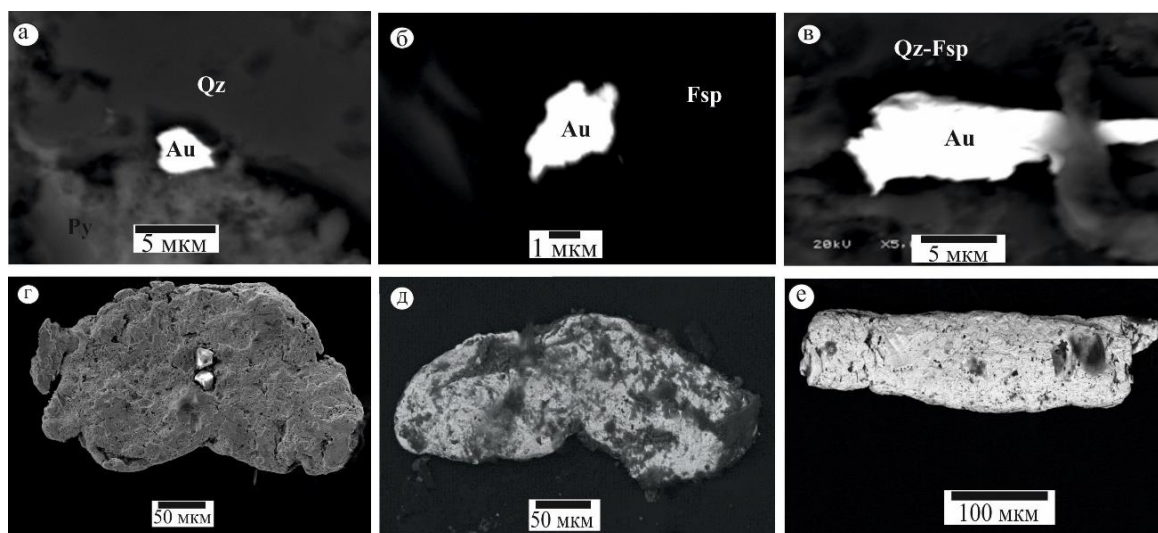


Рисунок 4 – Самородное золото, обнаруженное в аншлифах (а-в) и в протолокчках сульфидизированных пород (г-е); обозначения минералов: Au – самородное золото, Py – пирит, Qz – кварц, Fsp – калиевый полевой шпат.

Таким образом, по результатам исследования можно констатировать следующее. По морфологическим особенностям выделяются пластинчатые, комковидные, палочковидные, угловато-комковидные, удлиненно-комковидные и очень редко идиоморфные кристаллообразные индивиды. Последние четыре морфотипа слабоокатаны. Поверхность их слабообработанная, ямчато-бугорчатая и кавернозная. Наблюдаются реликты включений кварца, калиевого полевого шпата и примазки Fe-Ti содержащей алюмосиликатной массы переменного состава. Очевидно, что это свидетельствует о близости коренного источника. Изученные сульфидизированные породы Хаптасыннахской рудной зоны характеризуются метасоматически измененными (калишпатизированными) метаморфическими породами (в основном гнейсами). Текстура руд вкрапленная, преимущественно полосчатая, отмечается приуроченность рудных минералов к темноцветным минералам. Установлены весьма разнообразные рудные минеральные формы. Главным рудным минералом является пирит. Широко распространены теллуриды, среди которых преобладают образования Ag и Bi. Самородное золото, выявленное в аншлифах, имеет микронную размерность (< 5 мкм). Вместе

с тем, в протолочках обнаружено более крупное рудное золото фракции <0,1 мм средней и высокой пробы.

Сравнительный анализ минеральных включений в россыпном золоте и состава минерализации Хаптасыннахской рудной зоны позволяет утверждать, что рудные проявления зоны являются коренными источниками изученного золота. Обнаружение относительно крупного золота в реч. Левый Улахан Хаптасыннаах, дренирующей золотоносные породы, свидетельствует, что указанный водоток перемывает на каком-то интервале (относительное превышение от истоков до приустьевой части речки составляют примерно 120 м) оруденение с более крупным золотом, чем изученное нами в руде в настоящее время.

3. Краткие выводы:

- определены индикаторные типоморфные признаки золота россыпи реч. Левый Улахан Хаптасыннаах, характерные для металла ближнего сноса;
- установлено, что коренными источниками россыпного золота являются метасоматически измененные (калишпатизированные) гнейсы Хаптасыннахской рудной зоны.
- в относительно глубоких горизонтах рудной зоны прогнозируется обнаружение более крупного золота, чем выявленное на этом этапе исследований, о чем свидетельствует присутствие в россыпи золота размером >0.5 мм до 40%;
- вышеизложенное определяет положительные перспективы дальнейшего изучения золотоносности Хаптасыннахской рудной зоны.

4. Благодарности

Работа выполнена по государственному заданию ИГАБМ СО РАН и частично в рамках хоздоговорных работ с АО «Алмазы Анабара».

5. Литература:

- [1] Kuznetsov A.A. Geological-forecast-mineragenic model and prospects for industrial ore content of the Anabar shield // Domestic Geology. – 2008. – No. 6. – P. -22-34.
- [2] Molchanov A.V., Knyazev V.Yu., Khudoley A.K. Tectonofluidite zones of the Anabar shield and their ore potential // Regional geology and metallogeny. – 2011. – No. 47. – P. 96–106.
- [3] Rabkin M.I. Geology and petrology of the Anabar crystalline shield. // Tr. NIIGA. – 1952. – Т. 87. – 164 p.
- [4] Smelov A.P., Amuzinsky V.A., Zedgenizov A.N., Berezkin V.I., Koval S.G. Prospects for the primary gold content of metamorphic and igneous complexes of the Anabar Shield // Zoloto Sibir i Dal'nego Vostoka. – Ulan-Ude. – 2004. – P. 279–281.
- [5] Smelov A.P., Kotov A.B., Salnikova E.B., Kovach V.P., Berezkin V.I., Kravchenko A.A., Dobretsov V.N., Velikoslavinsky S.D., Yakovleva S.Z. Age and duration of formation of the Billakh zone of tectonic melange, Anabar shield // Petrology. – 2012. – Т. 20. – No. 3. – P. 315–330.
- [6] Tolstov A.V. Prospects for gold content of the Anabar anteklise // Bulletin of the State Committee for Geology. – 2002. – No. 1(2). – pp. 44-49.

БИОМОРФНЫЕ СТРУКТУРЫ МОНАЦИТОВ И СУЛЬФИДОВ ЖЕЛЕЗА В КУЛАРИТАХ КУЛАРСКОГО ХРЕБТА (РЕСПУБЛИКА САХА (ЯКУТИЯ))

Сергей Жмодик¹, Алексей Розанов², Елена Лазарева¹, Петр Иванов³, Дмитрий Белянин¹, Николай Карманов¹, Виктор Пономарчук¹, Багай Сарыг-оол¹, Татьяна Мороз¹

1 ФГБУН «Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева»,
630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3

2 ФГБУН «Институт биологии развития им. Н.К. Кольцова РАН»,
119334, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 26

3 ООО «Арктик Капитал», 677018, Россия, г. Якутск, ул. Чернышевского, 6

BIOMORPHIC STRUCTURES IN KULARITE OF THE KULAR RIDGE (REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA))

Sergey Zhmodik¹, Alexey Rozanov², Elena Lazareva¹, Petr Ivanov³, Dmitry Belyanin¹, Nikolay Karmanov¹, Victor Ponomarchuk¹, Bagai Saryg-ool¹, Tatyana Moroz¹

1 Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3, Akademika Koptuyga ave.,
Novosibirsk, 630090, Russia

2 Koltzov Institute of Developmental Biology of Russian Academy of Sciences, 26, Vavilova str.,
Moscow, 119334, Russia

3 Arctic Capital LLC, 6, Chernyshevskogo str., Yakutsk, 677018, Russia

Abstract. In kularites (nodular monazites - NM) from alluvial deposits of the Urasalakh, Konechny and Kristall streams of the kular ridge (Republic of Sakha (Yakutia)) biomorphic structures lithified by REE phosphate (monazite) were found, represented by cyanobacteria, distributed in the form of peculiar “stromatolite-like” microstructures. In addition, framboidal iron sulfides (mackinawite pyrite, greigite) were identified in monazites of kularites. The isotopic composition of organic carbon in NM corresponds to the biogenic one – $\delta^{13}\text{C}$ from -22.2 ‰ to -22.3 ‰.

1. Введение

Монацит ($\text{REE}(\text{PO}_4)$) широко распространённый минерал, представляющий главный источник редкоземельных элементов (REE) для современной промышленности, формирование которого происходит в различных процессах: магматических, метаморфических, гидротермальных, диагенетических [1]. Кроме того, монацит активно используется в качестве минерала-индикатора при определении условий и времени формирования редкоземельного оруденения. Особое внимание многих исследователей уделяется нодулярному монациту (НМ), называемому также куларитом, authigenic или nodular grey monazite, black pelletlike monazite и т.д., впервые обнаруженному и описанному более века назад [2], по причине необычности его нахождения, чаще всего, в виде микро-конкреций в углеродистых осадочных породах (сланцах, алевролитах и др.) различного возраста (от протерозоя по мезозой), а также в аллювиальных отложениях, в виде образований эллипсоидной, реже шарообразной формы, состоящих из тонкозернистого «агрегата» монацита, кварца, полевых шпатов (плагиоклазов и КПШ), слюд и других минералов. До настоящего времени условия и механизм формирования НМ во многом непонятен. В России за НМ, обнаруженным в промышленно значимых количествах в россыпях Куларского хребта, закрепилось название «куларит» [3].

В распоряжении авторов имелась коллекция, представленная 12 пробами (от 1 до 100 г) НМ (куларита) разных гранулометрических фракций (от 0.2 до более 0.5 мм), полученных при отработке Au-россыпей аллювиальных отложений ручьёв Урасалах, Конечный и Кристалл бассейна р. Яна, расположенных в Улахан-Сисском рудном районе северной части Куларского хребта (Республика Саха (Якутия)). В плотике россыпей вскрываются отложения туогучанской свиты пермского возраста, представленные углеродистыми кварц-серицит-хлоритовыми,

кварц-серицитовыми алевролитами, алевросланцами и аргиллитами, иногда с примесью псаммитового материала. Характерной особенностью этих отложений является: повышенное содержание органического углерода; практически постоянное присутствие пирита в виде неправильной формы зерен, микро-конкреций, столбчатых поликристаллических образований, скоплений фрамбоидального пирита (ФП) и идиоморфных кубических кристаллов часто в кварцевой оторочке; присутствие мелких линзовидных стяжений фосфатов редких земель (куларита) [4].

2. Методы исследований

Предварительно фракции НМ из аллювиальных отложений руч. Урасалах, Конечный и Кристалл изучались под бинокляром Stemi 305 и в цементированных эпоксидной смолой полированных препаратах на микроскопе AxioScope.A1 (Zeiss). Фазовый состав и структурное состояние минералов НМ определены методами порошковой рентгеновской дифрактометрии (ПРД) (ДРОН-8, излучение $\text{CuK}\alpha$) и колебательной спектроскопии: инфракрасной (ИК; VERTEX 70 FT IR) и комбинационного рассеяния света (КР; Horiba Jobin Yvon LabRAM HR800). Валовые составы 8 проб концентратов НМ и стандартного образца ОСО 250-91 (НФС-23, руда редкоземельная, ВИМС, Россия) анализировали методом ИСП-АЭС на спектрометре iCAP Pro XP Duo (Thermo Scientific, США) в ЦКП «МЭИИИ» СО РАН после сплавления с Na_2O_2 . Достигнута хорошая сходимость определённых и аттестованных значений ОСО 250-91. Морфология и состав зерен куларита исследованы на СЭМ MIRA 3 LMU (Tescan Orsay Holding), с временем набора спектра при количественном определении состава минералов от 20 до 270 с (пределы обнаружения 0.06 – 0.5 мас. %; погрешность определения – 2–6 отн. %, не превышала 10 отн. %). Построения карт распределения элементов проведено в режиме «True map» в течение нескольких часов. Изотопный состав $\delta^{13}\text{C}$ НМ определен на масс-спектрометре Finnigan MAT 253 с приставкой Flash EA 1112; данные приведены относительно стандарта V-PDB с точностью определения $\delta^{13}\text{C} \pm 0.1\%$.

3. Результаты исследований

Морфология зерен куларита многообразна с преобладанием обломков вытянутой и изометричной формы с неровными краями, эллипсовидных и шаровидных образований (рис. 1, а также [5]). Цвет зерен НМ изменчив – от черного до желтовато-бурых оттенков; поверхность имеет неровный микро-бугристый вид. По данным СЭМ, ПРД, ИК и КР спектроскопии зерна НМ состоят из монацита с многочисленными, разного размера (от первых до 10-20 микрон) включениями минералов (рис. 1-2): кварца, калиевых полевых шпатов, альбита, мусковита, биотита, карбонатов (кальцита, доломита, сидерита), углеродистого вещества (УВ), магнетита, ильменита, рутила, флоренсита, гойяцита, апатита, сульфидов (пирита, галенита, сфалерита, халькопирита), редко, ксенотима, цеолита, колумбита, киновари – общее количество которых варьирует от 30 до 60 об.%. По данным ИК рабдофан не обнаружен. В срезах эллипсовидных и шаровидных зерен НМ проявляется очень слабая концентрическая зональность, выраженная в некотором уменьшении зернистости в краевой части нодулей относительно центральной зоны, а также концентрической ориентированности зерен микровключений. Но, зональность в распределении REE, чаще всего, ярко выражена и проявляется возрастанием содержаний La и Ce в краевой части нодулей, а в центральной – Nd, Sm, Eu, Gd.

Валовые составы 8 проб концентратов НМ, свидетельствуют об их обогащении легкими редкоземельными элементами (LREE), прежде всего Ce, Nd и La и хорошо сопоставляются с распределением REE в НМ Среднего Тимана [6].

В составе нодулей выделяются участки, сложенные монацитом различной морфологии (рис. 1, 2): микроучастки угловатой или округлой формы однородного строения; неоднородный монацит, цементирующий нодули, с включениями кварца округлой, амёбообразной формы, от <1 до $n \cdot 10$ мкм; «строматолитоподобные» микропостройки пористого монацита. В центре каждого монацитового «бублика» располагается изометричное или неправильной формы зерно

кварца с неровными, часто зазубренными краями (рис. 1, 2а), редко - флоренсита (рис. 2а). Составы и соотношения REE в различных морфологических типах монацита различны.

3. Обсуждение результатов

Несмотря на значительное распространение углеродистых отложений (черных сланцев, алевролитов и др.), формирование которых происходило в различные геологические периоды и в различных геодинамических обстановках, нодулярные монациты (НМ), связанные с ними, встречаются не повсеместно, хотя количество находок НМ в Мире достаточно велико [1, 5 и др.]. Этот факт свидетельствует о том, что для формирования НМ необходимо сочетание нескольких факторов и благоприятных условий, среди которых главными являются: обстановки образования осадков с органическим веществом, обеспечивающим возникновение и сохранность металлоносных углеродистых отложений; наличие источников, поставляющих в область осадконакопления REE в мобильной форме (прежде всего в виде коллоидов). Нахождение REE в виде эндогенного монацита, ксенотима, циркона, не может рассматриваться в качестве источника REE для формирования НМ, по причине механической и химической устойчивости этих минералов в низкотемпературных условиях седиментогенеза, что проявляется в их концентрировании в россыпях в слабоизменённом виде.

Важным результатом проведенного исследования является обнаружение «бактериоморфных» («строматолитоподобных») микроструктур (рис. 1, 2), представляющих литифицированные фосфатом REE (монацитом) остатки нитчатых и коккоидных микроорганизмов, обнаруживающих сходство с современными бентосными цианобактериями. Цианобактерии обычно выступают в качестве преобладающего организма бактериальных матов, развивающихся также в прибрежно-морской обстановке [7]. Подобные биоморфные образования, замещенные монацитом, ранее были обнаружены в рудах Томторского месторождения [8-10]. Характер распределения и соотношения REE (обогащение LREE), отсутствие или слабое проявление Ce-аномалии и положительная Eu-аномалия отмечаются как в НМ Куларского хребта, так и в уникально богатых рудах участков Буранный и Южный Томторского месторождения. Ранее было сделано предположение, что источником REE для формирования НМ в углеродистых отложениях Куларского хребта могли быть породы и руды массива Томтор [5]. Палеорекострукции свидетельствуют о том, что в конце палеозоя на севере Сибирской платформы была развита речная система р. Палео-Хатанга, имевшая субширотное простирание с течением в восточном направлении [11], зоной питания которой являлись, в том числе, массивы томторского типа. В речную систему REE могли поступать в виде коллоидных частиц фосфатов REE, в результате размыва высокодисперсных руд (количество фракции <2 мкм достигает 60%) верхнего, наиболее богатого REE, рудного горизонта месторождений, в том числе Томторского, в которых преобладают монацит, флоренсит, голяцит, крандаллит, черчит, рабдофан [9].

Отложение и концентрирование REE происходило в прибрежно-морской обстановке дельты р. Палео-Хатанга в зоне смены окислительных условий на восстановительные. Об этом свидетельствуют углеродистые отложения, представленные алевро-песчаниками и алевро-пелитами туогучанской свиты пермского возраста, в которых фиксируются фосфаты REE нодулярной формы и ФП [4].

В НМ, обнаружены фрамбоидальные сульфиды железа, которые в одних случаях имеют морфологию, в полной мере соответствующую цистам цианобактерий (рис. 2б), а по соотношению Fe/S (в ф.е. – 0.49-0.51; в % – 0.87-0.88) являются пиритом. В тоже время, в монацитах встречаются фрамбоиды сложного строения (рис. 2в), морфология которых аналогична биогенному фрамбоидальному сульфиду железа [12]. По соотношению Fe/S (в ф.е. – 0.87-1.21; в % – 1.49-1.52) и данным КР сульфиды железа в фрамбоидальных постройках соответствуют маккинавиту (FeS_{1-x}) и грейгиту (Fe_3S_4). Известно, что формирование фрамбоидов сульфидов железа происходит в определенной последовательности: маккинавит – метастабильный грейгит – пирит, вблизи окислительно-восстановительной границы, которая

«отделяет» более глубокие «сульфидные» воды от поверхностных, насыщенных кислородом поровых вод [12]. Обнаружение в НМ фрамбоидов, состоящих из маккинавита, грейгита и пирита свидетельствует об активной деятельности бактериальных сообществ в процессе образования осадков вблизи границы изменения окислительных условий на восстановительные. Сохранность выявленных спороподобных или прازیнофитных образований в НМ позволяет предполагать, что эти формы после литификации фосфатом REE находились в слабом потоке жидкости. Такие условия существуют в дельтах крупных рек, где формируются тонкопесчаные и алевро-пелитовые осадки с высоким содержанием органического вещества (ОВ), в частности, в отгороженных прибрежных водоемах типа лиманов, лагун, стариц или реликтовых озер, а также в обстановке застойных котловин с сероводородным заражением в западинах рельефа, что реставрируется для углеродистых отложений верхнепермского возраста дельты Палео-Хатанги и туогучанской свиты [4, 11].

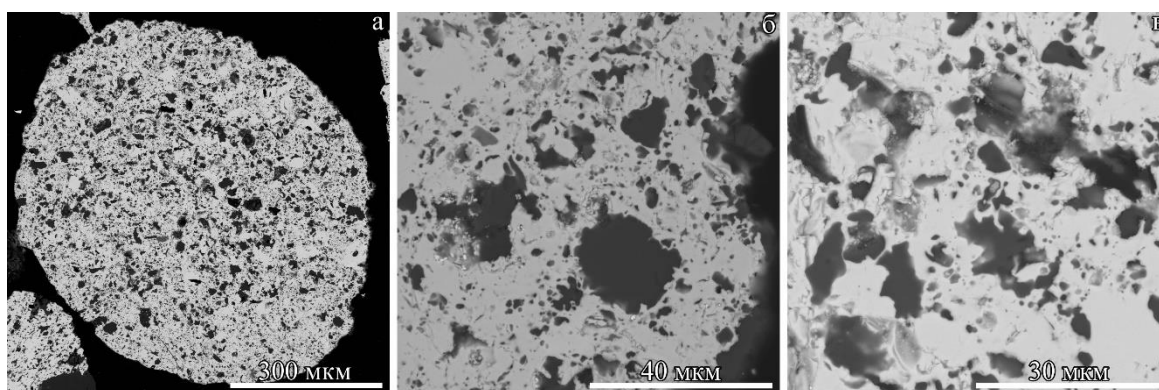


Рисунок 1 – Снимки СЭМ зерна куларита с бактериоморфными («стромалитоподобными») микроструктурами с различной степенью детализации (а, б, в) (руч. Кристалл). Белое – монацит; чёрное – кварц; серое – флоренсит и гётит.

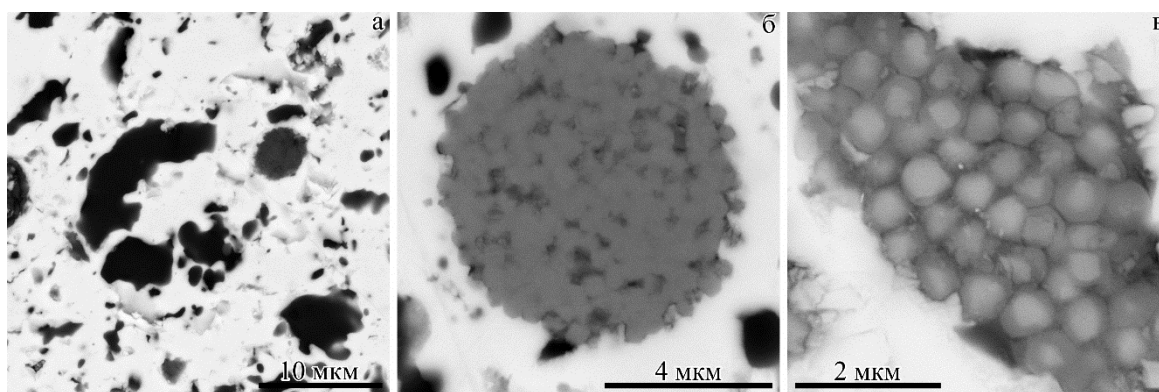


Рисунок 2 – Снимки СЭМ зерна куларита с бактериоморфной («стромалитоподобной») микроструктурой (а) с фрамбоидальными пиритом (б) и маккинавитом (в) в монаците.

На рисунке 2в – микрокристаллы маккинавита окружены пленкой органического вещества.

Белое – монацит; чёрное – кварц; серое – пирит.

Изотопный состав органического углерода, определенный в НМ соответствует биогенному – $\delta^{13}\text{C}$ от -22.2 ‰ до -22.3 ‰.

Важная роль бактерий выявлена при концентрировании P, Fe, Mn в процессах седиментогенеза. В экспериментах показано, что наземные и водные цианобактерии активно адсорбируют REE из разбавленных растворов. Преобладающим механизмом биосорбции REE цианобактериями является ионный обмен, при котором катионы Na, K, Mg и Ca замещаются REE [13 и др.].

3. Выводы

Таким образом в НМ из аллювиальных отложений руч. Урасалах, Конечный, Кристалл (Куларский хребет, Республика Саха (Якутия)) выявлены биоморфные литифицированные фосфатом REE (монацитом) микроорганизмы, представленные цианобактериями, в виде своеобразных «строматолитоподобных» микропостроек. Об участии микроорганизмов в формировании НМ также свидетельствуют находки фрамбоидальных сульфидов железа: маккинавита, грейгита и пирита, расположенных в сотовой структуре углеродсодержащего вещества в монацитах. Составы и соотношения REE в монацитах из различных зон зерен НМ варьируют в широких пределах, что может быть связано с диагенетическими и метаморфическими преобразованиями НМ, что требует дополнительных исследований. Характерной особенностью в распределении REE в монацитах, является слабая положительная Се-аномалия и более значительная Eu-аномалия. Похожие характеристики выявлены и в монацитовых рудах Томторского Nb-REE-месторождения. Наиболее вероятным источником REE являлись высокодисперсные руды томторского типа с наноразмерными монацитом, флоренситом, ксенотимом, которые переносились в речном потоке в виде коллоида в область осадкообразования. Полученные результаты позволяют говорить о формировании НМ с участием микроорганизмов, которые выступали в качестве концентраторов REE, в процессе образования осадков с органическим веществом, в обстановке дельты относительно крупной реки Палео-Хатанги.

4. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект №23-63-10017.

5. Литература:

- [1] Zi J.-W., Muhling J.R., Rasmussen B. Geochemistry of low-temperature (<350°C) metamorphic and hydrothermal monazite // *Earth-Science Reviews*, 2024, v. 249, N 104668.
- [2] Zemel V.K. Analysis of monazites from gold placers of Aldan and South Yenisei // *Journal of Applied Chemistry*, 1936, v. IX, № 11, p. 1969-1971. (translated from English).
- [3] Nekrasov I.Ya., Nekrasova R.A. Kularite – an authigenic variety of monazite // *Dokl. Academy of Sciences of the USSR*, 1983, v. 283, № 3, pp. 688–693. (translated from English).
- [4] Fedyanin A. N., Solovyov M. N. State Geol Map of Russia 1:200 000. Yana-Indigirka series. Sheet R-53-IX, X. M.: Moscow branch of the Federal State Budgetary Inst. VSEGEI, 2016, 106 p. (translated from English).
- [5] Lazareva E.V., Zhmodik S.M., Prokopiev A.V., Karmanov N.S., Sergeenko A.I. Nodular monazite from placers in the Kular Ridge (Arctic Siberia, Russia): composition and age // *Russian Geology and Geophysics*, 2018, v. 59, pp. 1330–1347.
- [6] Skublov S.G., Krasotkina A.O., Makeev A.B., Thomsen T.B., Serre S.H., Abdrakhmanov I.A. Geochemistry of rare elements (LA-ICP-MS) in monazite from the Ichetyu ore occurrence, Middle Timan // *Pr. Fersman Sci. session Geological Institute KSC RAS*, 2018, v. 15, pp. 338-341. (translated from English).
- [7] Bauld J. Microbial mats: stromatolites. N.Y., 1981, pp.38-59.
- [8] Zhmur S.I., Kravchenko S.M., Rozanov A.Yu., Zhegallo E.A. On the genesis of REE-Nb-ores of Tomtor (north of the Siberian platform) // *DAN*, 1994, v. 336, № 3, pp. 372-375. (translated from English).
- [9] Lazareva E.V., Zhmodik S.M., Dobretsov N.L., Tolstov A.V., Shcherbov B.L., Karmanov N.S., Gerasimov E.Yu., Bryanskaya A.V. Main minerals of abnormally high-grade ores of the Tomtor deposit (Arctic Siberia) // *Russian Geology and Geophysics*, 2015, v. 56, № 6, pp. 844–873.
- [10] Dobretsov N. L., Zhmodik S. M., Lazareva E. V., Bryanskaya A. V., Ponomarchuk V. A., Sarygool B. Yu., Kirichenko I. S., Tolstov A. V., Karmanov N. S. Structural and Morphological Features of the Participation of Microorganisms in the Formation of Nb–REE–Rich Ores of the Tomtor Field (Russia) // *Doklady Earth Sciences*. 2021, v. 496, part 2, pp. 135–138.

- [11] Ershova V.B., Khudoley A.K., Prokopiev A.V., Tuchkova M.I., Fedorov P.V., Kazakova G.G., Shishlov S.B., O'Sullivan P. Trans-Siberian Permian rivers: A key to understanding Arctic sedimentary provenance // *Tectonophysics*, 2016, v. 691, pp. 220—233.
- [12] Schieber J. Iron Sulfide Formation // *Encyclopedia of Geobiology*, Springer Dordrecht, 2012, pp. 486–502.
- [13] Paper M., Koch M., Jung P., Lakatos M., Nilges T., Brück T.B. Rare earths stick to rare cyanobacteria: Future potential for bioremediation and recovery of rare earth elements // *Front. Bioeng. Biotechnol.*, 2023, v.11:1130939.

САМОРОДНОЕ ЗОЛОТО ИЗ РОССЫПЕЙ ЭВОТИНСКОГО РУДНО-РОССЫПНОГО РАЙОНА И МЕСТОРОЖДЕНИЯ им. П. ПИНИГИНА (АЛДАНО-СТАНОВОЙ ЩИТ)

Анатолий Журавлев, Александр Округин, Евгений Лоскутов,
Алексей Иванов, Александр Кравченко, Мичил Иванов
ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

NATIVE GOLD FROM PLACER OCCURENCES OF THE EVOTA ORE-PLACER BEARING REGION AND P.PINIGIN DEPOSIT (ALDAN-STANOVOY SHIELD)

Anatolii Zhuravlev, Alexandr Okrugin, Evgeny Loskutov,
Alexey Ivanov, Alexandr Kravchenko, Michil Ivanov
Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. The mineralogical and geochemical features of native gold from the P. Pinigin deposit, as well as placer occurrences of the Evotinsky ore-placer bearing region (EOR), are considered. Native gold at the P. Pinigin deposit is represented mainly by cementation and interstitial forms, with small amounts of fissure and hemmidiomorphic particles. Maldonite, lellingite, iron and bismuth oxides are identified as inclusion minerals. Some gold particles have a porous-cellular structure and are similar to those considered in the deposits of the gold-rare metal formation of the Yana-Kolyma ore-gold bearing belt. Similar porous gold in association with bismuth oxides was found in placer occurrences of EOR. Admixture element content data confirm assumption that very high fineness gold in placer occurrences of EOR have a genetic connection with primary sources similar to the P. Pinigin deposit.

1. Введение

Наиболее крупным золоторудным районом Алдано-Становго щита является Центрально-Алданский рудный район (ЦАРР). Южнее ЦАРР расположен Эвотинский рудно-россыпной район (ЭРР), который относится к одной из перспективных площадей на выявление различных типов золотоносных руд [1]. В последние годы авторами проведены топоминералогические исследования самородного золота из рудных и россыпных объектов ЭРР с целью поиска коренных источников многочисленных золотоносных россыпей [2,3]. В данном сообщении приводятся новые данные по минералого-геохимическим особенностям самородного золота месторождения им. П. Пинигина, которые подтверждают высказанное ранее предположение о генетической связи золота некоторых россыпных объектов с рассмотренной минерализацией [4].

2. Минералого-геохимические особенности самородного золота Эвотинского рудно-россыпного района.

В процессе работы было изучено четыре шлиховые пробы с самородным золотом из делювиальных развалов на месторождении им. П. Пинигина. Золото представлено частицами рудного облика размерами от 0,1 до 0,55 мм. Преобладают цементационные и интерстициальные формы, в подчиненном количестве отмечаются трещинные и гемидиоморфные. Некоторые частицы имеют пористо-ячеистое строение, кратко были описаны ранее [4], и представлены тонким сростанием весьма высокопробного золота с оксидами висмута (рис. 1, а). Единичные знаки представлены самородным золотом в оболочке мальдонита.

По данным микрозондового анализа пробность самородного золота варьирует в достаточно узком диапазоне от 908 до 1000‰, элементы примеси в единичных зернах - Cu и Hg до 0,53% и 0,22% соответственно, что в целом согласуется с ранее опубликованными данными [5]. Минеральные включения представлены – леллингитом, мальдонитом, оксидами железа и висмута.

Самородное золото со схожим пористым строением известно в ряде месторождений и описано [6–8] и др. В работах [6,8] подобное пористо-ветвистое золото в сростании с оксидами висмута рассмотрено на месторождениях золото-редкометалльной формации Яно-Колымского золоторудного пояса и по их мнению сформировано в результате гипогенного разложения висмутовых минералов и мальдонита. По нашему мнению, на месторождении им. П. Пинигина не исключается схожий генезис пористо-ячеистого золота.

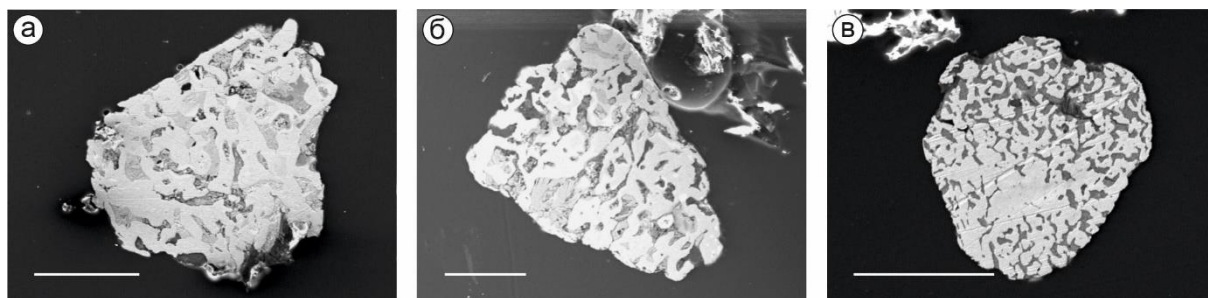


Рисунок 1 – Микрофотография пористо-ячеистых выделения самородного золота Эвотинского рудно-россыпного района. а – месторождение им. П. Пинигина, б – ручей Еловый, в – россыпной объект Ягодный. Светло-серое – весьма высокопробное самородное золото, темно-серое – оксиды висмута. Масштабная полоса - 0,1мм.

Ранее нами отмечалось присутствие золота с аналогичными текстурными особенностями в одном из россыпепроявлений ЭРР [4]. По новым данным подобные агрегаты установлены еще в двух россыпных проявлениях района – руч. Еловый и объекте Ягодный (рис. 1, б, в). Аналогично месторождению им. П. Пинигина они представлены пористо-ячеистыми агрегатами, состоящими из весьма высокопробного золота и оксидов висмута. Для определения связи данного золота с оруденением месторождения им. П. Пинигина дополнительно было проведено изучение элементов примесей в самородном золоте методом LA-ICP-MS. Рядом авторов метод используется для прогнозирования коренных источников россыпей [9,10] и др. Весьма высокопробное золото россыпных проявлений схоже по набору элементов примесей – Cu, V и их концентрациям с золотом месторождения им. П. Пинигина.

3. Выводы

Проведенные исследования позволяют сформулировать предварительные выводы. Пористо-ячеистые агрегаты самородного золота на месторождения им. П. Пинигина схожи с рассмотренными на месторождениях золото-редкометалльного типа Яно-Колымского золоторудного пояса, однако для выявления процессов их формирования требуются дополнительные минералогические исследования. Данные по содержанию элементов-примесей полученные методом LA-ICP-MS подтверждают высказанное ранее предположение, что для золота весьма высокой пробности в россыпепроявлениях ЭРР прослеживается генетическая связь с коренными источниками, близкими месторождению им. П. Пинигина.

4. Благодарности

Исследования выполнены в рамках Государственного задания ИГАБМ СО РАН.

5. Литература:

- [1] Molchanov, A.V., Terekhov, A.V., Shatov, V.V., Petrov, O.V., Kukushkin, K.A., Kozlov, D.S. and Shatova, N.V. Gold-ore bearing regions and clusters of the Aldan-Stanovoy metallogenic province // *Regional Geology and Metallogeny*, 2017, № 71, pp. 93–111.
- [2] Okrugin, A.V., Zhuravlev, A.I. and Mokhnachevsky, G.V. Mineralogic, geochemical and morphological features of placer gold in the South-Eastern part of the Siberian platform // *Otechestvennaya geologia*, 2013, № 5, pp. 19–27.
- [3] Zhuravlev, A.I., Okrugin, A.V., Ivanov, M.S., Ivanov, E.E. and Kravchenko, A.A. Dispersed gold-ore mineralization in the rocks of the Medvedev massif and the possibility of forming placer-forming gold with it (Aldan Shield) // *Geology and mineral-raw material resources of North-East of Russia: proceedings of the XII All-Russian scientific and practical conference*. Yakutsk: Publishing house of NEFU named after. M.K. Ammosov, 2022, pp. 178–183.
- [4] Zhuravlev, A.I., Nikiforova, Z.S., Kravchenko, A.A., Ivanov, A.I., Ivanov, E.E. and Ivanov, M.S. Mineralogical and geochemical features of native gold from placers of the Evotinsky gold-bearing region (Southern Yakutia) // *Baikal youth scientific conference on geology and geophysics: proceedings of the VI All-Russian youth scientific conference dedicated to the memory of academician N.L. Dobretsov*. Ulan-Ude: Publishing house BSC SB RAS, 2021, pp. 49–51.
- [5] Kravchenko, A.A., Smelov, A.P., Berezkin, V.I. and Popov N.V. Geology and genesis of Precambrian gold-bearing metabasites of the central part of the Aldan-Stanovoy shield (on the example of the P. Pinigin deposit). Yakutsk: RIC Offset LLC, 2010, 148 pp.
- [6] Gamyanin, G.N., Goncharov, V.I. and Goryachev, N.A. Gold-rare metal deposits of the North-East of Russia // *Tikhookeanskaya Geologia*, 1998, № 17, pp. 94–103
- [7] Kalinin, A.A., Savchenko, Y.E. and Selivanova, E.A. Mustard Gold in the Oleninskoe Gold Deposit, Kolmozero–Voronya Greenstone Belt, Kola Peninsula, Russia // *Minerals*, 2019, vol. 9, № 786, pp.1-14.
- [8] Litvinenko, I.S. and Solomentseva, L.A. Maldonite in the Gold-rare metal occurrences of the Myakit-Khurchansky ore-placer bearing cluster (North-East of Russia) // *Vestnik DVO RAN*, 2015, pp. 68–78.
- [9] Ehser, A., Borg, G., de Oliveira, D.P.S., Rosa, D.R.N. and Salgueiro, R. Characterization of Placer Gold Deposits from Central Portugal: Preliminary Results // *Let's talk ore deposits: proceedings of the 11th SGA Biennial Meeting, Antofagasta*, 2011, pp. 814–816.
- [10] Omang, B.O., Suh, C.E., Lehmann, B., Vishiti, A., Chombong, N.N., Fon, A.N., Egbe, J.A. and Shemang, E.M. Microchemical Signature of Alluvial Gold from Two Contrasting Terrains in Cameroon // *J. African Earth Sci*, 2015, vol. 112, pp. 1–14.

ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА ОСНОВНОЙ МАССЫ КИМБЕРЛИТОВ ЯКУТИИ

Николай Зинчук^{1,2}, Мария Зинчук²

1 Вилуйская ГРЭ АК «АЛРОСА» (ПАО), 678174, Россия, г. Мирный, ул. Вилуйская, 7б

2 Западно-Якутский научный центр АН РС(Я), Россия, г. Мирный, ул. Тихонова, 5, стр.1

FEATURE COMPOSITION OF THE BASIC MASS OF KIMBERLITES YAKUTIYA

Nikolay Zinchuk^{1,2}, Mariya Zinchuk²

1 Vilyiskay GRE AK «ALROSA» (PAO), 7B, Vilyuyskaya str., Mirny, 678174, Russia

2 West-Yakutian Scientific Centre of the Republic Sakha (Yakutia) Academy of Sciences,
5, Tihonova str., Mirny, 678174, Russia

Abstract. Kimberlite pipes, dykes, veins and sills quite often represent the rocks which were altered to various degree by postmagmatic and hypergene processes. Generated at this new formations are referred to secondary minerals, which are main rock-forming components, composing the basic mass of rocks. Distinction of kimberlite bodies is conditioned by intensity of development and evenness of distribution of dominating secondary minerals, their associations and varieties (calcite, dolomite, lizardite, chrysotile, phlogopite, chlorite, pyroaurite and others). It has been established that processes of serpentinization, carbonatization, chloritization and brucitization in each diatreme have individual character, leading to diversity of kimberlite types.

Key words: Siberian platform, diamondiferous regions, structural-formation zones.

1. Введение

Кимберлитовым породам из диатрем Сибирской (СП), Восточно-Европейской (ВЕП), Южно-Африканской (ЮАП) и других древних платформ Мира характерна изменчивость параметров их вещественного состава [1-6]. Высокий градиент изменчивости вещественных признаков в объеме кимберлитовых тел во многом связан с полигенностью и гетерохронностью самих слагающих трубки пород, охватывающих диапазон условий образования от верхней мантии (через пневматолитово-гидротермальную стадию) до гипергенеза. Происходящие в трубчатых диатремах процессы изменения кимберлитов с некоторой долей условности можно отнести [7-10] к диафторезу, под которым обычно понимают [11-13] регрессивное минералогическое преобразование, происходящее в процессе приспособления магматических и метаморфических пород к новым условиям более низких ступеней метаморфизма. Определяющим фактором диафтореза является масса поступающих в систему минералообразования извне H_2O и CO_2 в процессе регрессивного метаморфизма. Этим условиям соответствуют особенности постмагматического преобразования кимберлитовых пород. Сложность и контрастность минералогического облика кимберлитовых пород в значительной степени обусловлены развитием комплекса вторичных минералов, слагающих иногда до 95 % пород, превращая их в апокимберлиты.

2. Исходные данные и методы исследований

При изучении кимберлитов главное внимание исследователями уделяется реликтовым структурам и текстурам исходной породы, по которым построены практически все классификации кимберлитовых пород, рассмотренные нами раньше. Основное внимание обычно придается изучению псевдоморфоз, их форме и расположению в породе. Незаслуженно малая роль отводится исследованию цементирующей массы этих уникальных природных магматитов. В кимберлитовых породах, в которых сохранилось реликтовое строение, цементирующая масса в основном представлена: а) субмикроскопическим серпентином; б)

пелитоморфным карбонатом; в) стекловатым веществом. Считается, что и серпентин цемента представляет собой апостекло, хотя в свежем виде в кимберлитах оно никем и никогда не описывалось. Стекло не обнаружено и в обломочном материале этих пород. К постмагматическим преобразованиям кимберлитов обычно относятся изменения магматических пород в пневматолито-гидротермальную стадию метаморфизма. Верхней температурной границей обычно указывается 600°C, т.е. температура, при которой от магматического расплава отщепляется флюид, а нижней можно считать температуру кипения воды, хотя некоторые минералы возникают и при более низких температурах. Наряду с автометаморфическими процессами, которые протекают в обстановке, близкой к изохимической, в кимберлитовых телах распространен метасоматоз (автометасоматоз). Под новообразованиями кимберлитов мы понимаем все минералы, сформировавшиеся из термальных растворов, под которыми подразумеваются не только постмагматические ювенильные, но и образовавшиеся как в период формирования трубки, так и на более поздних этапах её становления, в том числе и в гипергенных условиях. Химические анализы кимберлитов, кроме выяснения петрохимических особенностей пород, нами использовались для пересчетов на минеральный состав по разработанной методике [14-17]. Для использования этого метода важным является параллельное изучение этих же проб с помощью рентгенодифрактометрического метода, дающего фазовый перечень присутствующих в породах минералов.

3. Результаты исследований и их обсуждение

Кимберлитовые трубки, дайки, жилы и силлы в большинстве случаев представляют собой породы в различной степени измененные постмагматическими и гипергенными процессами [3-5]. Образовавшиеся при этом новообразования относятся к вторичным минералам, главным породообразующим компонентам, слагающим основную массу пород [1, 2, 7]. Облик кимберлитов в диатремах определяется развитием комплекса вторичных минералов, возникших после консолидации породы в результате эндо- и экзогенных преобразований. Предшествующими исследованиями обнаружено многообразие процессов вторичной минерализации и возникающих при этом новообразований. К основным результатам этих исследований можно отнести определение: а) диагностических признаков исследуемых минералов- новообразований; б) наиболее распространенных их ассоциаций; в) факторов, влияющих на постмагматические преобразования кимберлитов; г) роли вторичных минералов на решение прикладных задач (совершенствование прогнозно-поисковых критериев при поисках алмазов и влияние их на технологические процессы переработки пород). Новые сведения о процессах вторичного минералообразования полученные нами [3-7] в результате изучения разрабатываемых коренных месторождений алмазов (трубки Мир, Интернациональная, Дачная, имени 23-го съезда КПСС в Малоботуобинском; Удачная, Айхал, Сытыканская, Юбилейная – в Далдыно-Алаkitском; Нюрбинская и Ботуобинская в Средне-Мархинском алмазоносных районах) по отдельным горизонтам изучения керна эксплуатационных скважин, пройденным по сетке 40мх40м. Особенности распределения новообразований на разведанную глубину месторождений изучались по керновому материалу из колонковых скважин, вскрывших нижние горизонты диатрем. Для сравнения изучались также кимберлитовые породы из других диатрем СП, ВЕП и ЮАП. В результате были получены сведения о том, что исследованные кимберлиты претерпели в процессе становления диатрем неоднократные изменения. Их интенсивность на разных стадиях формирования трубок имеет индивидуальный характер и зависит от конкретных условий минералообразования. К настоящему времени в кимберлитовых породах древних платформ Мира идентифицировано и комплексно изучено с помощью современных методов исследований [3-5] более 60 минералов-новообразований, входящих в классы оксидов и гидроксидов, сульфидов, силикатов и алюмосиликатов, боратов, фосфатов, карбонатов и хлоридов. Недостаточно изученным направлением в познании закономерностей преобразования кимберлитовых пород оставалось

установление роли конкретных вторичных минералов, реконструкции последовательности их образования и устойчивости в различных условиях. С целью решения этих вопросов проведены детальные комплексные исследования вещественного состава и процессов вторичного минералообразования на каменном материале из кимберлитовых диатрем Мирнинского (МКП), Далдынского (ДКП), Алакит-Мархинского (АМКП) и Накынского (НКП) кимберлитовых полей СП. Это позволило получить новые данные о типоморфных особенностях всех идентифицированных вторичных минералов кимберлитов, входящих в основную массу этих образований. Важной при этом была задача разработки и адаптации рационального комплекса методов и приёмов изучения вещественного состава кимберлитов, позволяющая получить количественную характеристику по содержанию вторичных минералов в основной массе пород [5-7]. Выполненные исследования позволили в определенной степени восполнить недостаточность сведений по изучению кимберлитовых пород в целом, так как все петрографические построения обычно проводятся для первичных минералов и магматических образований, не затронутых (или слабо затронутых) процессами вторичного преобразования. Нашими исследованиями показана значительная степень постмагматического и гипергенного преобразования кимберлитовых пород, которые из-за обилия вторичных минералов (до 95%) являются апокимберлитами [8]. Апокимберлитовая порода, в которой отмечается более половины серпентина, относится нами к апокимберлитовому серпентиниту и содержит также много других (в основном вторичных) минералов, форму и расположение которых следует учитывать при её определении и названии. Обычно более десяти процентов таких измененных пород сложена карбонатами (из ксенолитов и новообразованных), а также такими минералами, как халцедон, брусит и др. [9-11] Поэтому к ним должны применяться соответствующие названия пород и структур. Сложность определения вторичных структур апокимберлитовых пород заключается в том, что в связи с наложением различных процессов в исследуемой природе имеет место совмещение нескольких поколений структур. Это затрудняет их определение и делает его более механическим и приходится усложнять классификацию, что в целом нежелательно. Наибольшим изменениям в апокимберлитах подвержена основная масса пород, в которой доминируют серпентин, кальцит и слюдистые образования. Геолого-минералогическое значение таких исследований обусловлено особенностями слоистой структуры, которая отражает физико-химические условия их образования. Эти минералы являются главными компонентами серпентинизации, хлоритизации и карбонатизации – основных процессов постмагматических преобразований кимберлитовых пород, которые развиваются в каждой диатреме индивидуально, что вызвано различиями процессов привноса-выноса основных породообразующих оксидов. Отмеченная неравномерность распределения вторичных минералов в диатремах объясняются [12] спецификой псевдоморфного замещения минералов. Закономерные изменения обычно связаны с выветриванием или влиянием на состав кимберлитов вмещающих диатрему пород. При *серпентинизации* кимберлитов наблюдается псевдоморфное и непсевдоморфное замещение слагающих их минералов. Минералы группы серпентина образуются: а) по основной массе пород; б) в результате метасоматических преобразований оливина I и II генераций, пироксенов и ксенолитов терригенно-карбонатных пород; в) за счет гидротермально-метасоматических процессов. В отличие от этого, серпентин основной массы кимберлитов отмечается в двух модификациях: интерсертальной (заполняющей промежутки между зернами кальцита и других минералов) и псевдоморфной (замещающей карбонаты и другие минералы основной массы). Наблюдаемые карбонат-серпентиновые псевдоморфозы по оливину формируются при замещении сначала серпентином, по которому затем развивается карбонат. Непсевдоморфный серпентин может возникать при повторной переработке кимберлитовых пород. В результате неоднократно проявляющихся процессов преобразования кимберлитов (на что указывают, например, многочисленные морфологические типы скаленоэдров кальцита) происходит полная смена первичных ассоциаций вторичными с образованием нового комплекса минералов. В кимберлитах установлены такие разновидности серпентина, как лизардит и хризотил, кристаллизующиеся в

разных физико-химических условиях. Некоторые разновидности относятся к шестислойному униту. В кимберлитах зафиксирована также такая разновидность серпентиновых минералов, как Al-серпентин (септохлорит), характер распределения которого требует дополнительных комплексных структурных исследований. В результате *карбонатизации* кимберлитов возникают такие распространенные минералы, как кальцит, доломит, арагонит и пироаурит [13-15]. Кристаллизация широко распространенного в кимберлитах *кальцита* связана с различными формированиями диатрем. По способу образования кальцит разделяется на: а) слагающий вместо с серпентином и другими новообразованиями, основную массу пород; б) метасоматический как продукт карбонатизации некоторых минералов кимберлитов; в) поздний гидротермальный, выполняющий пустотно-трещинные образования. В целом кальцит относится к полигенным минералам кимберлитов, всестороннее исследование которых очень важно с теоретических и прикладных аспектов на разных этапах становления породы. В числе открытых или дискуссионных остаются вопросы об устойчивости и равновесности минерального состава кальцит содержащих ассоциаций. Требуется дополнительных исследований и уточнений вопрос о том, является ли они закономерным продуктом кристаллизации той или иной стадии кимберлитообразования или представляют собой случайные неравновесные ассоциации нескольких постмагматических стадий этого процесса [16]. *Доломит* в кимберлитовых породах СП образует мелкозернистые агрегаты и ассоциирует с кальцитом и серпентином. Катализатором его образования в кимберлитах является присутствие различных солей и сульфатов. *Арагонит* встречающийся в виде различных выделений в жилах и прожилках, в основной массе отмечен в качестве незначительной примеси. *Пироаурит* развивается в основной массе кимберлитов, в псевдоморфозах по оливину, в ксенолитах различных пород, а также в прожилковых выделениях. Нередко (особенно в диатремах Малоботубинского и Далдыно-Алакитского алмазоносных районах) пироаурит является [17] характерным минералом основной массы кимберлитовых пород, образуя с другими породообразующими компонентами (серпентином, кальцитом и др.) отдельные блоки голубоватой окраски.

В кимберлитовых породах *флогопит* относится к одному из наиболее распространенных минералов, где он представлен в основном позднемагматической и постмагматической генерациями. В большинстве изученных диатрем флогопит является довольно постоянным минералом, большая часть которого в основной массе хлоритизирована, что происходило в условиях слабого водообмена и восстановительной среды с избытком Mg^{2+} . Отмечены случаи обогащения железистой слюдой контактов с карбонатными ксенолитами, что позволило высказать предположение о развитии постмагматического флогопита не повсеместно, а лишь в породах, обогащенных алюминием и калием, которые чаще распространены в периферийных зонах кимберлитовых провинций. Средние содержания флогопита изменяются от 0% (трубки Деймос и Долгожданная) до 20% (трубка Нюрбинская), а у хлоритов – от 1% (трубка Интернациональная) до 10% (трубка Фестивальная). Однако наиболее равномерно флогопит распределен в основной массе трубок МКП (Мир и Интернациональная), НКП (Ботубинская и Нюрбинская), АМКП (Айхал и Юбилейная) и ДКП (Удачная) полей. Неоднородность распределения флогопита и хлорита свойственна большинству кимберлитовых тел Верхне-Мунского и Далдынского полей, из которых трубки Зарница и Долгожданная выделяются слабым развитием как флогопита, так и продуктов его изменения - хлорита. Наиболее хлоритизированы кимберлитовые породы трубок Ботубинская, Нюрбинская, Фестивальная, Сытыканская, Деймос и др. Исходя из числа образовавшихся в основной массе слюдистых образований и их средних содержаний, можно утверждать, что не менее половины флогопитов, входящих в состав основной массы кимберлитов Накынского поля (трубки Нюрбинская, Ботубинская и тело Майское) хлоритизированы. Для большинства трубок АМКП, ДКП и ВМКП свойственна обильная хлоритизация слюд, которая наиболее интенсивно протекала в трубках Сытыканская, Фестивальная и Деймос, в результате чего произошла трансформация слюд в хлорит. Такие минералы, как тальк, амакинит, кварц, гипс, галит, ангидрит, барит и др.

не имеют устойчивых тенденций к распространению в основной массе кимберлитов различных трубок и полей. Исключением является *брусит*, интенсивное проявление которого отмечено в диатремах ДКП (Удачная) и ВМКП (Новинка и Поисковая). В кимберлитовых трубках брусит возникает при серпентинизации породы и при воздействии гидротермально-метасоматических растворов на заключительных этапах постмагматической переработки кимберлитов. К минералам, часто встречающимся в небольшом количестве в кимберлитах относится тальк, возникающий при небольшом парциальном давлении CO_2 во флюиде при определенных значениях $\text{MgO}:\text{CaO}:\text{SiO}_2$. Наиболее интенсивные процессы формирования талька отмечены нами в трубке Нюрбинская [14-16].

Характер и интенсивность развития вторичных минералов в основной массе кимберлитовых пород СП показывает [4-6] разнообразие процессов карбонатизации и хлоритизации, но не раскрывают всех особенностей их, связанных с образованием серпентинов и флогопитов. Последние относятся к индикаторным минералам кимберлитов (ИМК), имеющим слоистую структуру, способную отражать условия их образования, и позволяющая использовать их для анализа постмагматического преобразования кимберлитовых пород. Поскольку полуколичественных характеристик содержания компонентов в породе недостаточно для выявления индивидуальных черт различных месторождений, важным становится установление структурных особенностей минералов (серпентинов, слюдистых образований и др.) основной массы кимберлитов. Это позволяет также выявлять не отмечаемые ранее структурные характеристики этих минералов, связанные или с их структурно-морфологическими или видовыми особенностями. Так, серпентиновые минералы в кимберлитах представлены в основном лизардитом, хризотилом и Al-серпентином (септохлоритом). Признано, что серпентинизация оливина происходит при температурах не выше 500°C даже при высоких давлениях. При этом, лизардит образуется при температуре $400-500^\circ\text{C}$, а хризотил – при более низких температурах. Большое значение на течение этого процесса имеет рН-условий среды. Проведенными экспериментальными исследованиями процессов серпентинизации установлено, что в кислой среде большая часть оливина замещается лизардитом, в кремне содержащей щелочной – антигоритом и хризотилом, в нейтральной – лизардитом и хризотилом. Судя по этим и другим минералам, для кимберлитов отмечается закономерное изменение среды метасоматизирующих растворов от кислой через нейтральную до щелочной. Различные кимберлитовые поля СП различаются по содержанию отдельных разновидностей серпентинов. Так, наиболее часто Al-серпентин встречается в трубках ДКП, постепенно снижаясь в диатремах в направлении от ВМКП, МКП, НКП до АМКП. Наибольшие концентрации минерала отмечены в кимберлитах трубок Зарница и Фестивальная, где он диагностирован в 70% изученных проб. На примере трубок Ботуобинская, Нюрбинская, Заполярная и Айхал выявлена тенденция к последовательному увеличению количества проб, содержащих Al-серпентин при переходе от порфировых кимберлитов к автолитовым кимберлитовым брекчиям и далее к кимберлитовым туфобрекчиям. Однако в отдельных диатремах один и те же типы пород, относящиеся к разным диатремам, могут существенно различаться по степени распространения Al-серпентина. Многократная смена рН-условий среды в период становления кимберлитов является основной причиной развития дефектов в структуре серпентинов. Количество серпентинов с низкой, средней и высокой степенью дефектности может в определенной мере характеризовать уровень стабильности постмагматических преобразований кимберлитов. Наиболее часто дефектные серпентины встречаются в основной массе кимберлитов трубок Айхал (АМКП) и Нюрбинская (НКП). Эти месторождения подобны по степени распространения Al-серпентина, но существенно отличаются по уровню развития лизардита и хризотила. В основной массе кимберлитов трубки Айхал преобладает хризотил, а в диатреме Нюрбинская более развит лизардит.

Для получения более полных сведений о составе основной массы пород в кимберлитах различных глубин проведено сравнение прожилковой минерализации и преобладающих вторичных минералов основной массы этих же разрезов. Четкой закономерности в

распределении вторичных по разрезу глубоких горизонтов трубки Мир не установлено, хотя нередко вместо исчезнувших новообразований появляются другие. Однако можно сделать некоторые выводы: а) гипс установлен только в верхней части диатремы (до глубины 625 м); б) целестин также приурочен к верхней части разреза (интервал 615-660 м); в) ассоциирует с целестином ограниченный кальцит; г) в ассоциации с галитом обычно находится ангидрит и реже гипс; д) сульфиды железа иногда встречаются совместно с гипсом; ж) пирроаурит прослеживается на всю глубину описываемого разреза и ассоциирует с гидроксидами железа, замещающими его. Судя по другим скважинам, галит в трубке Мир резко преобладает над иными вторичными минералами, причем отмечен изменчив состав его ассоциаций. Так, если в разрезе скв.50 с галитом встречаются гидроксиды железа и ангидрит, то в разрезе, вскрытом скв.62 развит только галит. В этих скважинах нами не обнаружен пирроаурит. В отличие от этого, в скв.52 вместе с галитом встречены сульфиды железа и пирроаурит. Отмечены существенные количественные колебания в составе основных породообразующих новообразований. Анализ проб из разреза, вскрытого скв. М-55, показал, что CaSO_4 (до 15 %) присутствует в кимберлитовых породах верхней части разреза (глубины 380-430 м), значительно уменьшаясь в его нижней части (глубины 440-540 м), где его концентрация меняется в пределах 3-11 %. Содержание кальцита колеблется от 2 до 28 %. Четкой закономерности в его распределении не наблюдается. Отмечается только приуроченность его максимальных содержаний к низам разреза (500-520 м). Концентрация серпентина здесь более значительна, обычно составляя порядка 50-60 % состава кимберлитовой породы. Только в нижних частях его концентрация снижается до 35 %.

4. Заключение

Обобщая результаты комплексного изучения новообразований на глубину некоторых трубок, можно отметить, что вторичные минералы ведут себя по-разному. В одних случаях (трубка Удачная) пока не установлены четкие закономерности смены ассоциаций как породообразующих компонентов, так и минералов-примесей. Установлена неравномерность серпентинизации оливина, связанная в основном с чередованием в разрезах блоков пород с различной трещиноватостью. Это привело к слабому замещению реликтовых минералов в одних блоках и более интенсивной их серпентинизации – в других. Образование блоков плотных кимберлитов нередко связано с процессами наложенной карбонатизации пород. В других случаях (трубки Сытыканская, Мир и др.) установлены закономерности в распределении как породообразующих новообразований основной массы пород, так и прожилковой гидротермальной минерализации. Это позволяет использовать отмеченные закономерности в распределении минералов-новообразований для типизации кимберлитовых пород. Несмотря на неравномерное в целом распределение ряда вторичных минералов (как по литорали, так и по вертикали трубок), намечаются некоторые закономерности в их размещении, т.е. возникает возможность выделения определенных зон. Эта зональность возникла в результате постмагматического преобразования исходных пород и является продуктом минералообразующих процессов, которые могли быть не синхронны по времени и протекали в различных физико-химических условиях, вследствие чего более поздние этапы вторичного минералообразования наложились на проявления более ранних. Доступная для исследований часть кимберлитовых диатрем СП претерпели в процессе своего формирования неоднократные изменения. В зависимости от конкретных условий минералообразования закономерности распределения вторичных минералов на различных стадиях формирования трубок были разными и определялись несколькими факторами, главными среди которых являются: геологическое строение кимберлитовых тел, состав кимберлитов и вмещающих их пород, гидродинамические и климатические условия районов развития кимберлитового магматизма и степень проникновения глубинных эманаций. В результате комплексного изучения основной массы каждой кимберлитовой диатремы наблюдается доминирование индивидуального характера развития минералов над их общими свойствами, главными среди которых является

преобладание серпентин-кальцитовых, кальцит-серпентиновых, хлорит-серпентиновых ассоциаций и уровень распространения Mg-Fe-разновидностей флогопита в основной массе кимберлитовых пород. Отличие кимберлитовых тел обусловлено интенсивностью развития и равномерностью распределения доминирующих вторичных минералов и их разновидностей (кальцита, доломита, пироаурита, флогопита, хлорита, лизардита и хризотила). Существуют отличия в составе основной массы и вторичных минералов кимберлитов не только в разных трубках, но и в плане их отдельных тел и даже блоков. Охарактеризованы наиболее распространенные в кимберлитовых породах ассоциации новообразований, состоящие из двух и более минералов, большинство из которых являются парагенетическими, что позволило решить некоторые вопросы их постмагматического преобразования. Обширный материал минералого-петрологических исследований кимберлитовых пород позволил установить, что процессы серпентинизации, карбонатизации, хлоритизации и бруситизации в каждой диатреме имеют индивидуальный характер. Важными результатами проведенных исследований являются рекомендации по возможностям использования вторичных минералов кимберлитов для определения величины эрозионного среза диатрем. Предложены также различные варианты использования основных закономерностей выветривания силикатных пород, свойств глинистых минералов, типоморфных особенностей слюдистых минералов в древних корях выветривания на образованиях различного генезиса и состава. Полученные новые данные о типоморфных особенностях флогопита и продуктов его твердофазовых превращений (хлорита) имеют важное значение для совершенствования методики прогнозирования и поисков алмазных месторождений.

5. Литература:

- [1] Hitrov V.G., Zinchuk N.N., Kotelnikov D.D. Application of cluster-analysis for clearing out regularities of various composition rocks weathering // DAN USSR. 1987. V 296. No 5. pp. 1228-1233.
- [2] Grachanov S.A., Zinchuk N.N., Sobolev N.V. The age of Predictable primary diamond sources in the Northeastern Siberian Platform // Doklady Earth Sciences. 2015. N.465. №-2. pp.1297-1301.
- [3] Serov I.V., Garanin V.K., Zinchuk N.N., Rotman A.Ya. Mantle Sources of the kimberlite Volcanism of the Siberian Platform // Petrology. 2001. T.9. №-6. pp.576-588.
- [4] Afanasiev V.P., Zinchuk N.N., Koptil V.I. Polygenes of diamonds in connection with the problem of primary placers of the north-east of the Siberian platform. 1998. T.361. №-3. pp.366-369.
- [5] Afanasiev V.P., Zinchuk N.N., Loginova A.N. Distribution features of placer diamonds associated with the Precambrian source // Zapiski Rusko mineralogicheskogo ob-va. 2009. T.138. №-2. pp.1-13.
- [6] Zinchuk N.N., Melnik Yu.M., Serenko V.P. Apokimberlite rocks // Geology and geophysics. 1987. №-10. pp.66-72.
- [7] Kotelnikov D.D., Zinchuk N.N. Typomorphic features and paleogeographic significance of mica minerals // Izvestiya VUZov. Geologiya and razvedka. 1996. №-1. pp.53-61.
- [8] Vasilenko V.B., Kuznetsova L.G., Zinchuk N.N. On the Correlation between the Compositions of mantle Inclusions and Petrochemical Varieties of kimberlites in Yakutian Diatremes // Petrology. 2001. T.9. №-6. pp.576-588.
- [9] Zinchuk N.N., Zuev V.M., Koptil V.I., Cherny S.D. Diamond management strategy and results // Gornyy vestnik. 1997. №-3. pp.53-57.
- [10] Zinchuk N.N., Koptil V.I., Boris E.I., Lipashova A.N. Typomorphism of diamonds from placers of the Siberian platform as the basis for prospecting of diamond deposits // Ores and metals. 1999. № 3. pp. 18-30. (In Russian).
- [11] Zinchuk N.N., Savko A.D., Krainov A.V. Kimberlites in the Earth history. Proceedings of VSU geological SRI. Tutorials. Is. 68 - Voronezh: VSU, 2013, 99 p. (In Russian).
- [12] Kotelnikov D.D., Dombrovskaya Dz.V., Zinchuk N.N. Basic laws of weathering of silicate rocks of various chemical and mineralogical types // Litologiya and polesny iskopaemi. 1995. №-6. pp.594-601. (In Russian).

- [13] Savko A.D., Sheverev L.D., Zinchuk N.N. Epochs of powerful crust formation in the history of the Earth.-Voronezh. VGU. 1999. 102 p. (In Russian).
- [14] Charkiv A.D., Zuenko V.V., Zinchuk N.N., Krutchkov A.I., Uchanov A.V., Bogatich M.M. Petrochimiya of kimberlite. M.: Nedra. 1991. 304 p. (In Russian).
- [15] Zinchuk N.N. Features of calcite from kimberlite rocks // Vestnik Voronegskogo un-ta. Geologiya. 2023. №-2. pp.28-43. (In Russian).
- [16] Matsuk S.S., Zinchuk N.N. Optical Spectroscopy of minerals of the upper mantle.M.: Nedra. 2001.428 p. (In Russian).
- [17] Egorov K.N., Zinchuk N.N., Mishenin S.G., Serov V.P., Sekerin A.P., Galenko V. {., Denisenko E.P., Baryshev A.S., Men'shagin Y.V., Koshkarev D.A. Perspectives of primary and placer diamondiferousness of so-western part of the Siberian Platform // Collection: Geological aspects of the mineral resource base of the Joint Stock Company "ALROSA": current state, prospects, solution. Additional materials based on the results of the regional scientific and practical conference "Actual problems of the geological industry of AK "ALROSA" and scientific and methodological support of their solutions dedicated to the 35-th anniversary of YANIGP TsNIGRI AK "ALROSA". Mirny: MGT.-2003.-pp.50-84.

О ПОИСКОВОЙ РОЛИ ПЕРВИЧНЫХ МИНЕРАЛОВ КИМБЕРЛИТОВ

Николай Зинчук^{1,2}

1 Вилуйская ГРЭ АК «АЛРОСА» (ПАО), 678174, Россия, г. Мирный, ул. Вилуйская, 7б

2 Западно-Якутский научный центр АН РС(Я), Россия, г. Мирный, ул. Тихонова, 5, стр.1

ABOUT SCSEARCH ROLLE OF KIMBERLITE PRIMARY MINERALS

Nikolay Zinchuk^{1,2}

1 Vilyiskay GRE AK "ALROSA" (PAO), 7B, Vilyuyskaya str., Mirny, 678174, Russia

2 West-Yakutian Scientific Centre of the Republic Sakha (Yakutia) Academy of Sciences,

5, Tihonova str., Mirny, 678174, Russia

Abstract. Brief information is provided on the results of research of diamonds and other primary minerals of kimberlites (pyrope, chrome-diopside, chrome-spinellid, clinopyroxene, picroilmenite and chromite) from diatremes of the Siberian diamondiferous province (SDP), which allowed defining of their typomorphic features. Distinguishing of four types of diamonds' primary sources (crystals from rich kimberlite bodies and with poor diamondiferousness, of unknown genesis and impact genesis) enabled working out criteria of regional and local zoning of perspective territories where primary and placer productivity were discovered. The obtained data allowed dividing SDP into four sub-provinces: Central-Siberian (central part of the platform) with prevalence of type I primary source; Lena-Anabar (north-east of the region) with prevalence of type III primary sources of unknown genesis; Tungussskaya sub-province (south-west of the platform) with rounded diamonds; Aldan sub-province (south-east of SDP) with finds of individual rounded diamonds.

Key words: kimberlites, pipes, diamondiferous region, typomorphism of minerals, diamonds.

1. Введение

Существует огромное количество методов изучения минералов, в том числе и индикаторных минералов кимберлитов (ИМК), которые можно объединить в ограниченное количество групп: физиографические; определения химического состава минералов (включая геохимические и определения микропримесей); физические и структурные [1-5]. Для создания корректной статистической базы термодинамических реконструкций комплексно исследованы породообразующие и акцессорные минералы мантийных ассоциаций кимберлитовых полей Сибирской платформы (СП).

2. Результаты исследований и их обсуждение

В выборках гранатов анализировались *пиропы* из перидотитовых парагенезисов и пироп-альмандиновые гранаты эклогитовых парагенезисов, реже альмандины, которые отнесены к глубинным ассоциациям на основании находок алмазов в парагенезисах с гранатом такого типа в трубках СП. Крупные пиропы более богаты TiO_2 и соответствуют пироксенитовым ассоциациям или перекристаллизованным импрегнированным расплавом перидотитам [6-9]. Помимо обычных прогнозных оценок алмазности кимберлитов по пиропам на диаграмме $Cr_2O_3 - CaO$, полезны также определения уровней концентрации расплавов, поскольку прогрев, сопровождающий внедрение расплавов, может способствовать росту алмазов хорошего качества. Целесообразно рассматривать особенности составов гранатов по соотношению оксидов хрома и кальция из различных полей и трубок с общим анализом тенденций распространения их основных парагенезисов. В составах гранатов из трубок Далдынского поля (ДКП) проявляется тренд $Cr_2O_3 - CaO$ в пределах лерцолитового поля, который для трубки Зарница обнаруживает дискретный характер с разрывом в интервале 8-9% Cr_2O_3 . Гранаты

пироксенитовых ассоциаций (с повышенной долей CaO , TiO_2 и Na_2O) слагают существенную долю концентратов и образуют прерывистые линии смешения с перидотитовыми парагенезисами, отвечающие иногда зональности в пределах образца. Гранаты из кимберлитов трубки Удачная отличаются тем, что тренд их составов трассирует границу с гарцбургитовым полем, доля пироксенитовых гранатов значительна, но они не столь контрастно отличаются по составу от перидотитовых, отражая процессы кимберлитобразования, что может быть вызвано «сглаживанием» границ за счет метасоматической проработки мантийной литосферы под трубкой. Составы гранатов из кимберлитовых трубок Алакит-Мархинского поля (АМКП) обычно образуют протяженный тренд в пределах лерцолитового поля, субкальциевые гранаты появляются в массовых количествах, начиная с 6% Cr_2O_3 [10-13]. В трубке Сытыканская хромистые гранаты менее обогащены кальцием, что вместе с содержанием TiO_2 и Na_2O может свидетельствовать об их пироксенитовом источнике из гранат-шпинелевой фации мантии. Гранаты из трубки Комсомольская отличаются обогащением TiO_2 на уровне гранат-шпинелевого перехода и глубже. Субкальциевые гранаты характерны для глубинных минеральных парагенезисов трубки Юбилейная, при тенденции обогащения TiO_2 на уровне гранатовой и гранат-шпинелевой фаций верхней мантии. Наиболее богаты субкальциевыми гранатами кимберлиты трубки Айхал. В составах гранатов из трубок Верхне-Мунского поля (ВМКП) лерцолитовый тренд хорошо выражен лишь до 6,5% Cr_2O_3 , что отмечено в трубке Заполярная. Гранаты из кимберлитовых трубок Накынского поля (НКП), на диаграмме Cr_2O_3 – CaO образуют протяженный лерцолитовый тренд до 10-12% Cr_2O_3 и параллельный ему в области гарцбургитовых составов; дунитовые парагенезисы с очень низкими содержаниями CaO встречаются при содержаниях Cr_2O_3 10-12% в кимберлитах трубки Ботуобинская и редки в трубке Нюрбинская [14-17]. Обоим диатремам свойственны алмазоносные парагенезисы с алмандином (~24-26% FeO), которые составляют нередко более 50% тяжелых минералов. Особого внимания заслуживает *хромдиопсид*, являющийся весьма чутким индикатором условий магмообразования. Он встречается практически во всех трубках, будучи, как и пироп, продуктом дезинтеграции мантийных перидотитов в основном из литосферной части мантии. Его реликты можно обнаружить даже в кимберлитах высокой степени серпентинизации; заметно увеличивается его количество в глубинных частях кимберлитовых трубок, начиная с уровня 600 м и более. Составы хромистых клинопироксенов варьируют в пределах трубок и между отдельными кимберлитовыми полями. Обычно хромистость положительно коррелируется с глубиной образования и степенью метасоматической проработки магматической колонны. Увеличение степени плавления перидотитов приводит к повышению хромистости, если в системе достаточно Na_2O . По составу клинопироксена существует зональность в пределах СП. Наиболее истощенные перидотиты установлены в кимберлитах ДКП, где присутствуют глубинные деформированные перидотиты, в которых образование клинопироксена связано с проработкой глубинными карбонатитовыми расплавами [18-20]. Вариации состава *клинопироксенов* из кимберлитов ДКП показывают, что более железистые (~4% FeO), но малохромистые клинопироксены в кимберлитах, отвечают гранат-шпинелевым и шпинелевым перидотитам. В трубках Долгожданная и Иреляхская глубинные Cr-диопсиды из перидотитов образованы в процессе магматического замещения силикатным железистым расплавом с уменьшением доли Cr_2O_3 и Na_2O . Силикатный расплав менее характерен для процессов алмазообразования, что способствует перекристаллизации при разогреве вблизи контактовых зон. Хромистые пироксены (до 6% Cr_2O_3) близки по составу к космохлору. Не менее пяти групп, выделяемых по уровню содержания Na_2O и Cr_2O_3 , соответствуют слоистости в мантии и отдельным пульсациям метасоматических процессов. Судя по редкой встречаемости перидотитов с характеристиками, близкими к таковым ДКП, процессу метасоматоза подвержена вся мантийная колонна в алмаз-пироповой фации. В трубке Айхал составы пироксенов очень близки к хромдиопсидам из трубки Юбилейная, но они несколько менее щелочные, в них больше разновидностей истощенного типа и железистых составов. Из экспериментальных данных известно о прямой зависимости содержания гейкилитового минала

от давления. Сравнительно малоглубинные ильмениты из метасоматитов в мантийных перидотитах также могут быть магнезиальными – дополнительным показателем принадлежности к мантийным метасоматитам является повышенная хромистость *ильменитов*. Исключением являются многие ксенолиты глиммеритов, особенно с существенно оливиновыми вмещающими породами, повышение содержания хрома в которых часто не наблюдается. Анализ состава ильменита из различных кимберлитовых трубок, специфика распределения концентраций основных компонентов (TiO_2 , MgO , NiO , Al_2O_3 , FeO , Fe_2O_3 , MnO , V_2O_5), а также высокозарядных элементов-примесей – Nb, Ta, Hf, Y и, как правило, REE, являются показателем условий фракционирования кимберлитового расплава в магматических камерах и в продвигающейся колонне кимберлитовых масс в основании литосферы [13-15]. Кроме указанной индикаторной роли минерала в эволюции поднимающихся в земную кору кимберлитовых расплавов, его химизм отражает специфику строения верхней мантии под кимберлитовыми проявлениями, при сходстве составов ильменита отдельно взятых кустов кимберлитовых трубок. Важную роль в определении условий мантийного петрогенезиса, продуцирующего кимберлитовые расплавы, играет *хромит*, тренды которого имеют четко выраженные зависимости от давления, которое коррелирует с хромистостью; выявлена тенденция обогащения хромом в ранних микрофенокристаллах, а Fe и Ti – на более поздних стадиях [1,4]. Примечательно, что включения хромита в алмазах всегда высокохромисты: Cr_2O_3 составляет более 60 мас. %. На диаграммах Cr_2O_3 - Al_2O_3 хромиты обычно обнаруживают четко выраженные обратные зависимости. Наблюдаемые в отдельных случаях отклонения обусловлены, вероятнее всего, вхождением ульвошпинелевого или магнетитового минерала преимущественно к наиболее хромистой части шпинелевых трендов, что связано с близостью к глубинным магматическим источникам в основании литосферных колонн. Однако, в зависимости от окислительных условий, возможны варианты изоморфных замещений. Для *хромшпинелидов* трубки Зарница ДКП наблюдается расщепление тренда составов на обогащенный ульвошпинелевым компонентом и более характерный для рядом расположенной трубки Удачная. При этом тренд составов хромитов из трубки Зарница, как и ильменитов, проявляет дискретный характер, а трубки Удачная - более непрерывный ряд составов, вплоть до 10 мас. % Cr_2O_3 – значений шпинелевой фации. *Шпинелиды* из кимберлитов трубки Юбилейная (как и некоторых других трубок АМКП) также обнаруживают вариации составов. При этом наблюдается характерное расщепление трендов, что может соответствовать слоистости мантийного разреза. Подобный тренд проявлен и для хромшпинелидов из верхней части мантийной колонны. Шпинелиды из трубки Айхал также обнаруживают сходный тренд расщепления, но он менее контрастен, чем в Юбилейной и некоторых других трубках поля. В Малоботуобинском алмазоносном районе (МБАР) кимберлитовые тела (за исключением трубки Интернациональная) отличаются редкой встречаемостью хромшпинелидов [1–2, 6]. Тренд состава хромитов трубки Интернациональная проявляет четкое деление на отдельные интервалы с существенным расщеплением на ветви, но между ветвями в более хромистой глубинной области наблюдаются линии смешения, что могло быть связано с отдельными промежуточными магматическими очагами. Судя по вариациям составов хромитов из трубки Заполярная ВМКП, практически вся перидотитовая колонна верхней мантии подвержена взаимодействию с жильной системой с обогащением и разогревом. Эти же процессы можно предположить по гомогенному тренду составов клинопироксена и данным термобарометрии. Для трубки Нюрбинская НКП тренд обогащения ульвошпинелевым минералом очень крутой и состоит из двух отрезков. В менее глубинной части интервала степень взаимодействия поднимающихся протокимберлитовых масс менее выражена. Возможно на более значительной глубине из этих расплавов вместо ильменита кристаллизовалась ульвошпинель, при достаточно высоких степенях окисления и высоких температурах, чем объясняется отсутствие ильменитовых мегакристаллов в кимберлитах НКП. В целом для каждого типа кимберлитовых пород, слагающих трубки, количество ИМК алмазной ассоциации пропорционально алмазоносности той или иной разновидности кимберлита. Высокоалмазоносные

кимберлитовые тела этой группы характеризуются содержанием не менее 5 % гранатов алмазной ассоциации от общего их числа. Обособляющиеся от них высокоалмазоносные кимберлиты НКП характеризуются [5 - 6] пониженным содержанием гранатов алмазной ассоциации (более чем в два раза). Главная их особенность - преобладание низкохромистых разновидностей, оставляющих не менее 66 % от общего количества, при появлении зерен с $Cr_2O_3 \geq 12$ мас.%. В кимберлитах этого поля, характеризующихся снижением роли первых двух минералов, важное значение принадлежит хромшпинели.

Важным является комплексное изучение *алмаза* – минерала с широким комплексом физико-химических, кристалло-морфологических и других особенностей, отражающих своеобразие термодинамических и геохимических условий его образования, которые могут быть использованы в качестве типоморфных [3-4]. Алмазы из отдельных кимберлитовых тел (а нередко и из различных минералого-петрографических разновидностей кимберлитов в одном из месторождений) довольно существенно отличаются по ряду типоморфных особенностей. Зная свойства алмазов из кимберлитовых тел, можно с большой долей уверенности решить вопрос о коренных источниках изучаемой россыпи или группы россыпей. Современные методы исследования алмазов дают возможность получить большой объем информации об условиях их образования, последующего существования и изменения, что имеет важное значение при прогнозировании, поисках и оценке алмазных месторождений. Из большого спектра этих особенностей наиболее информативными и относительно легко диагностируемыми являются [3]: морфология, фотолюминесценция, распределение оптически активных и водородных центров, электронный парамагнитный резонанс, химический состав твердых включений в алмазах и др. При этом главнейшими из них является определение принадлежности алмазов к определенной минералогической разновидности, что происходит по комплексу взаимосвязанных признаков и свойств. В результате многолетних исследований алмазов из россыпей и кимберлитовых тел СП (Якутия, Красноярский край и Иркутская область) с применением минералогической классификации алмазов, предложенной Ю.Л.Орловым [5], по которой выделяется 11 генетических разновидностей алмазов (с дополнительным разделением кристаллов отдельных разновидностей по габитусу и морфологическим типам кристаллов) нами [3] накоплен громадный фактический материал по типоморфным особенностям алмазов из кимберлитовых тел, современных отложений и разновозрастных вторичных коллекторов СП, что позволяет провести районирование территорий. *Алмазы I разновидности* наиболее распространены в природных объектах. В кимберлитовых месторождениях их выход составляет 80-90% и падает до 50% с ростом размеров кристаллов. В россыпях северо-востока СП их содержание уменьшается. Основной формой кристаллов является октаэдр. По внешней морфологии к этой разновидности относятся плоскогранные октаэдры, часто имеющие слоистость на ребрах. Обычно эти алмазы прозрачные и бесцветные. В разных месторождениях содержание алмазов I разновидности разных габитусных форм и окрашенных индивидов изменяется. Среди них чаще, чем среди алмазов других монокристаллических разновидностей, встречаются обломки и кристаллы со сколами. Среди алмазов I разновидности по своим свойствам выделяются безазотные и полупроводниковые алмазы типов Па и Пв. Для *алмазов разновидности II* характерна кубическая форма роста и их окраска: обычно янтарно-желтая и желто-оранжевая, иногда с зеленоватым оттенком. В отдельных случаях кристаллы в результате эпигенетических процессов имеют кофейно-коричневый или бурый цвет. По физическим свойствам к этой разновидности отнесены также непрозрачные, черные с металлическим блеском алмазы. В процессе растворения кубические кристаллы меняют облик, приобретая кривогранные формы. Алмазы II разновидности в небольших (менее 3%) количествах устанавливаются в некоторых кимберлитовых телах Далдыно-Алакитского алмазоносного района – ДААР (трубки Юбилейная, Удачная, Комсомольская, Иреляхская и др.) и составляют значительную часть (5-50%) в россыпях северо-востока СП, коренные источники которых не установлены. К *алмазам III разновидности* относятся полупрозрачные и непрозрачные кристаллы кубической формы,

которая усложняется развитием других основных граней. Габитус часто искажается вследствие срастания нескольких кристаллов по {100} или образования двойников прорастания. Алмазы этой разновидности окрашены в серый цвет, который может меняться до темно-серого и даже черного. Все градации окраски объясняются тем, что внешние зоны кристалла насыщены микроскопическими включениями и мелкими трещинами. Алмазы III разновидности встречаются только в некоторых месторождениях и россыпях, главным образом, среди крупных разностей кристаллов. *Алмазы IV разновидности* известны давно и описаны в литературе [3 - 4] как алмазы в оболочках. Этим названием подчеркивается, что такие алмазы имеют структурно-различимые части с четкой границей раздела – ядро и оболочку, которые на сколах кристаллов хорошо видны невооруженным глазом. Необходимо отметить повышенное (до 10% и более) содержание алмазов с оболочкой в уникальных по продуктивности кимберлитовых телах НКП (трубки Ботуобинская и Нюрбинская), диатремах Айхал и Юбилейная ДААР, где они несут на себе признаки природного растворения. Обычно ядром алмазов этой разновидности являются бесцветные прозрачные кристаллы с октаэдрическими гранями и со всеми особенностями реальной структуры, присущими I разновидности. Окраска алмазов этой разновидности обусловлена оптическими свойствами оболочек. В зависимости от насыщенности микровключениями оболочки могут быть полупрозрачными и непрозрачными. *Алмазы V разновидности* обычно на СП встречаются в россыпях, где в отдельных случаях их содержание достигает 40-50%, в то время как среди кимберлитовых алмазов они обычно не превышают долей процента. К ним относятся темные, серые, иногда почти черные алмазы, имеющие переходные между октаэдром и ромбододекаэдром формы. Их окраска определяется большим количеством включений (прежде всего графита), находящихся во внешней зоне кристалла в виде хлопьев или точечных образований. Встречаются также сростки из двух-трех кристаллов с общей оболочкой. Центральная часть кристаллов этой разновидности является бесцветной и прозрачной. В целом отмечается резкое отличие алмазов V разновидности из кимберлитовых тел от алмазов той же разновидности из россыпей СП. *Алмазы VI разновидности* (баллас) в России попадались в незначительном количестве только в россыпях, но в виде поликристаллических шаровидных образований характерны для россыпей Бразилии и Южной Африки. Есть сведения о находке балласов и в кимберлитовой трубке Премьер (Африка). К алмазам VII разновидности относятся сростки из нескольких достаточно крупных (до 4-5 мм) кристаллов, которые обычно полупрозрачны вследствие множества включений, внутренних трещин и каналов травления, развитых по трещинам и по границам срастания отдельных кристаллов. Форма их роста – октаэдр, который в результате растворения может принимать додекаэдрический облик. Их значительную часть составляют циклические сложные двойники. Все кристаллы имеют каналы травления («шрамы»). Существуют переходы между алмазами УП и У разновидности, причем часто в сростках отдельные индивиды представлены серыми кристаллами У разновидности. К УП разновидности относятся также сложно деформированные двойники и сростки додекаэдроидов из россыпей северо-востока СП, часто полициклические, близкие по своим особенностям к У разновидности, но почти без включений графита. Комплекс типоморфных особенностей алмазов У+УП разновидностей из указанных россыпей свидетельствует об их принадлежности к одному генетическому типу, происходящему из коренных источников неизвестного типа. *Алмазы разновидности VIII* представляют собой друзоподобные сростки многочисленных хорошо ограненных мелких алмазов одинакового размера (до 1 мм). Кристаллы наружной части сростка представлены октаэдрами, часто со ступенчато-пластинчатым характером развития граней, бесцветными и прозрачными. В центральной части агрегата просматривается темное ядро неправильной формы. Алмазы VIII и IX разновидностей в месторождениях обычно встречаются вместе, иногда достигая в отдельных трубках до 20%. К алмазам IX разновидности относятся поликристаллические сростки в виде кусков неправильной формы, образованных из зерен размером 0,02-0,1 мм, иногда неоднородных по величине и не имеющих кристаллографической огранки. Агрегаты непрозрачны, окрашены в цвета от темно-серого до совершенно черного.

Алмазы разновидности X (карбонадо) известны давно. Они были найдены в россыпях Бразилии, Венесуэлы и Центральной Африки. На СП карбонадо X разновидности практически отсутствуют. Единичные образцы отнесены к этой разновидности только по рентгеноструктурным исследованиям. К алмазам XI разновидности относятся поликристаллические и синтетические алмазы, содержащие в структуре три известные модификации углерода: алмаз, лонсдейлит и графит. Поскольку условия их образования являются следствием динамических нагрузок, сопровождающихся соответствующим разогревом. В природе алмазы разновидности XI встречаются в метеоритных кратерах и метеоритах. В россыпях северо-востока СП обнаружены бесформенные, нередко пластинчатые зерна темно-бурого до стально-серого цвета, своим внешним видом напоминающие шлак. Рентгенографическими исследованиями они определены как карбонадо и с учетом их специфики для них было предложено название «якутит». Аналогичные поликристаллические агрегаты алмаза были встречены и в аллювиальных отложениях Украины [2,8]. Коренными источниками таких зерен являются метеориты и ударно-метаморфизированные породы. В природе в действительности мы видим смесь отдельных разновидностей алмазов. Так, в кимберлитовой трубке Интернациональная в МБАР преобладают бесцветные кристаллы октаэдрического габитуса I разновидности (71%), реже переходного от октаэдрического к ромбододекаэдрическому (23%) при пониженном (меньше 1%) содержании ламинарных ромбододекаэдров. В рядом находящейся в этом же районе кимберлитовой трубке имени XXIII съезда КПСС, характеризующейся в верхней части четко выраженной КВ, также представлены бесцветными, реже эпигенетическим окрашенными в лилово-коричневые цвета алмазами I разновидности. Среди них резко преобладают (до 82%) кристаллы октаэдрического габитуса при невысоком (до 13%) содержании кристаллов переходного от октаэдрического к ромбододекаэдрическому габитусов. В свою очередь, в трубках НКП (трубки Нюрбинская и Ботуобинская) отмечаются бесцветные, реже эпигенетически бледно окрашенные в лилово- и дымчато-коричневые цвета кристаллы I разновидности при повышенной доле (по сравнению с другими месторождениями СП) алмазов IY разновидности с окрашенной в желтовато-зеленые и серые цвета оболочкой. В слабоэродированных диатремах, с развитой в верхней части толщей вулканогенно-осадочных пород, ярким примером которых является самая большая на СП (59 га) кимберлитовая трубка Юбилейная, среди бесцветных прозрачных и полупрозрачных кристаллов почти половину составляют разноцветные, окрашенные в различные цвета. Среди них свыше 30% бледно-дымчато-коричневых, меньше розово-лиловых и лилово-коричневых окрашенных вследствие пластинчатой деформации. Характерно значительное количество индивидов с признаками природного травления (шрамы, матировка, коррозия, каверны и др.), количество которых по месторождению достигает 25% всех алмазов. Таким же разнообразием характеризуется спектр алмазов из россыпей СП [3]. При всем разнообразии алмазов даже в пределах одной СП, по которой сделана применяемая классификация Ю.Л. Орлова [5], представилась возможность выделить [3] четыре типа источников алмазов: I тип первоисточника – кимберлитовый, характерный для богатых кимберлитовых тел фанерозойского возраста, характеризуется резким преобладанием алмазов I разновидности, представленных ламинарными кристаллами октаэдрического, ромбододекаэдрического и переходного между ними габитусов и образующих непрерывный ряд, а также присутствием алмазов с оболочкой IY разновидности, серых кубов III разновидности, поликристаллических агрегатов УШ-1X разновидностей, а в отдельных месторождениях (трубка Юбилейная) равномерно окрашенных в желтый цвет кубоидов II разновидности. II тип первоисточника – алмазы кимберлитового генезиса, характерные для кимберлитовых тел с убогой алмазоносностью и кимберлитовых жил; он выделяется по преобладанию додекаэдров с шагренью и полосами пластической деформации «жильного» типа, типичных округлых алмазов «уральского» («бразильского») типа и присутствию бесцветных кубоидов I разновидности. III тип первоисточника – алмазы невыясненного генезиса, характерные, в основном, для россыпей северо-востока СП, коренные источники которых до настоящего

времени не обнаружены. Кристаллы этих источников представлены графитизированными ромбододекаэдрами У разновидности, сложенными двойниками и сростками додекаэдроидов УП разновидности с легким ($\delta^{13}\text{C}=-23\%$) изотопным составом углерода и равномерно окрашенными кубоидами П разновидности с изотопным составом углерода промежуточного ($\delta^{13}\text{C}=-13,60\%$) состава, образующими ассоциацию «эбеляхского» («нижнеленского») типа. *IУ тип первоисточника* – алмазы взрывных кольцевых структур импактного генезиса, представленные поликристаллами алмаза типа карбонадо с примесью гексагональной модификации углерода – лондейлита (якутит). СП разделена на четыре субпровинции: Центрально-Сибирскую (центральная часть платформы) с преобладанием I типа первоисточника; Лено-Анабарскую (северо-восток платформы) с преобладанием кристаллов III типа первоисточника невыясненного генезиса; Тунгусскую (юго-запад платформы) с преобладанием типичных округлых алмазов уральского (бразильского) типа, источником которых возможно были докембрийские терригенные формации платформы и ее складчатого обрамления; Алданскую (юго-восток платформы) с находкой единичных округлых алмазов.

3. Заключение

Всестороннее исследование алмазов из всех разновозрастных коллекторов и кимберлитовых диатрем позволили выработать систему анализа их типоморфных особенностей и провести, кроме регионального, среднемасштабное районирование. Так, в россыпях первой субпровинции отмечается высокое содержание кристаллов октаэдрического и ромбододекаэдрического габитусов. В пределах Лено-Анабарской субпровинции выделяется две алмазоносные области: Кютюнгинская (Приленская) и Анабаро-Оленекская. В россыпях первой области устанавливаются кристаллы октаэдрического габитуса (ассоциация «кютюнгинского» типа), характерные для богатого типа первоисточника кимберлитового генезиса. В россыпях Лено-Анабарской области наблюдается резкое преобладание алмазов из первоисточника невыясненного генезиса (ассоциации «эбеляхского» типа) с преобладанием кристаллов П, У и УП разновидностей, типичных округлых алмазов во всех возрастных и генетических типов алмазоносных отложений. Тунгусская субпровинция разделяется на две области: Байкитскую и Саяно-Тунгусскую. Для россыпей последней типично доминирование округлых алмазов «уральского» («бразильского») типа и присутствие значительного количества (до 10%) балласов. В россыпях Байкитской области преобладают кристаллы октаэдрического габитуса ассоциации «мирнинского типа», характерной для богатых кимберлитовых трубок, но при значительных содержаниях типичных округлых алмазов (особенно в крупных классах), свойственных периферийным частям древних платформ. Алмазоносность кимберлитов определяется многими факторами, главными из которых являются: геолого-тектонические особенности районов распространения кимберлитового магматизма; состав вещества верхней мантии, генерирующего кимберлитовые расплавы; глубина заложения корней магматических очагов; скорость миграции (подъема) кимберлитового расплава в земную кору; сохранность алмазов в условиях земной коры (в диатремах); содержание "пустого" материала в кимберлитовых телах. Состав глубинных (мантийных) минералов (пироп, пикроильменит, хромшпинелид и др.), кристалломорфология и физические свойства алмазов дифференцированы на уровне провинции, поля и каждой трубки. Индивидуальные особенности состава и физических свойств индикаторных минералов трубок выявляются на статистическом уровне. Исследование алмазов из всех разновозрастных коллекторов и кимберлитовых диатрем позволили выработать систему анализа их типоморфных особенностей и провести районирование территорий, выделяя перспективные площади для проведения прогнозно-поисковых работ. Результаты такого районирования по алмазам и ИМК с учетом ряда критериев (морфологических, структурно-тектонических, палеогеографических и др.) служат основой для прогнозирования как новых богатых кимберлитовых тел, так и россыпей с невыявленными типами первоисточников, а также месторождений с повышенным качеством алмазного сырья. Анализ результатов изучения

алмазов и ИМК различными исследователями подчеркивает актуальность и необходимость минералогических исследований комплексом современных методов с геологической привязкой находок минерала., позволяя решить ряд задач. С одной стороны – это фундаментальные исследования, позволяющие уточнять условия генезиса алмазосодержащих пород, с другой – это получение сведений чисто прикладной направленности для геолого-поисковых работ и технологического извлечения алмазов из кимберлитов. Установление связей вещественно-индикационных параметров кимберлитового магматизма различной продуктивности и геолого-структурного положения этих диатрем, позволяет выявлять как региональные, так и локальные типоморфные особенности первичных минералов продуктивных пород, а также выяснять вопрос о коренных источниках полезного компонента в россыпях.

4. Литература:

- [1] Afanasiev V.P., Zinchuk N.N., Loginova A.N. Distribution features of placer diamonds associated with the Precambrian source // *Zapysky Rasche mineralogical ob-va.* 2009. T.138. №-2. pp.1-13. (In Russian).
- [2] Zinchuk N.N., Savko A.D., Shevirev L.T. Historical minerageny in 3 volumes: T.2. Historical minerageny of mobile superbelt.-Voronezh: VGU. 2007. 570 p. (In Russian).
- [3] Egorov K.N., Zinchuk N.N., Mishenin S.G., Serov V.P., Sekerin A.P., Galenko V. {., Denisenko E.P., Baryshev A.S., Men'shagin Y.V., Koshkarev D.A. Perspectives of primary and placer diamondiferousness of so-western part of the Siberian Platform // *Collection: Geological aspects of the mineral resource base of the Joint Stock Company "ALROSA": current state, prospects, solution. Additional materials based on the results of the regional scientific and practical conference "Actual problems of the geological industry of AK "ALROSA" and scientific and methodological support of their solutions dedicated to the 35-th anniversary of YANIGP TsNIGRI AK "ALROSA".* Mirny: MGT. 2003. pp.50-84. (In Russian).
- [4] Zinchuk N.N. Specific features of composition and distribution of micaceous formations in kimberlite rocks of Yakutia // *News of HEL. Geology and exploration.* 1991. №-7. pp.58-66. (In Russian).
- [5] Orlov Y.L. *Mineralogy of diamond* - M.: Science. 1984. 264 p. (In Russian).
- [6] Zinchuk N.N. Experience of lithological and mineralogical studies of ancient sedimentary strata in connection with diamond prospecting works on the Siberian platform // *Vestnic Voronezskogo universiteta, Geologiya.* 2014. №-1. pp.13-19. (In Russian).
- [7] Zinchuk N.N., Boris E.I., Yanigin Yu.T. Peculiarities of diamond mineralogene in ancient sedimentary talits by the example of the upper Paleozoic Sediments the Siberian platform.-MGT. 2004. 172 p. (In Russian).
- [8] Zinchuk N.N. Specific features of structure and composition of the crust Weathering on tufogene formations in diamondiferous regions // *Bulleten MOIP. Geologiya.* 2015.T-90. №-4. pp.42-52. (In Russian).
- [9] Afanasiev V.P., Zinchuk N.N. Main types of litodinamic tipe of kimberlite indication minerals and the conditions of their formation // *Geologie rudny mestorosdeniya.* 1999. T.41. №-3. P.281-288. (In Russian).
- [10] Kotelnikov D.D., Zinchuk N.N. Typomorphic phic features and paleogeographic Significance of mica minerals // *Izvestiya VUZov. Geologiya and razvedka.* 1996. №-1. pp.53-61. (In Russian).
- [11] Matsuk S.S., Zinchuk N.N. *Optical Spectroscopy of minerals of the upper mantle.* M.: Nedra. 2001. 428 p. (In Russian).
- [12] Savko A.D., Sheverev L.D., Zinchuk N.N. Epochs of powerful crust formation in the history of the Earth.-Voronezh. VGU. 1999. 102 p. (In Russian).
- [13] Charkiv A.D., Zuenko V.V., Zinchuk N.N., Krutchkov A.I., Uchanov A.V., Bogatich M.M. *Petrochimiya of kimberlite.* M.: Nedra. 1991. 304 p. (In Russian).

- [14] Hitrov V.G., Zinchuk N.N., Kotelnikov D.D. Application of cluster-analysis for clearing out regularities of various composition rocks' weathering // DAN USSR. 1987. V 296. No 5. pp. 1228-1233. (In Russian).
- [15] Zinchuk N.N. Tipomorphic properties of kimberlite indicator minerals and their use in forecasting diamond deposits on the Siberian platform // Otechestvenaya geologiya. 2021. №-2. pp.41-56. (In Russian).
- [16] Zinchuk N.N. Precambrian sources of Diamonds in Phanerozoic placers // Vestnik Voronezskogo universiteta. Geologiya.2021. №-3.pp.50-61. (In Russian).
- [17] Zinchuk N.N. Geological research in Prospecting for Diamond deposits // Vestnik Voronezskogo universiteta. Geologiya.2021. №-4. pp.35-52. (In Russian).
- [18] Zinchuk N.N. The role of petrological-mineralogical and mineralogical and geochemical shoties in assessing the potential diamond content of kimberlites // Otetchestvennaia geologiya. 2022. №-1. pp.36-47. (In Russian).
- [19] Grachanov S.A., Zinchuk N.N., Sobolev N.V. The age of Predictable primary diamond sources in the Northeastern Siberian Platform // Doklady Eart Sciences. 2015. N.465. №-2. pp.1297-1301.
- [20] Serov I.V., Garanin V.K., Zinchuk N.N., Rotman A.Ya. Mantle Sources of the kimberlite Vorcanism of the Siberian Platform // Petrology. 2001. T.9. №-6. pp.576-588.

ГЕОХИМИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА КАЙНОЗОЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ИНДИГИРО-ЗЫРЯНСКОГО ПРОГИБА

Ираида Зуева, Ольга Чалая, Сара Лифшиц, Юлия Глязнецова
ФГБУН ФИЦ «ЯНЦ СО РАН» «Институт проблем нефти и газа СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, ул. Петровского, 2

GEOCHEMISTRY OF ORGANIC MATTER CENOZOIC SEDIMENTS OF THE INDIGIRO-ZYRYANSKY TROUGH

Iraida Zueva, Olga Chalaya, Vladimir Kashirtsev, Sara Lifshits, Yuliya Glyaznetsova,
Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, 2, Petrovsky str, Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. Using the methods of classical bituminology and gas chromatography-mass spectrometry, organic matter of Cenozoic sediments of the Indigiro-Zyryansky trough was analyzed to study oil source properties of rocks. As appeared the main feature of organic matter was the high yield of bitumoids and their high aliphaticity as the large content of oil fractions, in which high-molecular-weight n-alkanes predominated also some quantity polycyclic aromatic hydrocarbons had been found. Under favorable thermodynamic conditions organic matter of these sediments could generate large quantities of liquid hydrocarbons. However due to the low maturity coefficient ($CPI > 1$), the predominance of asphalt-resin components in the bitumoids composition, and some features of biomarker hydrocarbons distribution, the Cenozoic sediments didn't reach the thermal conditions of the main phase of oil formation. In more submerged parts, deposits of highly paraffinic oils can be found in the sediments of the Elgandinsky Formation. In environmental studies the compositional features of bitumoids as hydrocarbon biomarkers composition from outcrops along the section of Cenozoic sediments can be used to differentiate technogenic hydrocarbon fields (oil pollutions) from natural hydrocarbon anomalies (oil source strata).

1. Введение

Ископаемое органическое вещество (ОВ) кайнозойских отложений Индигино-Зырянского прогиба (ИЗП) формировалось в слабовосстановительной, слабоокислительной геохимической обстановке, что благоприятствовало накоплению и сохранности исходного ОВ. Отложения представлены континентальными, прибрежно-морскими угленосными и, реже, мелководно-морскими образованиями. Характеристика состава реликтовых углеводородов (УВ) метисской серии рассмотрена в работе [1]. Степень катагенетических преобразований ОВ по отражательной способности витринита для палеоген-неогенового разреза (R_0 от 0,30 до 0,45) соответствует грациям протокатагенеза ПК₂ и ПК₃ (или бурогольные стадии Б₂ и Б₃ [1]. Геохимические исследования ОВ выполнены с целью изучения нефтематеринских свойств пород.

2. Материал и методы исследования

Объектом исследований послужило рассеянное органическое вещество (РОВ) пород кайнозойских отложений ИЗП.

Методика исследований. Аналитические определения выполнены по общепринятой схеме битуминологических исследований с использованием современных методов анализа [2]. Комплекс аналитических исследований включал: определение в породах органического углерода ($C_{орг}$) методом сжигания, горячую экстракцию хлороформных битумоидов (ХБ) из пород, определение группового компонентного и углеводородного состава методом колоночной жидкостно-адсорбционной хроматографии и структурно-группового состава ХБ и

их фракций методом ИК-Фурье спектроскопии. ИК-спектры записаны на спектрометре “Protégé 460” фирмы “Nicolet” в области 4000-600 см⁻¹ в кювете с окошками KBr, толщина 33x10⁻⁶м. Хромато-масс-спектрометрические (ГХ/МС) исследования индивидуального состава насыщенных углеводородов (УВ) масляных фракций проводили на системе, включающей газовый хроматограф Agilent 6890 с интерфейсом и высокоэффективным масс-селективным детектором Agilent 5973N. Масс-хроматограммы УВ получены по общему ионному току (ТIC) и характеристическим фрагментным ионам. Идентификация индивидуальных УВ проводилась компьютерным поиском в библиотеке Национального Института Стандартов NIST-05, по литературным данным и реконструкцией структур по характеру ионной фрагментации при электронном ударе). Степень катагенеза РОВ определена по отражательной способности витринита в соответствии со шкалой катагенеза [1,3].

3. Результаты

В таблице 1 представлены результаты геохимических исследований РОВ пород образцов эльгандинской и даркылахской свит мятисской серии палеоген-неогеновых отложений, отобранных из естественных обнажений. Породы мятисской серии характеризуются повышенным содержанием С_{орг} до 5,8%. В элементном составе ХБ повышено содержание водорода 10,4-11,0%, что нетипично для РОВ континентальных отложений и может указывать на присутствие в исходном ОВ как восков и липидов высших наземной растений, так и планктонногенно-водорослевого материала. Большое количество гетероатомов от 7 до 11% характерно для низких стадий катагенеза ОВ, которым соответствуют изученные образцы. На это указывают и данные группового состава битумоидов с высоким содержанием смол до 76% и низким – масел. Вариации в содержании С_{орг} и ХБ скорее всего связаны с различной долей примеси углистого вещества в составе образцов. Следует отметить, что по данным группового компонентного состава при большом интервале в содержании масел и асфальтово-смолистых компонентов не отмечено характерных отличий образцов эльгандинской свиты от даркылахской и в таблице 1 приведены данные в целом по мятисской серии.

Таблица 1 – Геохимическая характеристика РОВ кайнозойских отложений ИЗП, стадия катагенеза ПК₂-ПК₃

Параметры	СРІ*	С _{орг} , %	α _{хб} , %	β _{хб} , %	Элементный состав ХБ, %			Групповой состав ХБ, %		
					С	Н	Га	Масла	Смолы	Асфальтены
Мин.	1,6	2,16	0,014	0,6	78,4	10,4	7,0	17,2	49,9	4,5
Макс.	3,3	5,76	0,162	2,8	81,9	11,0	11,2	45,6	76,5	14,4
Среднее	2,5	4,05	0,075	1,7	80,2	10,7	9,0	25,8	66,5	7,7

*Коэффициент зрелости – К(нч/ч n-алканов)

Для ХБ пород изученных свит общим является существенно алифатический тип химической структуры ХБ с высоким содержанием кислородсодержащих групп и связей и низким – ароматических циклов. ИК-спектры ХБ достаточно близки и специфичны. О преимущественно алифатическом строении свидетельствуют доминирующие во всех спектрах полосы поглощения (п.п.) 720-730, 1378 и 1465 см⁻¹. Выступ в области 1600 см⁻¹ и малоинтенсивные п.п. 750 и 810 см⁻¹ указывают на незначительное участие ароматических циклов. По ИК-спектрам ХБ РОВ кайнозойских отложений прослеживается большое сходство с ХБ таких типично водорослевых образований как оленёкские богхеды Таймылырского месторождения из отложений укинской свиты нижнего мела Лено-Анабарского прогиба. Причём для отдельных образцов мятисской серии значения относительных коэффициентов поглощения D'₇₂₀ и D'₇₃₀ значительно превышают значения в ИК-спектрах ХБ оленекских богхедов и ниже – для ароматических структур D'₇₅₀, D'₈₁₀, D'₈₈₀, D'₁₆₀₀ (таблица 2). Это указывает на более

алифатический характер химической структуры битумоидной части РОВ пород мятисской серии ИЗП в сравнении с богхедами меловых отложений Лено-Анабарского прогиба.

Изучение смолистой части, доминирующей в составе ХБ, показало, что бензолные и спиртобензолные смолы, как и ХБ, характеризуются алифатическим строением и представлены, главным образом, соединениями типа твердых насыщенных жирных кислот, кетонов (п.п. 720-730, 950, 1420, 1700-1710, 3100-3400 см^{-1}) и сложных эфиров (п.п. 1000-1300 и 1700 см^{-1}). Сдвиг полосы карбонильных групп 1700-1710 см^{-1} в область 1740 см^{-1} при записи спектров смол в растворе сероуглерода можно рассматривать как свидетельство преобладания кислотных форм среди кислородных соединений в химической структуре смолистых компонентов [4]. Это свидетельствует о значительном вкладе неразветвленных длинных углеродных цепей в химическую структуру ХБ, что можно рассматривать как подтверждение значительного присутствия ненасыщенных жирных кислот в исходном материале.

Следует отметить, что по ИК-спектрам отдельных образцов в спиртобензольных смолах ХБ РОВ пород, в отличие от бензольных, установлено заметное присутствие ароматических циклов. По спектральным коэффициентам (отношение соединений с длинными метиленовыми цепями – D'_{720} к ароматическим циклам – D'_{1600}) они отличаются от богхедов и весьма похожи на типичные спиртобензольные смолы ХБ с преобладанием террагенной составляющей в составе исходного ОБ континентальных фаций. Во всех образцах в спиртобензольных смолах высокое количество кислородсодержащих групп и связей $D'_{1700-1740} \geq D'_{1460}$, что характерно для ХБ РОВ на низких стадиях катагенеза (как и зоны гипергенеза).

Таблица 2 – Спектральные коэффициенты поглощения ХБ РОВ и богхедов

Относительные коэффициенты поглощения D'_v	Индигино-Зырянский бассейн		Лено-Анабарский прогиб
	РОВ		Богхеды
	Р-N даркылахская свита	Р эльгандинская свита	К укинская свита
D'_{720}	0,14-0,57	0,15-0,46	0,20-0,33
D'_{730}	0,13-0,52	0,13-0,38	0,20-0,33
D'_{750}	0,08-0,13	0,06-0,13	0,09-0,25
D'_{810}	0,05-0,15	0,09-0,15	0,06-0,21
D'_{880}	фон-0,18	фон-0,12	отс.
D'_{1600}	0,08-0,29	0,14-0,27	0,30-0,48
$D'_{1700-1740}$	0,41-0,79	0,56-1,02	1,15-1,66
D'_{3300}	0,10-0,26	0,12-0,19	0,11-0,61

В химической структуре масляной части ХБ богхедов также доминируют алифатические структуры (п.п. 720-730, 1378, 1465 см^{-1}), но в отличие от смол в них выше присутствие ароматических циклов, что видно по появлению отчетливых выраженных п.п. 750, 810 и 1600 см^{-1} . Особенностью строения нафтеново-ароматических фракций является большое количество алифатических фрагментов, в том числе и длинноцепочечных (п.п. 720, 730 см^{-1}), присоединенных к ароматическим циклам, что указывает на высокую гибридность ароматических УВ. Особенности химической структуры ХБ и их фракций с преобладанием длинноцепочечных алкановых УВ можно рассматривать как свидетельство значительного вклада водорослевого материала в состав исходного ОБ богхедов. В составе насыщенных УВ богхедов основной процент приходится на алканы нормального строения с преобладанием относительно высокомолекулярных гомологов, с бимодальным распределением с положением основного максимума на nC_{23} , nC_{25} и второго – на nC_{17} . Соотношение изопреноиды/н-алканы = 0,08-0,12. Среди изопреноидов основная доля приходится на пристан и фитан при преобладающей роли пристана (пристан/фитан=3,33-6,06). Для полициклических УВ характерно присутствие гопанов C_{27} и C_{29} с «биологической» стереохимической конфигурацией

17 β (H),21 β (H) и преобладанием среди гомогенов биологических структур 22S. В составе стериновых УВ количество холестанов (типичных продуктов водорослевых липидов) не превышает количество этилхолестанов.

В составе насыщенных УВ кайнозойских отложений преобладают высокомолекулярные н-алканы с максимумами на нC_{27,29} при преобладании нечетных гомологов. Подобный состав и характер распределения алканов нормального строения характерен как для водорослевого ОБ озёрных фаций, так и террагенного ОБ. Так, в липидах высших растений найдены нормальные алканы C₁₀-C₄₀ со значительным преобладанием нечетных УВ в диапазоне нC₂₃-нC₃₅ с особенно высокими концентрациями на нC_{27,29,31} [5,6]. Отношение суммы пристана и фитана к сумме рядом элюирующимся н-гептадекану и н-октадекану меньше единицы, что свидетельствует о хорошей сохранности ОБ. Судя по значениям CPI от 1,6 до 2,9, ОБ ещё находилось на низкой градации катагенеза (таблица 3; рисунок 1), что совпадает с картиной накопления и преобразования ОБ мятисской серии.

Таблица 3 – Индивидуальный состав насыщенных углеводородов ХБ РОВ кайнозойских отложений ИЗП

Возраст, свита	Значения	Σ н.к.-нC ₂₀	макс.	изопр.	нч/ч	п/ф	п/нC ₁₇	ф/нC ₁₈	п+ф
		Σ нC ₂₁ -к.к.	н-алк.	н-алк.					нC ₁₇ +нC ₁₈
N ^{dr} даркы-лахская	мин	0,17	нC ₂₃	0,05	2,13	1,00	0,54	0,58	0,56
	макс	0,21	нC ₂₇	0,11	2,54	1,65	1,1	0,59	0,83
	<i>среднее</i>	0,19		0,08	2,34	1,33	0,82	0,59	0,70
P ^{el} эльгандинская	мин	0,09	нC ₂₃	0,01	1,63	1,28	0,38	0,26	0,32
	макс	0,40	нC ₂₇	0,09	2,87	4,08	1,33	0,63	0,89
	<i>среднее</i>	0,21		0,05	2,22	2,12	0,69	0,39	0,54

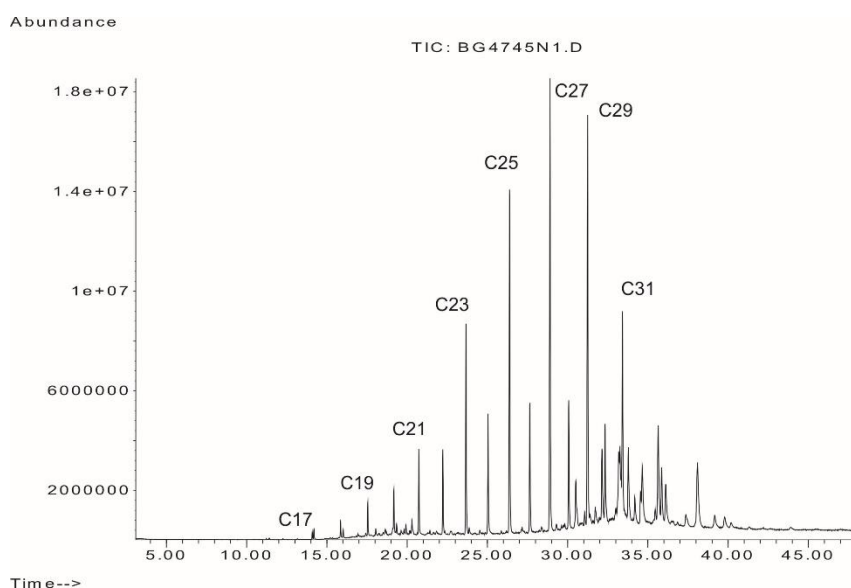


Рисунок 1 – Масс-хроматограмма распределения алкановых УВ в битумоиде РОВ кайнозойских отложений ИЗП

Доля изопреноидов невелика, в их составе доминируют пристан и фитан при преобладающей роли пристана. На низких стадиях катагенеза преобладание пристана над фитаном свидетельствует о континентальной природе ОБ, формировавшегося в окислительных условиях диагенеза [5].

В составе полициклических УВ распространены биогены со стереохимической конфигурацией 17 β (H)21 β (H) и тритерпеноиды ряда олеананов, присутствие которых в ископаемом ОБ связано с расцветом покрытосеменных растений. Ещё одной характерной

особенностью РОВ кайнозойских отложений изученных образцов является присутствие трициклических структур типа норпимарана – фихтелита и тетрациклических УВ ряда каурана-филлокладана, которые связаны с терпенами высшей растительности, а два последних - с терпенами хвойных деревьев, но отдельные из этих УВ могут синтезироваться бактериями и морскими водорослями [7]. В составе полициклических ароматических УВ в слабо преобразованных кайнозойских отложениях наибольшее распространение получил ретен.

4. Выводы

По геохимическим параметрам и составу реликтовых УВ, показана смешанная генетическая природа РОВ мятисской серии кайнозоя, в котором наряду с высшей наземной растительностью была велика доля водорослевого материала. Это подтверждает большое сходство с такими типично водорослевыми образованиями как богхеды. РОВ пород мятисской серии как и богхедов характеризуется высоким выходом битумоидов, их повышенной алифатичностью, большим содержанием масляных фракций. С геохимических позиций глинистые пачки эльгандинской свиты обладали благоприятными нефтегазоматеринскими свойствами. В благоприятных термодинамических условиях РОВ этих отложений могло бы генерировать большое количество жидких УВ. Вместе с тем судя по геохимическим показателям – коэффициенту зрелости СРІ, преобладанию асфальтово-смолистых компонентов в групповом составе ХБ, большому количеству кислородсодержащих соединений в химической структуре битумоидов – эти отложения не достигли термобарических условий главной зоны нефтеобразования. В более погруженных частях ИЗП в отложениях эльгандинской свиты, вероятно, могут быть встречены высокопарафинистые нефти с низким содержанием ароматических УВ.

В экологических исследованиях полученные результаты по особенностям состава битумоидов и углеводородов-биомаркеров в изученных образцах пород из обнажений по разрезу кайнозойских отложений могут быть использованы при дифференциации техногенных углеводородных полей (нефтезагрязнений) от природных углеводородных аномалий (нефтематеринских толщ).

5. Благодарности

Работа выполнена в рамках Госзадания Министерства науки и высшего образования РФ по Программе ФНИ № 122011200369-1 «Биогеохимия процессов формирования и разрушения углеводородных флюидов» на научном оборудовании ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН, грант №13.ЦКП.21.0016

6. Литература:

- [1] Kashirtsev V.A., Gaiduk V.V., Chalaya O.N., Zueva I.N. Geochemistry of biomarkers and catagenesis of organic matter in Cretaceous and Cenozoic deposits of the Indigiro-Zyryansky trough (northeast of Yakutia). *Geology and geophysics*. 2012; 53;8: P.1027-1039
- [2] Guide to the analysis of bitumen and dispersed organic matter of rocks / ed. V.A. Uspensky, K.F. Rodionova, A.I. Gorsky, A.P. Shishkina. L. M.: Nedra, 1966. 316 p.
- [3] Catagenesis and oil and gas potential. L.: Nedra, 1981. 240 p
- [4] Application of spectroscopy in chemistry. / Edited by V. West. Moscow. IL.1959. 659 p.
- [5] Tissot B. and Welte D. Formation and distribution of oil. M.: Mir. 1981. 504 p.
- [6] Petrov A.I. Petroleum hydrocarbons. M. Science. 1989. 264 p.
- [7] Alexander R., Kagi R., Noble R. Identification of the bicyclic sesquiterpenes, drimane, and eudesmane in petroleum. *J. Chem. Soc., Chemical Communications*. 1983; P.226-228

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПОИСКОВЫХ КРИТЕРИЕВ И ПРИЗНАКОВ В АЛАКИТ-МАРХИНСКОМ КИМБЕРЛИТОВОМ ПОЛЕ

Дмитрий Иванов¹, Вячеслав Иванов¹, Александр Толстов²

¹ АК «АЛРОСА» (ПАО), 678190, Россия, п. Айхал, ул. Алмазодобытчиков, 3

² ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

THE EFFECTIVENESS OF THE APPLICATION OF SEARCH CRITERIA AND FEATURES IN THE ALAKIT-MARKHA KIMBERLITE FIELD

Dmitry Ivanov¹, Vyacheslav Ivanov¹, Aleksandr Tolstov²

¹ PJSC «ALROSA», 3, Almazodobytchikov str., Aikhal, 678190, Russia

² Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. The article is devoted to the practice of applying a complex of geological and geophysical methods on the territory of the Alakit-Markha kimberlite field (AMKF) in the Yakutian diamond province. It is indicated that it is necessary to combine methods to increase the efficiency of exploration. The signs and criteria used in the practice of prospecting for diamonds are considered in detail. The authors point out that the competent and consistent application of a complex of geological and geophysical methods has made it possible to identify in recent decades more than 60 kimberlite bodies on the territory of the AMKF, 6 of which are indigenous diamond deposits. The effectiveness of methods based on the use of search features and criteria has been proven by the practice of their application over many years and indicates that the potential of the studied territory is far from being exhausted.

1. Введение

Геолого-поисковые работы в Алаakit-Мархинском кимберлитовом поле (АМКП) начиная с 50-х годов прошлого века, выполняются в соответствии с районированием территории по особенностям геологического строения применительно к поискам кимберлитовых тел, в основном, на площадях так называемых IV и V геотипов, где кимберлитовмещающими отложениями являются терригенно-карбонатные комплексы нижнего палеозоя, перекрытые осадочными терригенными отложениями каменноугольно-пермского возраста при широком развитии вулканогенных пермо-триасовых образований (силлы, дайки, покровы) трапповой формации общей мощностью до 200 м [1].

Применение отдельных геофизических или геологических методов поисков погребенных кимберлитовых тел на подобных площадях сложного и весьма сложного геологического строения (особенно в районах развития IV и V геотипов) зачастую оказывается недостаточно эффективным, что диктует необходимость их комплексирования [2]. В этих условиях поиски коренных месторождений алмазов на подобных участках осуществляются разработанным комплексом геолого-геофизических методов, принятых и успешно апробированным в практике проведения поисковых работ на алмазы в Западной Якутии [3].

В обозначенный комплекс входят как геологические, так и геофизические методы исследований:

- аэрогеофизические работы;
- наземные геофизические исследования – магниторазведка, гравиразведка и электроразведка методом ЗМПП;
- геофизические исследования скважин (ГИС);
- геохимические исследования;
- ревизионно-поисковые маршруты со шлиховым, мелко- и крупнообъемным опробованием;

- проходка шурфов;
- бурение колонковых скважин;
- шлиховое и геохимическое опробование керна по сети скважин 1000x500 м, 500x500 м, 500x250 м, 250x250 м, 250x125 м и детальнее;
- заверка комплексных аномалий, лабораторные и специализированные исследования [3,4].

По результатам проведенных работ составляются карты геофизических полей, структурно-тектонические, геологические карты и геолого-геофизические разрезы, на основании анализа которых оцениваются перспективы территории, прогнозные ресурсы алмазов в кимберлитах по категориям P_3 , P_2 и P_1 (при вскрытии кимберлитовых тел) [5].

Данные геолого-геофизические методы построены на использовании поисковых критериев и признаков, среди которых первостепенное значение имеют структурно-тектонические критерии и минералогические признаки [5,6].

2. Поисковые признаки

Под поисковыми признаками понимаются определенные факты или явления, указывающие на наличие или возможность выявления коренного месторождения алмазов кимберлитового типа в определенном месте [6]. К ним относятся:

- находки алмазов в разновозрастных терригенных отложениях;
- кимберлитовые жилы, обособленные от известных, ранее выявленных трубок;
- включения обломков кимберлитов в траппах и целые отторгнутые блоки кимберлитов в трапповых полях [7];
- локализованные высококонтрастные шлиховые ореолы минералов-индикаторов кимберлита (ИМК) с хорошей сохранностью их первичной магматогенной поверхности, в том числе минералогические ореолы с повышенным содержанием ИМК алмазной ассоциации [8];
- первичные геохимические ореолы рассеяния микроэлементов кимберлита в карбонатных породах нижнего палеозоя;
- геофизические аномалии трубчатого типа;
- постмагматические околорудные изменения нижнепалеозойских карбонатных пород в зоне рудовмещающих структур и в околотрубчатом пространстве, выражающиеся в проявлениях битуминозности, газонасыщенности и вторичной минерализации в виде секретий аметиста, халцедона, горного хрусталя, гипса [8].

Основным поисковым признаком, определяющим перспективность большинства поисковых участков, является наличие в их пределах локальных контрастных шлиховых ореолов ИМК, неидентифицированных с известными кимберлитовыми телами.

3. Поисковые предпосылки (критерии)

Под поисковыми предпосылками (критериями) понимаются характерные определенные особенности рудовмещающей среды, позволяющие прогнозировать новые, необнаруженные ранее объекты поисков – кимберлитовые тела. Ниже приводится комплекс наиболее применяемых поисковых предпосылок (критериев).

Структурно-тектонические критерии

Кимберлитовые тела, как правило, располагаются в зонах влияния глубинных рудоконтролирующих тектонических нарушений (разломов). Их локализация определяется пространственным положением разнопорядковых разрывных нарушений фундамента, которые в совокупности составляют структуру рудного поля [2].

В нижнепалеозойском осадочном чехле формой проявления разрывных нарушений фундамента являются зоны дробления и повышенной трещиноватости – «зоны разуплотнения». Такие зоны по геофизическим данным обладают повышенной электропроводимостью и пониженными значениями поля силы тяжести и могут быть проявлены в виде аномалий в электроразведочных и гравитационных полях.

В пределах Алакит-Мархинского кимберлитового поля рудовмещающие структуры устанавливаются по линейно-цепочечному расположению кимберлитовых тел.

В верхнепалеозойской терригенно-осадочной толще формой проявления «зон разуплотнения» являются (с большой степенью вероятности) «коридоры» и «окна» в траппах, образующиеся в результате ограничивающего влияния «зон разуплотнения» на продвижение магмы [7]. Предполагается, что в зону разуплотнения происходит отток (или поглощение) газовой составляющей магматического расплава и, соответственно, понижается внутреннее гидростатическое давление в магме, вследствие чего возросшее изостатическое давление перекрывающей терригенной толщи препятствует дальнейшему продвижению магмы (перед или над зоной, как перед препятствием, наблюдаются «раздувы» в интрузивных телах) [8].

Отдельные кимберлитовые тела находятся под «козырьками» траппов (как например, трубки Восток, Победа, Сытыканская и др.). Иногда над трубками наблюдается резкое уменьшение мощности траппов (трубки Краснопресненская, Кылахская, Алакитская и др.). На основании этого «бестрапповые окна и коридоры», расположенные вблизи или в пределах неидентифицированных ореолов ИМК, являются косвенными признаками возможного наличия в их пределах кимберлитовых тел [7].

Другим структурным критерием являются околотрубочные дислокации вмещающих пород, проявляющиеся в изменении залегания пластов в зоне контакта с кимберлитовыми телами, а также в их интенсивной трещиноватости и брекчировании. Подобные явления наблюдаются в пределах локальных изометричных участков и могут быть обусловлены провальнопросадочными процессами, связанными с оседанием вулканической постройки при понижении уровня магмы в магматическом очаге после ее извержения [6,8].

Данные участки могут находить свое отображение в рельефе карбонатного цоколя в виде отдельных отрицательных морфоструктур, размеры и контрастность которых находятся в прямой зависимости от интенсивности проявления процессов формирования диатрем и масштабов нивелирующих экзогенных рельефообразующих процессов.

В Алакит-Мархинском кимберлитовом поле они установлены на трубках Краснопресненская, Кылахская и др. Зона околотрубочных дислокаций распространяется от контактов трубки на удаление от нескольких метров до 100 и более метров.

Стратиграфические критерии

Возраст промышленных кимберлитовых тел, известных в Далдыно-Алакитском алмазоносном районе, позднедевонский – раннекарбонный. Возраст рудовмещающих карбонатных пород – ранне-среднепалеозойский. Предполагается, что самым древним осадочным коллектором для продуктов разрушения кимберлитов в районе являлись терригенные отложения раннего карбона, сохранившиеся лишь в кратерных частях некоторых кимберлитовых диатрем (трубка Краснопресненская). Позднее они в значительной мере подверглись размыву и переотложению [1]. Сохранившиеся до настоящего времени переотложенные осадочные коллекторы ближайшего переноса представлены терригенными отложениями конекской свиты среднего карбона и нижнеайхальской подсвиты среднего – позднего карбона, широко распространенными на изученной территории [2].

Литологические критерии

Наиболее благоприятными коллекторами алмазов и их минералов-индикаторов кимберлита являются подошвенные горизонты (2-3 м) осадочных коллекторов ближайшего переноса, представленные грубообломочными отложениями конекской и айхальской свит. К ним относятся конгломераты, гравелиты, а также песчаники с галькой и гравием. Наличие ИМК в тонкозернистых осадках (алевролитах, аргиллитах) подошвенного горизонта указывает на непосредственную близость коренного источника.

Минералогические критерии

Наиболее характерным и значимым индикатором близости погребенного коренного источника являются высокие концентрации характерных кимберлитовых минералов в осадочных

коллекторах [9]. К таким минералам, помимо алмаза, относятся гранат (пироп), пикроильменит, хромшпинелид и оливин (форстерит) [10].

Следует особо отметить, что минералами-индикаторами кимберлитов могут являться также такие минералы, как циркон, хромдиопсид, флогопит, аметист, горный хрусталь и некоторые другие, однако, на это следует обращать особое внимание лишь в том случае, когда они наблюдаются в шлихах совместно с основными минералами-индикаторами – пиропом и пикроильменитом [9,10].

Минералы-индикаторы из коллекторов ближайшего переноса могут быть с примазками кимберлита, без следов механического износа, с реликтами первичной магматогенной поверхности и реакционных кайм [8], на что следует обращать особое внимание при минералого-геохимическом и петрографическом изучении.

Показателем алмазности коренного источника является высокая концентрация хромистых ($\text{Cr}_2\text{O}_3 > 5\%$), низкокальциевых (CaO не более 3%), густоокрашенных (фиолетовых, лиловых, вишнево-красных) пиропов и высокохромистых ($\text{Cr}_2\text{O}_3 > 62\%$) хромшпинелидов с глиноземистостью на уровне 2 - 8% [9].

Критерий сближенности кимберлитовых тел

В пределах Алакит-Мархинского кимберлитового поля денудационный срез погребенных кимберлитовых тел не превышает первых сотен метров. В зависимости от величины эрозионного среза кимберлитовые трубки, имеющие два и более подводящих канала, могут иметь либо общую раструбную часть диатремы (трубки Юбилейная и Айхал), либо сближенные диатремы (трубки Юность и Молодость, трубки Соболева, Бобкова и ЦНИГРИ).

Геолого-экономические критерии

Согласно районным браковочным кондициям, минимально-рентабельное кимберлитовое месторождение алмазов должно соответствовать следующим критериям:

- Площадь сечения кимберлитового тела – не менее 5 тыс. м² (рекомендательный);
- Глубина прогноза – 200 м от верхней границы участка недр (обязательный);
- Среднее содержание алмазов класса +0,5 мм – 0,3 кар/т;
- Запасы и ресурсы алмазов – не менее 1 млн. карат по классу крупности +0,5 мм;
- Средняя цена 1 карата алмазов – не менее 100 дол/кар.

4. Заключение

Эффективность методики алмазопроисловых работ, основанной на поисковых критериях и признаках, подтверждается следующими фактами: на территории АМКП открыто более 66 кимберлитовых тел, в т.ч. 6 месторождений алмазов; многие открытые кимберлитовые тела приурочены к узлам перекрестной складчатости; в районе всех известных трубок наблюдаются идентифицированные шлиховые ореолы; при заверке геофизических аномалий обнаружено более 10 кимберлитовых тел – жильных и трубочных [3].

Одно из знаковых кимберлитовых тел, открытых в за последние годы в АМКП, трубка имени Морозовых и жила Каротажная были выявлены именно при заверке комплексных аномалий; кимберлитовое тело Январское обнаружено по ряду выделенных критериев и признаков – приуроченности к зоне динамического влияния Комсомольского разлома с антиформным перегибом осевой линии депрессии, наличие геофизической аномалии и высококонтрастного шлихоминералогического ореола [4].

По ряду поисковых критериев и признаков в АМКП присутствуют перспективные участки с наличием прогнозируемых кимберлитовых (жильных и трубочных) тел. К ним, в первую очередь, относятся комплексные аномалии, выделенные сразу по нескольким поисковым критериям: наличие геофизических аномалий (электроразведочных, магниторазведочных, РВГИ, СМ и т.д.), узлов пересечения пликативных и дизъюнктивных структур, неидентифицированных ореолов ИМК, в том числе с высокими содержаниями гранатов (пиропов) и пикроильменитов хорошей сохранности.

В настоящее время в пределах поля установлено около 70 погребенных ореолов и только 20 из них идентифицированы с известными коренными источниками. Остальные 50 требуют своего объяснения или идентификации. Таким образом, наличие комплекса поисковых критериев и признаков на участках с еще не выявленными кимберлитовыми телами позволяет оценивать потенциал поля значительным, а используемые поисковые методы – весьма эффективными.

5. Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГАБМ СО РАН.

6. Литература:

- [1] Gorev N.I., Gerasimchuk A.V., Protsenko E.V., Tolstov A.V. Tectonic aspects of the structure of the Vilyuysko-Markhinskaya zone, their use in forecasting kimberlite fields // *Nauka i obrazovanie*. 2011. No. 3. pp. 5-10.
- [2] Protsenko E.V., Tolstov A.V., Gorev N.I. Criteria for the search for kimberlites and new prospects for the indigenous diamond content of Yakutia // *Ores and metals*. 2018. No. 4. pp. 14-23.
- [3] Ivanov D.V., Ivanov V.V., Tolstov A.V. Structural and tectonic criteria for the search for kimberlite bodies in the Alakit-Markhinsky field. *Ores and metals*. 2019. No.2. pp. 55-60.
- [4] Ivanov D.V., Tolstov A.V., Ivanov V.V. Geological structure and material composition of the January kimberlite body (Daldino-Alakit diamond-bearing region). *News of higher educational institutions. Geology and exploration*. 2018. No. 5. pp. 39-43.
- [5] Ivanov D.V., Tolstov A.V., Ivanov V.V. Features of indicator minerals of kimberlites of the new January tube (Western Yakutia). *News of universities. Geology and exploration*. 2017, No.5. pp. 20-26.
- [6] Vasilenko V.B., Kuznetsova L.G., Minin V.A., Tolstov A.V. Petrochemical evaluation of the Diamond potentials of Yakutian kimberlite fields *Geochemistry International*. 2010. T. 48. № 4. C. 346-354.
- [7] Lapin A.V., Tolstov A.V., Antonov A.V. Sr and Nd isotopic compositions of kimberlites and associated Rocks of the Siberian Craton *Doklady Earth Sciences*. 2007. T. 414. № 1. C. 557-560.
- [8] Lapin A.V., Tolstov A.V., Vasilenko V.B. Petrogeochemical characteristics of the Kimberlites from the Middle Markha region with application to the problem of the geochemical heterogeneity of Kimberlites *Geochemistry International*. 2007. T. 45. № 12. C. 1197-1209.
- [9] Sobolev N.V., Tomilenko A.A., Kuz'min D.V., Logvinova A.M., Bul'bak T.A., Fedorova E.N., Nikolenko E.I., Reutskii V.N., Sobolev A.V., Batanova V.G., Grakhanov S.A., Kostrovitskii S.I., Yakovlev D.A., Anastasenko G.F., Tolstov A.V. Prospects of search for diamondiferous kimberlites in the northeastern Siberian platform // *Russian Geology and Geophysics*. 2018. T. 59. № 10. C. 1365-1379.
- [10] Sobolev N.V., Sobolev A.V., Tomilenko A.A., Batanova V.G., Tolstov A.V., Logvinova A.M., Kuz'min D.V. Unique compositional peculiarities of olivine phenocrysts from the post flood basalt diamondiferous Malokonapskaya kimberlite pipe, Yakutia / *Doklady Earth Sciences*. 2015. T. 463. № 2. C. 828-832.

**ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ РУД ПРОЯВЛЕНИЯ УТАНАХСКОЕ,
ВЕРХНЕ-ТИМПТОНСКИЙ ЗОЛОТОРУДНЫЙ РАЙОН
(АЛДАНО-СТАНОВОЙ ЩИТ)**

Егор Иванов, Евгений Лоскутов, Александр Кравченко, Николай Бондарь-Лунецкас
ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

**MINERALOGICAL COMPOSITION OF THE ORES OF THE UTANAKH
OCCURRENCE, VERKHNE-TIMPTON GOLD ORE DISTRICT
(ALDAN-STANOVOY SHIELD)**

Egor Ivanov, Evgeniy Loskutov, Aleksandr Kravchenko, Nikolay Bondar-Luneckas
Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. Data on the material composition of the ores of the Utanakh occurrence of the Skabeltsinsky ore field and its flanks are presented. There are four stages of mineral formation: metamorphogenic, metasomatic, hydrothermal and supergene. The metamorphogenic stage is represented by two phases: pyrrhotite-chalcopyrite-magnetite and pyrite-ilmenite-titanite; metasomatic stage is represented by pyrite-quartz phase; hydrothermal stage is represented by pyrite-carbonate-quartz and gold-polysulfide-quartz phases; supergene stage is represented by bornite-goethite phase. It has been established that the gold-polysulfide-quartz phase of the hydrothermal stage of ore formation is productive, wherein native gold is in close paragenetic association with chalcopyrite of the second generation and quartz of the third generation. The fineness of native gold is within the range from 633.1 to 948 ‰, with silver being the primary admixture.

1. Введение

В пределах Верхне-Тимптонского золоторудного района (ВТЗР) добыча золота ведется с конца XIX века. В районе имеется ряд крупных россыпей таких рек как Тимптон, Гонам, Иенгра и их притоков. Во второй половине прошлого века здесь был открыт ряд мелких рудопроявлений золота (Скабельцинское, Утанахское, Медвежье, Колбочи и др.).

В настоящее время остается дискуссионным вопрос об источниках золота в россыпях. Так же нет ответа и на вопросы генезиса коренных рудопроявлений.

Для понимания процессов их формирования был изучен вещественный состав и последовательность минералообразования на восточном фланге ВТЗР – рудопроявление Утанахское. Исследования проводились с помощью оптических методов и на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6480LV с использованием энергетического дисперсионного спектрометра Energy 350 of Oxford Instruments.

2. Геологическая обстановка

Объект исследования расположен в верхнем течении р. Тимптон. В структурном отношении Верхне-Тимптонский золоторудный район (ВТЗР) находится в центральной части Алдано-Станового щита. На границе Нимнырского (АНМ) и Тындинского (ТН) террейнов, в пределах южного окончания Амгинской (ам) зоны тектонического меланжа [1].

Площадь ВТЗР сложена метаморфическими докембрийскими комплексами, слагающих сложнодислоцированный фундамент, осадочными мезозойскими и кайнозойскими породами. Метаморфические породы претерпели неоднократный прогрессивный и регрессивный метаморфизм нескольких фаций: гранулитовой, амфиболитовой, эпидот-амфиболитовой и зеленосланцевой. В отдельный комплекс выделены породы метаморфизованные эпидот-амфиболитовой, зеленосланцевой фации, которые на площади ВТЗР образуют мощные зоны диафтореза. Диафторированные породы разделяются по составу на биотит-мусковит-хлоритовые и амфибол-биотит-эпидотовые сланцы. Магматизм территории представлен интрузиями архейского, раннепротерозойского и раннемелового возраста. Рудные зоны – маломощные карбонат-кварцевые жилы (от 0.1 до 1.5 м), околорудные метасоматиты и кварцевые линзы, локализующиеся в диафторированных породах. Проведенные анализы

атомно-абсорбционной спектроскопии показали содержание золота в рудных зонах до 1.72 г/т. По фондовым данным на рудопроявлении Утанахское вещественный состав руд представлен – пиритом, халькопиритом и самородным золотом (Подъячев Б.П., 1989).

3. Минеральный состав руд, этапы и стадии минералообразования рудопроявления Утанахское

На основе минераграфических наблюдений выделено четыре этапа минералообразования: предрудные метаморфогенный и метасоматический, рудный гидротермальный и пострудный гипергенный.

Минералы	Метаморфогенный этап		Метасоматический этап	Гидротермальный этап		Гипергенный этап
	1	2	3	4	5	6
Жильные: Кварц Карбонат			— Qz1 —	— Qz2 — — Cal —	— Qz3 —	
Рудные: Магнетит Халькопирит Пирротин	— Сср1 —				— Сср2 —	
Титанит Ильменит Пирит		— Py1 —	— Py2 —	— Py3 —		
Галенит Самородное золото Борнит Гётит						— —

Рисунок 1 – Схема этапов и стадий минералообразования рудопроявления Утанахское.

Примечания: 1 – пирротин-халькопирит-магнетитовая; 2 – пирит-ильменит-титанитовая; 3 – пирит-кварцевая; 4 – пирит-карбонат-кварцевая; 5 – золото-полисульфидно-кварцевая; 6 – борнит-гётитовая стадии.²

Метаморфогенный этап характеризуется двумя стадиями: пирротин-халькопирит-магнетитовой и пирит-ильменит-титанитовой (Рисунок 1). 1) в пирротин-халькопирит-магнетитовой стадии магнетит формирует рассеянную вкрапленность хорошо образованных кристаллов кубической формы. Размер кристаллов колеблется от 300 до 1300 мкм. Для кристаллов характерно наличие трещин и дефектов. В дефектах развиваются титанит и ильменит. Сср1 встречается в виде аллотриоморфных зерен, размером до 70 мкм ассоциирует с пирротинном. Пирротин образует редкие зерна аллотриоморфной формы, размером до 50 мкм.

2) в пирит-ильменит-титанитовой стадии ильменит кристаллизуется в виде аллотриоморфных зерен, размером до 400 мкм, тесно связан с титанитом. Py1 образует редкую вкрапленность и скопления размером 1500 мкм. Кристаллы кубической формы, размером от 300 до 600 мкм, характерны трещины. Py1 при формировании захватывал минералы ранней ассоциации – Сср1 и пирротин.

Метасоматический этап представлен пирит-кварцевой стадией (Рисунок 1), которая локализуется в околорудных метасоматитах, мощностью около 20 см. Qz1 формирует систему маломощных прожилков в призальбандовых частях рудных зон. Py2 встречается в виде мелких агрегатов. Форма кристаллов кубическая, размером до 200 мкм. В дефектах Py2 развиваются минералы более поздней ассоциации.

Гидротермальный этап характеризуется двумя стадиями: пирит-карбонат-кварцевой и золото-полисульфидно-кварцевой (Рисунок 1). 1) пирит-карбонат-кварцевая стадия локализуется в маломощных карбонат-кварцевых жилах с массивной и полосчатой текстурой. Молочно-белый кварц (Qz2) и кальцит (Cal) представлены разномасштабными агрегатами в большей части аллотриоморфнобластической структуры. Полосчатые текстуры формируются за счет маломощных, до нитевидных прослоев – реликтов вмещающих пород. Мелкие обломки

² Сокращения названий минералов: Сср1-2 – халькопирит двух генераций; Cal – кальцит; Py1-3 – пирит трёх генераций; Qz1-3 – кварц трёх генераций.

вещающих пород встречаются по всему объему жил. Ру3 кристаллизовался одновременно с кварцем (Qz2), кальцитом (Cal) и наблюдается в виде аллотриоморфных зерен, размером от 800 до 7000 мкм. Зерна катаклазированы, в трещинах и дефектах формируются минералы более поздней ассоциации.

2) минералы золото-полисульфидно-кварцевой стадии развиваются по карбонат-кварцевым жилам и околорудным метасоматитам. Qz3 заполняет трещины в карбонат-кварцевых жилах, а также образует включения в пиритах 2 и 3. Кварц мелкокристаллический с гипидиоморфной структурой и массивной текстурой. Сср2 образует отдельные аллотриоморфные зерна, размером до 4000 мкм, а также заполняет дефекты в ранних сульфидах вместе с галенитом. Галенит встречается в виде редкой вкрапленности, реже скоплений, зерна аллотриоморфной формы, размером до 5 мкм. Самородное золото представлено микроскопическими зернами неправильной формы, размером до 5 мкм и ассоциирует с образованием Сср2 и Qz3 (Рисунок 2). Пробность самородного золота колеблется от 633.1 до 948 ‰ (Таблица 1).

Гипергенный этап представлен борнит-гётитовой ассоциацией (Рисунок 1). Гётит образуется по дефектам и периферии зерен Ру1. Борнит же развивается по зернам Сср1 в виде каемок, а по зернам Сср2 образует сплошные массы.

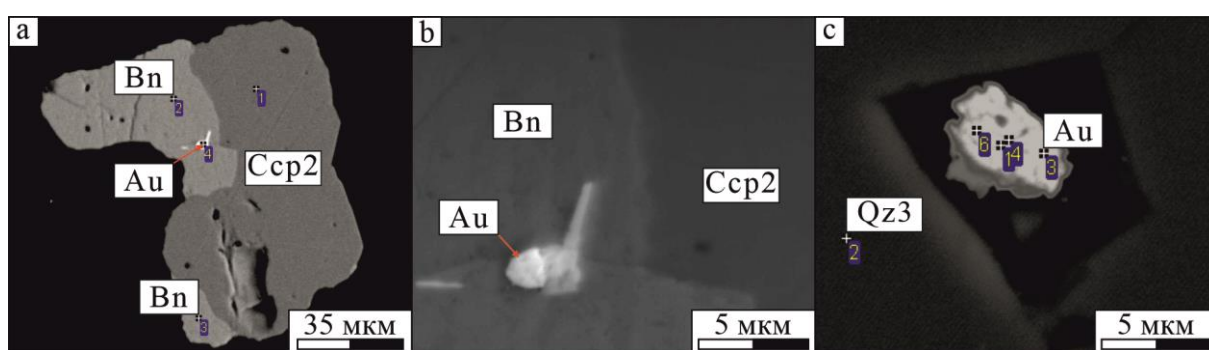


Рисунок 2 – Микроскопические зерна самородного золота неправильной формы: а-б – в ассоциации с халькопиритом второй генерации; б – в околорудных метасоматитах.³

Таблица 1 – Представительные анализы самородного золота, масс. %

Минерал	Fe	Cu	Ag	Au	Total
Самородное золото	-	-	6.12	92.39	98.51
	-	7.09	27.49	63.31	97.89
	1.93	7.81	26.94	59.72	96.39
	-	-	1.59	94.80	96.39
	-	-	-	94.60	94.60
	-	-	3.62	90.83	94.45
	-	-	-	90.37	90.37

4. Выводы

Изучен вещественный состав руд проявления Утанахское и его флангов. Установлены четыре этапа минералообразования: метаморфогенный, метасоматический, гидротермальный и гипергенный. Метаморфогенный этап представлен двумя стадиями: пирротин-халькопирит-магнетитовая и пирит-ильменит-титанитовая; метасоматический – пирит-кварцевая; гидротермальный – пирит-карбонат-кварцевая и золото-полисульфидно-кварцевая; гипергенный – борнит-гётитовая. Установлено, что продуктивной является золото-полисульфидно-кварцевая стадия гидротермального этапа рудообразования, где самородное золото находится в тесной парагенетической ассоциации с халькопиритом второй и кварцем третьей генераций. Пробность самородного золота определена в интервале от 633.1 до 948 ‰, а основной примесью является серебро.

³ Сокращения названий минералов: Au – самородное золото; Bn – борнит; Сср2 – халькопирит второй генерации; Qz3 – кварц третьей генерации.

5. Благодарности

Исследования выполнены по плану НИР ИГАБМ СО РАН, проект № FUFG-2024-0006.

5. Литература:

- [1] Tectonics, geodynamics and metallogeny of the Sakha Republic (Yakutia). - М: МАИК "Наука Interperiodica", 2001. -571 p.

АЛМАЗЫ РОССЫПИ АЭРОДРОМНАЯ КОСА: ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ РОССЫПИ И МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АЛМАЗОВ

Оксана Иванова^{1,2}, Екатерина Линденблот¹, Валентин Афанасьев¹

¹ ФГБУН «Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева»,
630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3

² ФГАОУ ВО «Новосибирский национальный исследовательский государственный
университет», 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

DIAMOND PLACERS OF AERODROMNAYA SPIT: SOURCES OF PLACER SUPPLY AND MINERALOGICAL FEATURES OF DIAMONDS

Oksana Ivanova^{1,2}, Ekaterina Lindenblot¹, Valentin Afanasiev¹

¹ Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3, Akademika Koptyuga ave.,
Novosibirsk, 630090, Russia

² Specialized Educational Scientific Center of Novosibirsk State University, 2, Pirogova str.,
Novosibirsk, 630090, Russia

Abstract. Diamonds of the Aerodromnaya Spit placer were studied. The studies show that the diamonds of the Aerodromnaya Spit placer are polygenic from the point of view of their primary sources. The majority of diamonds belong to the Verkhnemunskoe field, as evidenced by a significant number of diamonds in the placer with catalytic oxidation caverns characteristic of kimberlites of the Verkhnemunskoe field. An admixture of diamonds from unknown sources in the area of the Verkhnemunskoe kimberlite field is probable. Reliably present are "northern" diamonds, the sources of which are not known, and it is possible that these sources are Precambrian. "Northern" diamonds of the Aerodromnaya Spit placer mark the southern boundary of their distribution area.

1. Введение

Россыпь Аэродромная коса – один из заметных фрагментов общей россыпной алмазоносности, связанной с Верхнемунским полем кимберлитов. Однако: а) морфологическое разнообразие алмазов россыпи выходит за рамки морфологического спектра кимберлитов Верхнемунского поля; б) по минералогическим данным в россыпи появляются кимберлитовые минералы, не характерные для поля (обилие пикроильменита, которого мало в кимберлитах поля); в) на ряде алмазов видны достаточно сильно выраженные признаки механического износа, который не характерен для россыпей, связанных с фанерозойскими кимберлитами, но развит на алмазах так называемого «северного» типа, источники которых пока не установлены. По современным представлениям, «северные» алмазы в россыпях связаны с размывом докембрийских отложений в пределах Анабарского щита, Оленекского, Уджинского поднятий который привел к поступлению в современный аллювий алмазов с признаками «древности» из докембрийских россыпных проявлений, вероятно, вендского возраста [1, 2]. Россыпь Аэродромная коса располагается практически на южной границе ареала распространения «северных» алмазов, поэтому особенно важно определить, есть ли в ней алмазы «северного» типа, чтобы выяснить масштабы их распространения, а также изучить эту россыпь с точки зрения дополнительных источников питания, помимо кимберлитов Верхнемунского поля.

Проведено комплексное изучение около 300 кристаллов алмаза россыпи Аэродромная коса, добытых в ходе полевых работ отрядом ИГМ СО РАН в 2010 году. Основные задачи: изучение морфологии алмазов с использованием оптической, сканирующей электронной микроскопии, изучение внутреннего строения алмазов методом катодolumинесценции, изучение дефектно-примесного состава алмазов методами ИК – спектроскопии.

2. Геологическое строение района

Россыпь Аэродромная коса находится на левом борту реки Муна в двух километрах ниже устья реки Улах-Муна, в бассейне которой располагаются кимберлитовые тела Верхнемунского поля (Рисунок 1).

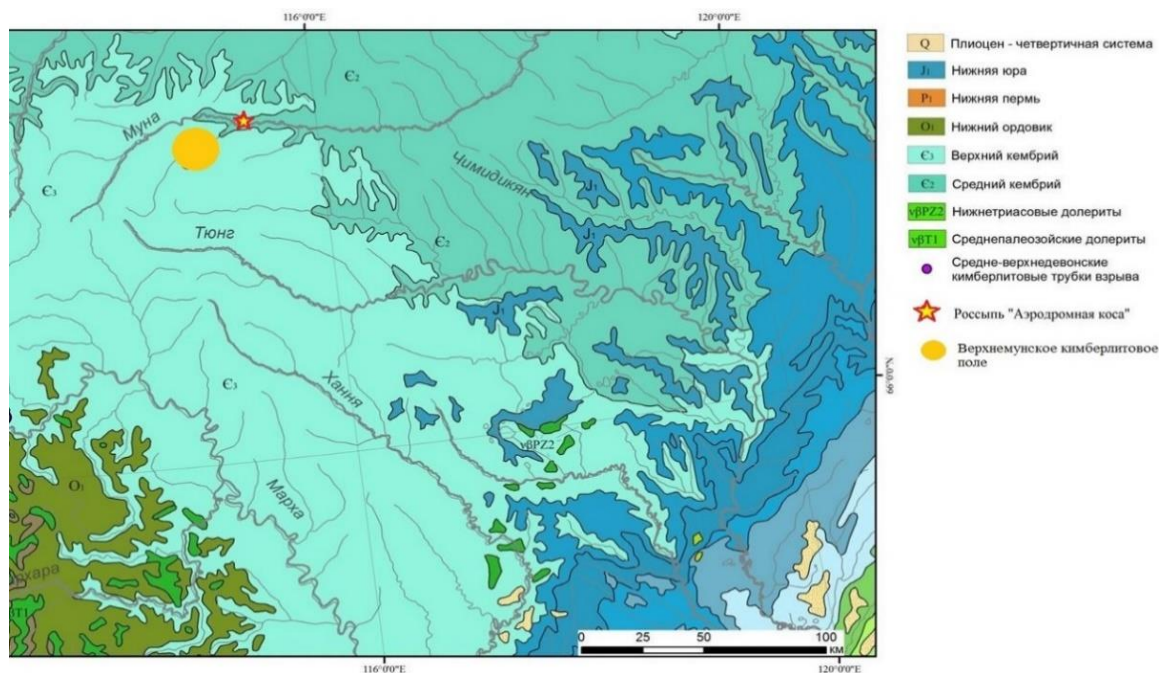


Рисунок 1 – Геологическая позиция Верхнемунского кимберлитового поля и россыпи Аэродромная коса

В современном эрозионном срезе данного участка представлены отложения среднего (силигирская свита) и верхнего кембрия (чукукская свита). Широко развиты неоген-четвертичные отложения. Мощность современных аллювиальных отложений может достигать 15 м. В аллювиальных современных отложениях часто отмечаются минералы кимберлитовых пород (пироп, оливин, хромдиопсид, пикроильменит, хромшпинелид, циркон), включая алмазы.

Суммарная величина эрозионного среза кимберлитов Верхнемунского поля составляет около 500 м. Значительная величина эрозионного среза кимберлитов обусловила и значительную россыпную алмазность. К сожалению, гидравлическая активность водотоков в мезозое – кайнозое привела к «растаскиванию» россыпи вдоль водотоков на значительное расстояние. Россыпь развита в русле реки Улах-Муна, россыпь Аэродромная коса связана с масштабным выносом алмазов с Верхнемунского поля.

3. Результаты исследований

Морфология алмазов россыпи Аэродромная коса была проанализирована с использованием методов и классификации, предложенных Орловым [3]. Россыпь Аэродромная коса показывает большое морфологическое разнообразие. Среди изученных алмазов встречаются октаэдры, шпинелевые двойники, кристаллы переходной формы, ромбододекаэдриды, кубоиды, кристаллы формы «двуликий янус», различные сростки.

Комплекс морфологических исследований позволил разделить изученную коллекцию на алмазы кимберлитового типа (Рисунок 2а-б) и "северного" (Рисунок 2в-г) типа. К кимберлитовому типу были отнесены следующие кристаллы: 1) бесцветные октаэдры, кристаллы переходной формы, кристаллы формы "двуликий Янус", серые кубоиды, а также сростки кристаллов переходной формы и октаэдров (VIII разновидность по Орлову); 2) кристаллы разных форм с кавернами каталитического окисления из трубок Верхнемунского поля; 3) округлые ромбододекаэдриды без механического износа. К «северному» типу (31 кристалл) отнесены: 1) кристаллы V-VII разновидности по Орлову; 2) округлые

скрытоламинарные ромбододекаэдровиды со средней и сильной степенями механического износа.

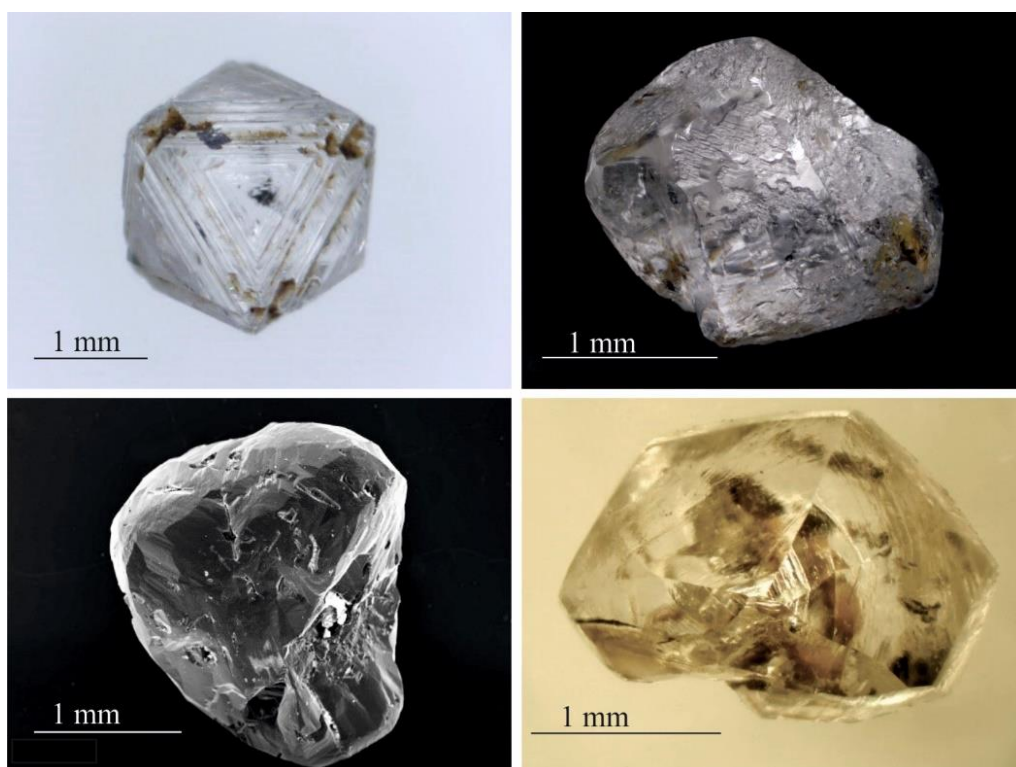


Рисунок 2 – Морфология алмазов из россыпи Аэродромная коса: а) – октаэдр б) – додекаэдровид с кавернами каталитического окисления из кимберлитов, в) – кристалл V разновидности, г) - округлый скрытоламинарный ромбододекаэдровид со средней степенью механического износа.

В таблице 1 показана сравнительная характеристика алмазов россыпи Аэродромная коса и кимберлитов Верхнемунского поля. Последние получены в АК «АЛРОСА».

Таблица 1 – Сравнение алмазов россыпи Аэродромная коса и алмазов Верхнемунского поля

	Аэродромная коса	Верхнемунское поле
Содержание алмазов класса крупности -4+2	54,9% и небольшое содержание алмазов класса крупности -8+4 (5,8%)	не более 3%
Содержание прозрачных алмазов	Преобладание полупрозрачных и непрозрачных кристаллов над прозрачными	Преобладание прозрачных кристаллов в классе -4+2 почти в два раза выше, чем в классах -2+1 мм и -1+0,5 мм
Количество «безазотных» алмазов	5,8 %	15-50%
Содержание алмазов с кавернами каталитического окисления	20,4%	от 25-30%
Количество округлых ромбододекаэдровидов	50%	20-25%

Алмазы из трубок Верхнемунского поля и алмазы россыпи Аэродромная коса несколько различаются. Бросается в глаза более высокая размерность кристаллов россыпи. Известно, что

в россыпях происходит гранулометрическая сортировка и укрупнение, но не в такой сильной степени. При этом гранаты из кимберлитов Верхнемунского поля и гранаты россыпи Аэродромная коса, близкие по плотности к алмазам, практически не различаются по крупности. Значит, увеличение крупности алмазов не могло быть обусловлено лишь гранулометрической сортировкой в процессе россыпеобразования, и, скорее всего, существует привнос алмазов из другого источника. Об этом же говорит и ухудшение прозрачности алмазов из россыпи по сравнению с алмазами Верхнемунского поля. Также о привносе алмазов из иного источника говорит увеличение доли округлых ромбододекаэдров в Аэродромной косе по сравнению с Верхнемунским полем практически в 2 раза. Тем не менее, большинство алмазов принадлежат Верхнемунскому полю, об этом говорит значительное количество в россыпи алмазов с кавернами каталитического окисления, характерными для кимберлитов Верхнемунского поля. Каверны каталитического окисления образуются в результате высокотемпературных постмагматических процессов, на которые указывает присутствие в кимберлитах Верхнемунского поля таких минералов, как хантит $[\text{CaMg}_3(\text{CO}_3)_4]$, таумасит $[\text{Ca}_3\text{Si}(\text{OH})_6(\text{CO}_3)(\text{SO}_4) \cdot 12\text{H}_2\text{O}]$ и волокнистый брусит (немалит) $[\text{Mg}(\text{OH})_2]$. Исследование внутреннего строения методом катодолюминесценции показало, что кристаллы имеют неоднородное строение, обусловленное действием различных механизмов роста, а также неравномерным распределением и составом примесных центров. Изменение цветов по зонам, а также внутри зон указывает на изменение состава примесных центров во время кристаллизации (Рисунок 3а). Отмечено мозаичное строение, обусловленное, возможно, неравномерным распределением структурных примесей (Рисунок 3в). Для некоторых кристаллов характерны полосы пластической деформации в центральных зонах (Рисунок 3а), на периферии (Рисунок 3б) и по всему кристаллу (Рисунок 3в).

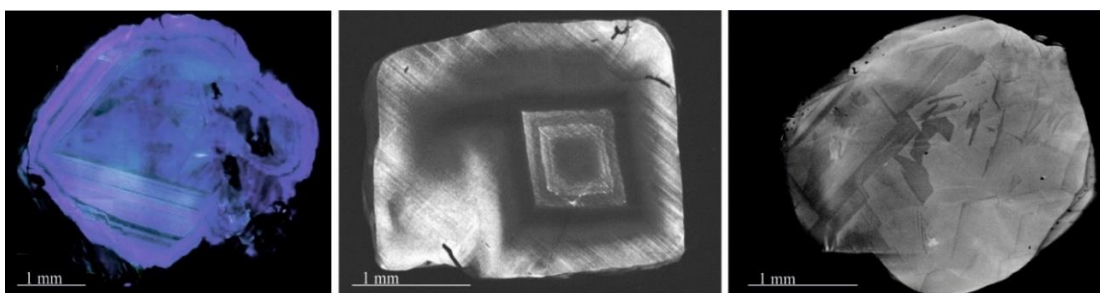


Рисунок 3 – Катодолюминесцентная топограмма:
а) образца 109 б) образца 36 в) образца 294 – мозаичное строение

Дефектно-примесный состав и разнообразие морфологических форм алмаза в большой степени определяются условиями образования (температура, давление, состав среды кристаллизации) [3, 4]. Результаты ИК-спектроскопии показали, что азот в алмазах россыпи Аэродромная коса содержится в форме А, В и В'-центров. Большая часть изученных кристаллов характеризуется низким содержанием азота ($N(\text{tot}) < 100 \text{ ppm}$), небольшая группа алмазов имеет повышенное содержание общего азота (более 1000 ppm) (Рисунок 4).

Выделенные нами алмазы кимберлитового типа имеют невысокие концентрации общего азота. По данным [5, 6] среднее содержание общего азота ($N(\text{tot})$) в алмазах из кимберлитов 400-1000 ppm. Для Верхнемунского поля характерно пониженное содержание азота (среднее содержание $N(\text{tot})=331,2 \text{ ppm}$). В кристаллах "северного" типа отмечается явно повышенное содержание азота. Из 31 кристалла "северного" типа 11 кристаллов имеют концентрации общего азота выше 1000 ppm, 15 кристаллов имеют концентрации от 500 до 1000 ppm и только 5 кристаллов имеют концентрации общего азота ниже 500 ppm (среднее содержание $N(\text{tot})=838 \text{ ppm}$).

4. Выводы

Проведенные исследования показывают полигенность алмазов россыпи Аэродромная коса с точки зрения их коренных источников. Вероятной является примесь алмазов из неизвестных

пока кимберлитов района Верхнемунского кимберлитового поля. Достоверно присутствуют «северные» алмазы, источники которых не известны и, возможно, эти источники являются докембрийскими. «Северные» алмазы россыпи Аэродромная коса отмечают южную границу ареала их распространения.

Исследования с помощью ИК спектроскопии позволили установить в среднем более высокое общее содержание структурной примеси азота в «северных» алмазах в сравнении с кимберлитовыми. Из 31 кристалла, определенного в "северный" тип, у 11 кристаллов содержание общего азота выше 1000ppm.

Картины катодоллюминесценции показывают сложное внутреннее строение кристаллов алмаза, отражающее как ростовую зональность, так и постростовые изменения в форме пластической деформации. Изменение азота по зонам роста говорит о смене условий роста алмазов.

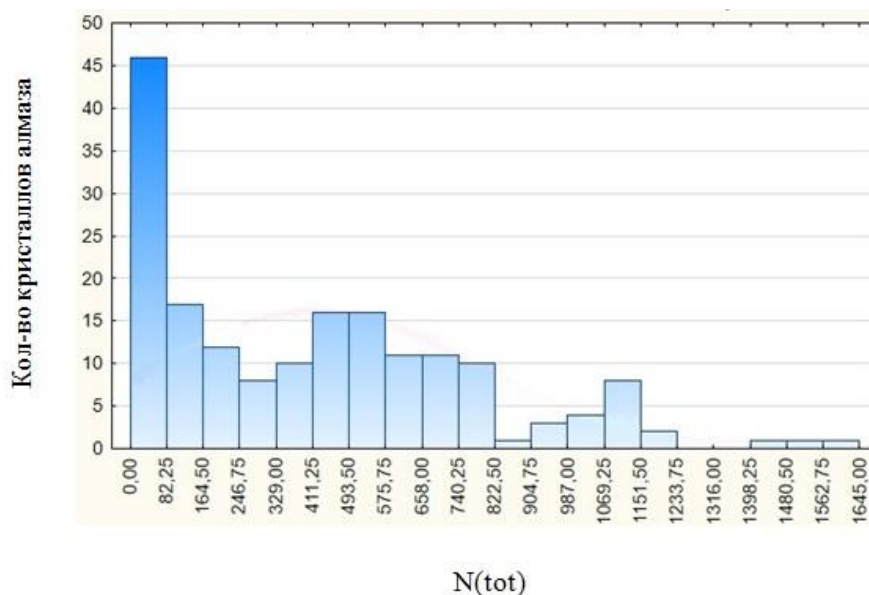


Рисунок 4 – Диаграмма распределения общего содержания азота N(tot) в алмазах россыпи Аэродромная коса

5. Благодарности

Авторы благодарны сотрудникам Аналитического центра многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН (г. Новосибирск, Россия), где проводились аналитические исследования.

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН (№ 122041400157-9).

6. Литература:

- [1] Afanasiev V. P., Pokhilenko N. P. Approaches to the diamond potential of the Siberian craton: A new paradigm // Ore Geology Reviews. - 2022. - Vol. 147. - P. 104980.
- [2] Afanasiev V.P., Zinchuk N.N., Pokhilenko N.P. Prospecting mineralogy of diamond. // Novosibirsk: Academic publishing house "Geo". - 2010. – 650 p.
- [3] Orlov Y.L. The mineralogy of diamond // Wiley & Sons. - 1977. - 235 p.
- [4] Zedgenizov D.A., Harte B., Shatsky V.S., Politov A.A., Rylov G.M., Sobolev N.V. Directional chemical variations in diamonds showing octahedral following cuboid growth // Contr. Miner. Petrol. - 2006. - Vol. 151. - P. 45-57.
- [5] Kaminsky F.V., Khachatryan G.K. Characteristics of nitrogen and other impurities in diamond, as revealed by infrared absorption date // Canadian Minerals. - 2001. - Vol.1. - P. 1733-1745.
- [6] Khachatryan G.K. Typing of diamonds from kimberlites and lamproites by distribution of nitrogen centers in crystals // Ores and Metals. -2010. - Vol. 2. - P. 46-60.

**ИССЛЕДОВАНИЕ БИВНЕЙ МАМОНТА С ПРИМЕНЕНИЕМ
РЕНТГЕНОФАЗОВОГО АНАЛИЗА, ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКОГО
АНАЛИЗА И ИК-СПЕКТРОСКОПИИ**

Татьяна Исакова, Евгения Петухова, Тускул Соловьев, Глеб Ботвин, Вячеслав Петров,
Валерия Павлова, Александр Чириков
ФГБУН ФИЦ «ЯНЦ СО РАН» «Институт проблем нефти и газа СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, ул. Петровского, 2

**STUDY OF MAMMOTH TUSKS USING X-RAY DIFFRACTION ANALYSIS,
THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS AND IR SPECTROSCOPY**

Tatiana Isakova, Evgeniya Petukhova, Tuskul Solovyov, Gleb Botvin, Vyacheslav Petrov,
Valeria Pavlova, Alexander Chirikov
Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, 2, Petrovsky str., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. Studies were carried out using differential thermal analysis (DTA), X-ray diffraction analysis (XDA) and IR spectroscopy of cement and dentin of a number of mammoth tusk (MT) samples. It has been established that hydroxyapatite (HAP) in the composition of MT can be present in different stoichiometric atomic ratios. It was shown that aliphatic groups of collagen are practically absent in the studied samples, which is probably caused by their oxidation under the influence of atmospheric oxygen and during fossilization processes. The DTA method revealed that the cement of the MT is more mineralized and contains a larger amount of low molecular weight organic substances, and dentin contains more moisture and high molecular weight organic compounds.

1. Введение

Бивень мамонта (БМ) – многокомпонентное сложноструктурированное сырье биологического происхождения. Всестороннее исследование БМ как материала, имеющего высокую рыночную стоимость, а также несущего значительный объем данных о жизнедеятельности животного, процессах, протекавших при залегании костных остатков в толщах вечномерзлых отложений, несомненно имеет как значительное прикладное, так и фундаментальное значение. Понимание процессов, связанных с фазовыми и химическими превращениями в БМ при фоссилизации представляется сложным и требует привлечения разнообразных физико-химических методов анализа состава и структуры костных остатков. Такие методы как ИК-спектроскопия, рентгенофазовый и термогравиметрический анализ позволяют получить всестороннюю информацию о составе компонентов БМ, особенностях их минерализации и пр.

2. Основная часть

На макроскопическом уровне БМ состоит из двух частей – цементное вещество и дентин. На рисунке 1 представлен фрагмент поперечно спиля БМ. Внешняя оболочка – цемент, отделена от дентина четко выраженным переходным кольцом. Видно, что дентин на поперечном спиле БМ имеет специфический графический рисунок, характеризующейся чередованием светлых и темных областей. Такая картина в литературе получила название линий или узора Шрегера [1]. Данную особенность БМ используют для того, чтобы отличить БМ от других костных тканей и изделий из них. Следует отметить, что на поверхности поперечного спиля цементного вещества линии Шрегера отсутствуют.

Вещественный состав дентина и цементного вещества схож – как и любые другие костные ткани, БМ представляет собой композиционный материал, состоящий из гидроксиапатита (ГАП), коллагена и воды. Однако, соотношение данных компонентов в цементе и дентине БМ существенно отличается, что обусловлено как условиями их роста при жизни животного, так и условиями залегания в природной среде, после его смерти.

В данной работе выполнено исследование качественного и количественного состава дентина и цемента БМ с использованием различных аналитических методов.

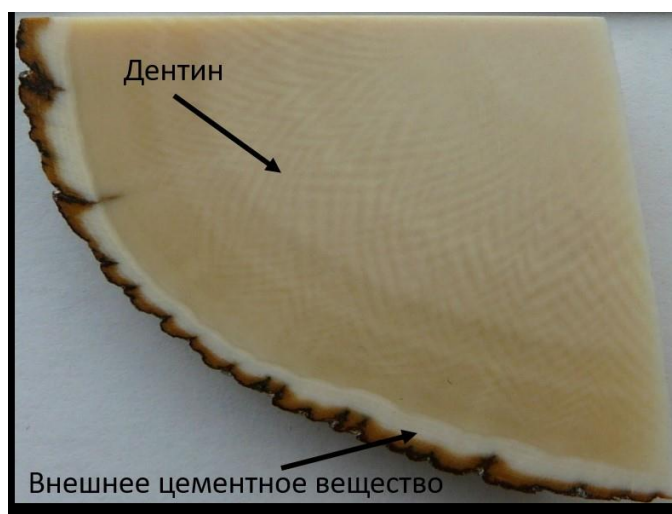


Рисунок 1 – Поперечный спил БМ

Объектами настоящего исследования являлись фрагменты БМ (9 штук), предоставленные Музеем Мамонта РС (Я) им. П.А. Лазарева, хранившиеся в морозильной камере музея в течение $\approx 4-5$ лет при температуре минус 19°C . Образцы характеризовались различным уровнем сохранности и по состоянию их можно отнести к III-IV сорту. Для исследования были изготовлены порошкообразные образцы из дентина и цементного вещества образцов БМ.

Структурные характеристики исследованных образцов и соотношение компонентов в них определяли методами рентгенофазового анализа (РФА), термогравиметрического анализа (ТГА) и ИК-спектроскопии. РФА проведен на дифрактометре D2 PHASER (Bruker, Германия) при следующих условиях: $\text{CuK}\alpha$ -излучение – 30 кВ, 10 мА; интервал $4,5-65^{\circ}$ (2θ). Для идентификации минералов использована база данных PDF-2/Release 2011 RDB. ТГА был выполнен на приборе синхронного термического анализа фирмы NETZSCH – STA 449C Jupiter (Германия). Образцы нагревались в тигле из PtRh со скоростью нагрева $10^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ от комнатной температуры до 1000°C в инертной среде (аргон). ИК-спектроскопическое исследование образцов выполнено на ИК-спектрометре «NicoletProtégé 460» (США). Снятие спектров производилось по стандартной методике на образцах, таблетированных совместно с КВг. ИК-исследования выполнены в области $400-4000\text{ см}^{-1}$.

Ранее проведенный РФА [2], а также литературный обзор [3] показали, что в состав цементного вещества, а зачастую и дентина кроме ГАП входят и другие минеральные вещества. В частности, при РФА анализе одного из образцов БМ на его поверхности был выделен ньюберит, образование которого происходит в условиях кислой среды ($\text{pH} < 6,2$) и высокой влажности в результате диссоциации ионов гидрофосфата и магния [4]. Кроме ньюберита, наиболее часто в составе костных тканей возможно выявить вивианит, метавивианит, сантабарбарейт, струвит, бобьерит и др. Причиной образования метавивианита и сантабарбарейта является окисление вивианита, т.е. по их содержанию можно также косвенно оценить степень выветривания и окисления палеонтологического объекта [5, 6]. В свою очередь, струвит и бобьерит склонны образовываться в условиях высокой влажности при наличии ионов аммония. В качестве источника ионов аммония может выступать, к примеру, органическая часть БМ – коллаген.

В рамках данного исследования методом РФА установлено, что в составе проб присутствует кварц. На рисунке 2 на примере одного из исследованных образцов представлены характерные дифрактограммы дентина и цементного вещества БМ.

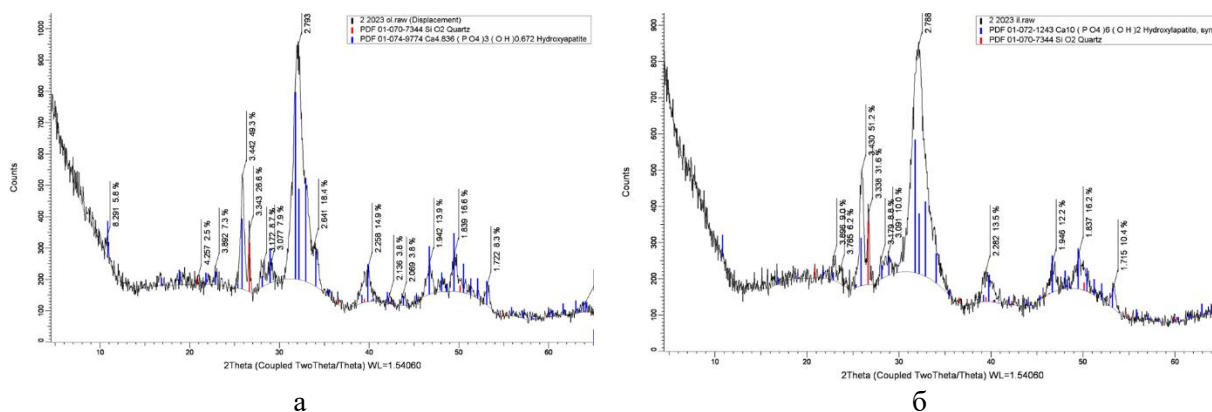


Рисунок 2 – Дифрактограммы образца БМ: а) цементное вещество; б) дентин

Установлено, что ГАП в образцах представлен в 2 стехиометрических видах – тип 1 – $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ и тип 2 – $\text{Ca}_{4,836}(\text{PO}_4)_3(\text{OH})_{0,672}$. ГАП тип 1 является стандартной составляющей костных тканей людей и животных [7]. Нестандартный стехиометрический состав ГАП в других образцах БМ свидетельствует о том, что минеральная составляющая исследуемого объекта в ходе жизнедеятельности животного, а также при залегании в природной среде (вечномерзлых грунтах и после извлечения из них) и при хранении, претерпевает некоторые изменения. В частности, результаты ИК-спектроскопического исследования показали, что ГАП в БМ находится в карбонатзамещенном виде [8], а в работе [2] было показано, что в кристаллической решетке ГАП бивня мамонта присутствуют ионы Mg^{2+} . Наличие кварца в исследуемых образцах может быть обусловлено как протеканием процессов окремнения при фоссилизации, а также механически привнесено в образец из грунтовых отложений.

ИК-спектроскопические исследования цементного вещества и дентина БМ позволили выделить все характеристические полосы поглощения его компонентов (рисунок 3). Согласно [7, 9], характеристические полосы поглощения коллагена проявляются для различных видов амидных группировок. Колебания амида I соответствует полоса при 1652 см^{-1} , амида II – 1544 см^{-1} , амида III – 1241 см^{-1} . Колебания амидов А и В частично перекрываются с полосами поглощения гидроксид-аниона и на спектре представлены полосой при 3747 см^{-1} . Алифатическая часть представлена валентными колебаниями С-Н в группах CH_2 и CH_3 при 2853 и 2924 см^{-1} . ГАП на ИК-спектре представлен колебаниями фосфатной группировки (PO_4^{3-}): наиболее интенсивная полоса получена для антисимметричного валентного колебания Р-О при 1032 см^{-1} , для дважды вырожденных колебаний О-Р-О выявлена полоса при 470 см^{-1} и трижды вырожденных колебаний при 562 и 602 см^{-1} . О том, что ГАП в БМ находится в карбонатзамещенном виде свидетельствуют полосы поглощения валентных колебаний С-О ($\text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{OH}^-$) при 1455 см^{-1} и деформационных колебаний О-С-О полосами при 879 см^{-1} и при 873 см^{-1} характерных при замещении $\text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{PO}_4^{3-}$. Гидроксид-анионы на спектре проявляются в виде деформационных колебаний при 1652 см^{-1} и валентных колебаний при 3339 и 3747 см^{-1} . Вода проявляется на спектре широкой диффузной полосой при 3339 см^{-1} .

Анализ ИК-спектров показал, что полосы поглощения, характерные для валентных колебаний алифатических группировок либо не проявляются на спектрах, либо выражены слабо. Вероятно, полученный результат обусловлен тем, что в процессе длительного хранения алифатическая составляющая коллагена подвергается окислению под воздействием кислорода воздуха, и на спектрах данная полоса проявляется в области колебаний амида I, либо данные группы частично или полностью разрушаются в процессе фоссилизации.

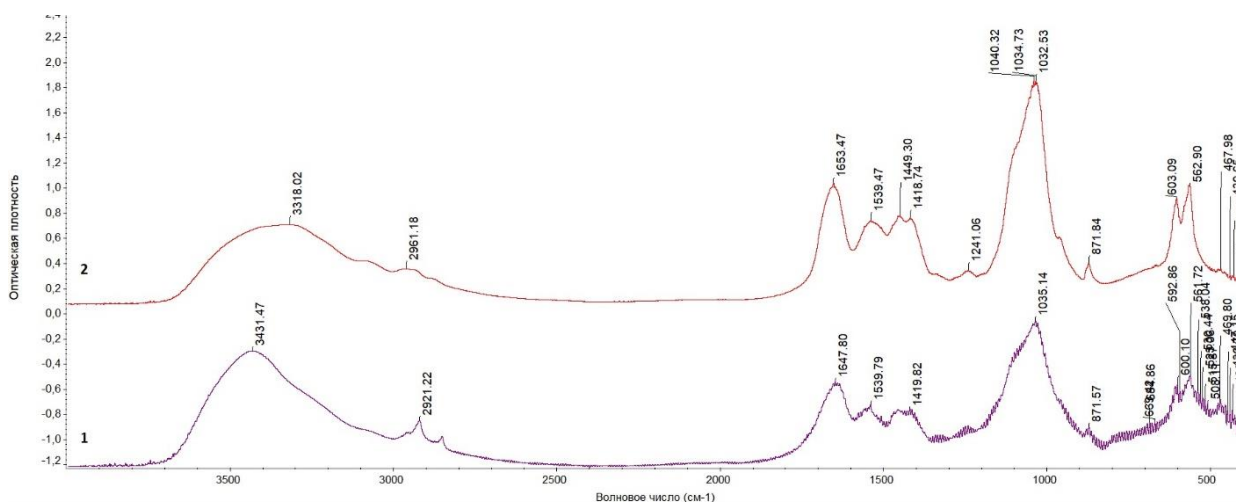


Рисунок 3 – ИК-спектры БМ: 1 – цементное вещество; 2 – дентин

На рисунке 4 представлены характерные термограммы дентина и цементного вещества БМ. Анализ термограмм позволил выделить 5 стадий термического разложения костных тканей БМ: 25-180°C – потеря адсорбированной влаги; 180-300°C – испарению структурной (связанной) молекулярной воды и удалению низкомолекулярных органических веществ, представленных неколлагеновыми белками с малой молекулярной массой; 300-600°C – разложение высокомолекулярных органических соединений (коллаген); 600-750°C – разложение вторичных карбонатных минералов, которые в больших количествах присутствуют в фазах более минерализованной кости; 750-900°C – разложение карбонат-иона, присутствующего в кристаллической решетке апатита (карбонатзамещенного гидроксиапатита) [10].

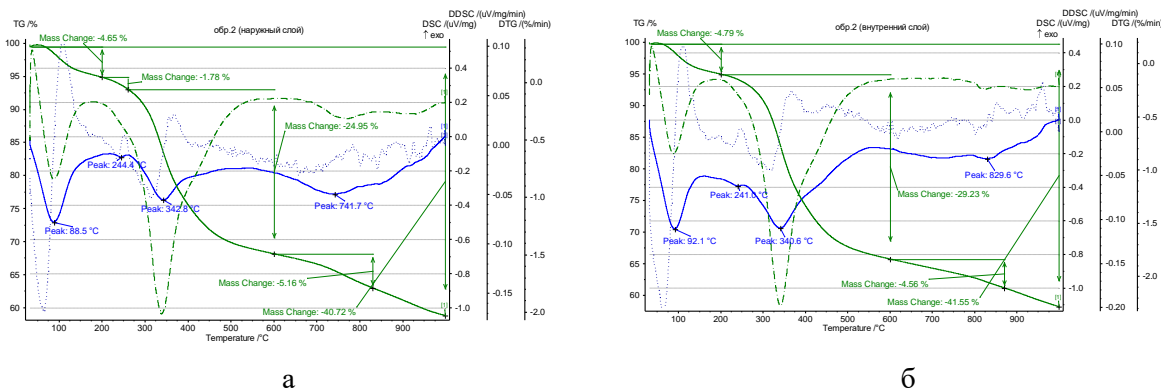


Рисунок 4 – Результаты ТГА образца БМ: а) цементного вещества; б) дентина

Результаты исследования особенностей потери массы в указанных температурных диапазонах, позволили установить, что цементное вещество по сравнению с дентиновой частью БМ характеризуется более высокой степенью минерализации и более высоким содержанием низкомолекулярных органических соединений. В свою очередь, дентин содержит больше адсорбированной внешней влаги и высокомолекулярных органических веществ, чем цементное вещество БМ. Причиной полученного результата может являться то, что в процессе залегания, до разрушения, цементное вещество непосредственно взаимодействует с минеральными составляющими вмещающих пород, в связи с чем, цемент значительно более минерализован. После высвобождения из вмещающих пород, костные ткани постепенно разрушаются, а образовавшиеся трещины и другие дефекты (скалывание, растрескивание вдоль конусов роста и пр.) обеспечивают доступ минеральных веществ из окружающей среды к дентину, вызывая его минерализацию.

3. Выводы

Таким образом, РФА показал, что ГАП в БМ находится в нестандартном стехиометрическом соотношении, что может быть обусловлено протеканием процессов ионного замещения в процессе залегания и хранения БМ. ИК-спектроскопические исследования позволили выявить весь комплекс групп, характерных для различных составляющих БМ. Показано, что алифатические группировки присутствуют не во всех образцах, что свидетельствует об их разрушении в процессе окисления и фоссилизации. Анализ термограмм образцов дентина и цементного БМ вещества позволил выделить 5 основных стадий разложения биоапатита ископаемых костных тканей, связанных с удалением воды, разложением органических и минеральных составляющих. Установлено, что цементное вещество БМ более минерализовано и содержит большее количество низкомолекулярных органических веществ, а дентин содержит больше влаги и высокомолекулярных органических соединений.

4. Благодарности

Выражаем благодарность ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН за возможность проведения исследований на научном оборудовании Центра. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ НИОКТР 122042000008-5.

5. Литература:

- [1] Alberic M., Dean M. N., Gourrier A., Wagermaier W., Dunlop J. W. C., Staude A., Fratzl P., Reiche I. Relation between the Macroscopic Pattern of Elephant Ivory and Its Three-Dimensional Micro-Tubular Network // PloS One, 2017, v. 12, №1. DOI: 10.1371/journal.pone.0166671
- [2] Соловьев Т. М., Петухова Е. С., Ботвин Г. В., Исакова Т. А., Павлова В. В. Анализ состава и структуры бивня мамонта *Mammuthus primigenius* методами термогравиметрического и рентгенофазового анализа // Материаловедение, 2021, № 2, С. 9-12. DOI: 10.31044/1684-579X-2021-0-2-9-12.
- [3] Fleet M.E., Liu X., King P.L. Accommodation of the carbonate ion in apatite: An FTIR and X-ray structure study of crystals synthesized at 2–4 GPa // American Mineralogist, 2004, vol. 89, no 10, pp. 1422-1432.
- [4] Freund A., Eggert G., Kutzke H., Barbier B. On the Occurrence of Magnesium Phosphates on Ivory // Studies in Conservation, 2002, vol. 47(3), pp. 155-160.
- [5] Shen M., Lu Z., Xu Y., He X. Vivianite and Its Oxidation Products in Mammoth Ivory and Their Implications to the Burial Process // ACS Omega, 2021, vol. 6(34), pp. 22284–22291.
- [6] Scott D. A., Eggert G. The vicissitudes of vivianite as pigment and corrosion product // Stud. Conserv, 2013, vol. 52, pp. 3–13.
- [7] Вотяков С.Л., Киселёва Д.В., Щапова Ю.В., Смирнов Н.Г., Садыкова Н.О. Физико-химические характеристики ископаемых костных остатков млекопитающих и проблема оценки их относительного возраста. Ч.2. ИК- и радиоспектроскопия, микроскопия. Екатеринбург: Изд-во «Гошицкий», 2009, 82 с.
- [8] Павлова В.В., Петухова Е.С., Исакова Т.А., Колесова Е.С., Чириков А.А., Протопопов Ф.Ф. Исследование структуры бивня мамонта методом ИК-спектроскопии // Оптика и спектроскопия, 2022, Т.130, №3, С. 369-375. DOI: 10.21883/OS.2022.03.52164.2643-21
- [9] Золотарев В.М., Хлопачев Г.А. Особенности применения методов спектроскопии ИК отражения для исследований в археологии // Оптика и спектроскопия, 2013, Т. 114, № 6, С. 1036-1050.
- [10] Durga R, Jimenez N., Ramanathan S., Suraneni P., Pestle W.J. Use of thermogravimetric analysis to estimate collagen and hydroxyapatite contents in archaeological bone // Journal of Archaeological Science, 2022, v. 145 (4), p. 105644. DOI: 10.1016/j.jas.2022.105644

**НОВЫЕ ИЗОТОПНЫЕ ДАННЫЕ О ВОЗРАСТЕ РУДОНОСНЫХ
МАГМАТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И ОРУДЕНЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО
МЕДНО-МОЛИБДЕНОВОГО РУДОПРОЯВЛЕНИЯ МЫС ПАВЛОВИЧА
(ВИКИНГ) В КОНИ-ПЬЯГИНСКОЙ МИНЕРАГЕНИЧЕСКОЙ ЗОНЕ
(СЕВЕРНОЕ ПРИОХОТЬЕ, МАГАДАНСКАЯ ОБЛАСТЬ)**

Никита Касаткин^{1,2}, Антонина Аленичева¹, Юрий Юрченко¹, Ирина Таловина²

¹ ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт
им. А.П. Карпинского», 199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Средний пр-т В.О., 74

² ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»,
199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия

**NEW ISOTOPIC DATA ON THE AGE OF ORE-BEARING MAGMATIC
COMPLEXES AND MINERALIZATION OF THE PROMISING COPPER-
MOLYBDENUM ORE OCCURRENCE CAPE PAVLOVICH (VIKING) IN THE
KONI-PYAGINSKY MINERAGENIC ZONE (NORTHERN PRIOKHOTYE,
MAGADAN REGION)**

Nikita Kasatkin^{1,2}, Antonina Alenicheva¹, Yuri Yurchenko¹, Irina Talovina²

¹ Karpinsky Russian Geological Research Institute, 74, Sredny av, St. Petersburg, 199106, Russia

² Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 2, 21st Line, Vasilievsky island,
St. Petersburg, 199106, Russia

Abstract. The first results of isotope-chemical and petrological studies of ore-magmatic complexes of the promising copper and molybdenum manifestation of Cape Pavlovich (Viking) in the Magadan region are presented. Copper-molybdenum mineralization is represented by a stockwork of sulfide-quartz veins and molybdenum veins in metasomatically altered porphyritic granodiorites of the intrusive Pavlovich massif. The determination of the U-Pb age of ore-generating granodiorites from local zircons by the SHRIMP method showed a concordant date of 104±1 million years, the Re-Os isochronous age of molybdenum -108.6±0.97 million years. The practical interest in this ore occurrence is determined by the possibility of identifying a new industrial facility of strategically important mineral raw materials based on regional and local control factors of gold-molybdenum-copper-porphyry mineralization of reference deposits (Peschanka, Vernal) of the Baim ore zone associated with the volcanic-plutonic belts of the Pacific folded frame.

1. Введение

Медно-молибденовое проявление Павловича (Викинг) расположено в Магаданской области на полуострове Кони на побережье залива Забияка Охотского моря. Открыто в 1959 г. Карпичевым В.Ф. при проведении геолого-съёмочных работ (ГСР) масштаба 1:200 000. В 1979 г. район проявления был затронут литохимическими поисками по потокам рассеяния масштаба 1:200 000 (Ю.В.Одынец 1980 г.), а в дальнейшем на площади проведены ГСР масштаба 1:50 000 и поиски золото-медно-порфировых проявлений (Скибин Ю.П., 1981, Юдин В.Д., Семенов В.Ф., 1984). В результате работ этих работ выполнена оценка прогнозных ресурсов проявления по категории Р₂: меди – около 290 000 т, молибдена – 14 000 т, серебра - около 290 т при среднем содержании меди 0,24 %, молибдена 0,012 % и серебра 20,4 г/т. Бурение на стадии поисковых работ пяти скважин не показало значительных результатов, что в целом отрицательно повлияло на оценку перспектив данного объекта. Дополнительные детальные исследования на проявлении Павловича с начала 80-х годов прошлого столетия не проводились. В рамках работ по созданию Госгеолкарты-1000/3 листа О-55-Магадан (2021-

2023 гг.) проведен комплекс камеральных, полевых и лабораторных исследований рудно-магматических ассоциаций проявления Павловича (Викинг) с целью уточнения возраста магматических пород и оруденения, уточнения рудно-формационного типа и оценки перспектив. Аналитические исследования (ICP MS; SIMS-SHRIMP по циркону; Re-Os метод изохронного датирования) проводились на базе Центральной лаборатории и Центра изотопных исследований ФБГУ «ВСЕГЕИ».

2. Основной раздел

2.1. Структурно-тектоническая и минерагеническая позиция проявления Павловича определяется его положением в Кони-Пьягинском магматогенном блоке (поднятии) Охотско-Тайгоносской островодужной системы [5], где вскрывается мощный разрез островодужных осадочно-вулканогенных образований от верхнего триаса (нория) до нижнего мела (валанжина). Рудопоявление контролируется Усть-Сигланской очаговой интрузивно-купольной структурой Прибрежной тектоно-магматической зоны, сформированной альб-сеноманскими гранитоидами Прихотского плутонического пояса [6], широко распространенными на побережье Охотского моря. Минерагенический профиль Кони-Пьягинской минерагенической зоны, в которой локализованы проявления Павловича и ряд других рудных объектов (Лора, Анкара, Хаканджа), характеризуется развитием ранне-позднемелового оруденения золото-медно-порфирового и молибден-порфирового типа [3].

2.2. Геология и рудная минерализация. Значительную часть площади проявления занимает крупный интрузивный массив Павловича площадью около 85 км кв, сложенный гранитоидами альб-сеноманского магаданского комплекса. Рудное тело представляет собой штокверк сульфидно-кварцевых жил и прожилков, протяженностью около 2 км, шириной около 300 и высотой 150-200 м, сформировавшийся по метасоматически измененным порфировидным гранодиоритам.

Оруденение проявлено зонами гидротермально-измененных пород, повышенной трещиноватости и лимонитизации, кварц-полевошпатовых, кварц-эпидотовых метасоматитов, кварц-сульфидными с малахитом жилами и прожилками мощностью от 2-3 см до 20 см с вкрапленностью пирита и молибденита. К центру рудного поля пропилитизированные породы сменяются серицит-кварцевыми метасоматитами. Прожилково-вкрапленное оруденение локализуется как в периферических частях штока порфировидных гранитов, так и во вмещающих гранитоидах, подвергшихся сильной метасоматической переработке. Отмечаются участки массивных сульфидных руд, чередующиеся с безрудными или слабооруденелыми интервалами. Молибденит в таких рудах образует крупные чешуйчатые кристаллы диаметром до 5 см. Наиболее интенсивные зоны гидротермально-измененных пород и участки прожилково-жилной медно-молибденовой минерализации приурочены к тектоническим нарушениям северо-западного простирания, обеспечивающим поступление флюидонасыщенных расплавов и циркуляцию постмагматических гидротермальных растворов. Мо-Си проявление Мыс Павловича характеризуется комплексным составом руд, где наряду с основными компонентами - медью и молибденом - присутствуют серебро, вольфрам, теллур, висмут, рений, иногда золото.

2.3. Петрохимическая характеристика и изотопный возраст интрузивных пород и рудной минерализации. Рудогенерирующими для медно-молибденового рудопоявления Павловича являются гранитоиды магаданского комплекса диорит-тоналит-плагиогранитовой формации. Гранитоиды образуют дифференцированный тренд с содержанием SiO₂ от 61,5 до 73,5 мас. %, относятся к нормальному ряду известково-щелочной серии и содержат Na₂O + K₂O от 4,2 до 6,1 мас. %, с преобладанием натрия.

Полученные U-Pb конкордантные даты 104±1 млн лет (MSWD=0.63) по цирконам порфировидных тоналитов массива Павловича и 108.7±1.8 млн лет (MSWD=0.021) кварцевых

диоритов массива Антара Сигланской интрузивно-купольной структуры свидетельствуют о нескольких этапах проявлении альб-сеноманского магматизма Приохотского плутонического пояса, отвечающих фазам внедрения магаданского комплекса, с которым ассоциируют проявления меди и молибдена в Кони-Пьягинской минерагенической зоне. Наиболее раннему этапу отвечает Re-Os изохронный возраст молибденита из проявления Павловича 108.61 ± 0.97 млн лет (Initial $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} = 0.65 \pm 0.12$, MSWD=0.016). Связанный с магматизмом рудообразующий гидротермально-метасоматический процесс так же был длительным и многостадийным, что подтверждается изохронным Re-Os возрастом 99 ± 0.7 млн лет молибденита из Оксинского молибденового проявления [1], локализованного в пределах Магаданского батолита альб-сеноманских гранитоидов магаданского комплекса.

2.4. Для оценки перспектив медно-молибденового проявления Павловича, в 2022 г. обследованы береговые обнажения гранитоидов массива Павловича на протяжении около 2 км, где задокументированы и опробованы зоны гидротермально-измененных пород. В штучных пробах из минерализованных зон установлены повышенные концентрации Cu-0,1%, Mo-0,09%, Ag-1,66 г/т. В отдельных штучных пробах из кварцевой жилы с продуктами окисления меди и крупночешуйчатый молибденитом в зальбандах установлены (ICP-MS) содержания Cu-10,7%, Mo- 0,23%, Ag-142 г/т, Au-0,35 г/т, Bi-23,4 г/т, Te- 5 г/т (табл. 1).

Таблица 1 – Содержание главных рудообразующих компонентов в проявлении Павловича (ICP-MS)

Шифр пробы	Cu, %	Mo, г/т	Bi, г/т	Te, г/т	Au, г/т	Ag, г/т
1	0,18	2,30	1,04	1,89	0,01	3,15
2	0,03	9,46	0,58	0,52	0,00	0,76
3	0,11	91,70	0,59	0,10	0,00	1,66
4	10,73	2320,00	23,40	5,01	0,35	142,00
5	0,35	2070,00	3,63	1,02	0,03	2,41

Стоит отметить, что проявление Мыса Павловича выражается в аномальных геохимических полях по вторичным ореолам рассеяния молибдена (содержания 0,6-6 г/т), что может объясняться значительной глубиной локализации руд (Скибин, 1981).

Проведенная сравнительная характеристика с эталонным объектом – месторождением Песчанка Баимской рудной зоны на Чукотке, ассоциирующей с позднеюрско-раннемеловыми островодужными вулканоплутоническими образованиями [2], позволяет рассматривать проявление Мыс Павловича как перспективное на выявление среднего месторождения медно-молибден-порфировой рудной формации.

3. Выводы

В результате проведенного исследования авторами дана высокая прогнозная оценка проявлению Павловича (Викинг) как объекту, перспективному для выявления месторождения комплексных молибденово-медных руд. Полученные новые данные о U-Pb возрасте по цирконам 104 ± 1 млн лет и Re-Os изохронный возраст по молибдениту 108.61 ± 0.97 млн лет, указывает на связь магматизма с гидротермальными процессами рудообразования. Наличием на проявлении Павловича двух генераций молибденита, ранняя из которых была проанализирована Re-Os методом, указывает на длительность и многостадийность процесса рудообразования, который согласуется с многофазным внедрением батолитов альб-сеноманского Приохотского плутонического пояса, с которыми ассоциируют проявления меди и молибдена в Кони-Пьягинской минерагенической зоне. Сравнительная характеристика проявления Павловича с месторождением Песчанка из Баимской рудной зоны, позволяет прогнозировать среднее по масштабам медно-молибден-порфиоровое с серебром месторождение.

Авторы рекомендуют проведение среднемасштабных геолого-съёмочных работ масштаба 1:200 000-1:50 000 с общими поисками с использованием современных инновационных методов лабораторных исследований для оценки масштабов оруденения, широко применяемых для месторождений медно-молибден-порфирового типа.

4. Благодарности

Исследования выполнены в рамках Государственного задания Федерального агентства по недропользованию от 14.01.2022 г. №049-00018-22-01 по объекту «Создание и подготовка к изданию государственной геологической карты масштаба 1:1 000 000 третьего поколения по группе листов территории Российской Федерации в 2021-2023 годах (листы О-55, 56)».

5. Литература:

- [1] Alenicheva A.A., Akinin V.V., Kolova E.E. [et al.]. New data on the U-Pb age, petrochemical features and metallogenic specialization of magmatic formations in the zone of junction of the Koni-Taigonosky island-arc system and the Okhotsk-Chukchi volcanic-plutonic belt // Petrology and ore bearing of magmatic formations : Materials of a scientific conference dedicated to in memory of Corresponding Member of the USSR Academy of Sciences and RAS G.V. Polyakov and Professor A.G. Vladimirova, Novosibirsk, April 25-29, 2022. – Novosibirsk: Novosibirsk National Research State University, 2022. – p. 12-14. – EDN KZUJSK.
- [2] Chitalin A.F., Nikolaev Yu.N., Baksheev I.A. [et al.]. Porphyry-epithermal systems of the Baim ore zone, Western Chukotka // Smirnov Collection-2016. Problems of mineralogy, economic geology and mineral resources : scientific and Literary almanac / Academician V.I. Smirnov Foundation. Volume Part 1, 2. – Moscow : MAX Press LLC, 2016. – pp. 82-114.
- [3] Kolova E.E. Golden mineralization of the Koni-Pyaginsky metallogenic zone : specialty 25.00.11 "Geology, prospecting and exploration of solid minerals, minerogeny" : abstract of the dissertation for the degree of Candidate of geological and mineralogical sciences / Kolova Elena Evgenievna. – Moscow, 2009. – 24 p.
- [4] Petrographic Code of Russia. Magmatic, metamorphic, metasomatic, impact formations. St. Petersburg: VSEGEI Publishing House, 2009. P. 200.
- [5] Sokolov S.D. Essay on the tectonics of the Northeast Asia. Geotectonics. 2010. No. 6. P. 60–78.
- [6] Shpikerman V.I. State Geological Map sheet P-55. Scale 1:1 000 000. VSEGEI. 2016.

**Ag-СОДЕРЖАЩИЙ ДЖЕРФИШЕРИТ И Те-КАНФИЛЬДИТ
МУРУНСКОГО РУДНОГО УЗЛА (АЛДАНСКИЙ ЩИТ)**

Лариса Кондратьева, Галина Анисимова, Вероника Кардашевская
ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

**Ag-CONTAINING DJEARFISHERITE AND Te-CANFIELDITE
OF THE MURUN ORE CLUSTER (ALDAN SHIELD)**

Larisa Kondratieva, Galina Anisimova, Veronika Kardashevskaja
Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. As a result of new mineralogical studies of the Murun ore cluster, the list of minerals has been expanded. The minerals of bismuth – wittichenite and aikinite, antimony – tennantite-tetrahedrite, tellurium – hessite and Te-canfieldite, tin – kesterite and jeanbandyite were identified. In addition, potassium sulfide – djerfisherite with an atypical admixture of Ag was found. New mineral finds show the amazing far from exhausted potential of the Murun massif, especially with regard to ore mineralization. A characteristic feature of minerals is isomorphism, which is a consequence of the disequilibrium of the conditions of their formation.

1. Введение

Мурун – уникальный природный объект, где обнаружено более 200 минеральных видов, в т.ч. новые, впервые установленные здесь минералы, такие как широко известный чароит, а также даванит, мурунскит, тинаксит, токкоит, франкаменит, олекминскит, одинцовит, таусонит, нунканбахит, владыкинит и фторкарлетонит.

В результате новых минералогических исследований образцов, предоставленных геологами АО «Якутскгеология», проводивших в 2021-2022 годах поисковые работы в пределах Мурунского рудного узла список минералов удалось расширить. Выявлены минералы висмута – виттихенит (Cu_3BiS_3), айкинит ($\text{Pb}_3\text{Bi}_2\text{S}_6$), сурьмы – блеклая руда промежуточного состава, теннантит-тетраэдрит, теллура – гессит (Ag_2Te) и Те-канфильдит ($\text{Ag}_8\text{SnTe}_2\text{S}_4$), олова – кестерит ($\text{Cu}_2(\text{Zn},\text{Fe})\text{SnS}_4$) и джинбандиит ($(\text{Fe},\text{Mn})\text{Sn}(\text{OH})_6$). Кроме того, обнаружен калиевый сульфид – джерфишерит, ранее уже описанный на Муруне [1,2], состав которого характеризуется присутствием нетипичной примеси Ag. Минералогические исследования проведены с помощью поляризационного микроскопа Axioskop 40 фирмы Zeiss и микрозондового сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6480LV.

2. Результаты исследований

Минералы висмута выявлены в эруптивной брекчии (участок Жерловый), виттихенит в виде прожилка в сростании с борнитом среди халькопирита, а также сульфид свинца, висмута и меди, предположительно айкинит (?) в сростании с галенитом (рисунок 1, таблица 1).

В кварц-полевошпатовом метасоматите (участок Андреевский) установлена блеклая руда, развитая в халькопирите вдоль зерен пирита (рисунок 2, таблица 2). Состав блеклой руды нестехиометричный, ее можно отнести к ряду теннантита-тетраэдрита. Фальерц характеризуется маложелезистостью и изоморфными примесями цинка и серебра.

Редкие сульфиды, содержащие К-Сu-Fe, мурунскит ($\text{K}_2\text{Cu}_3\text{FeS}_4$), талкусит ($(\text{K},\text{Tl})_2\text{Cu}_3\text{FeS}_4$) и джерфишерит ($\text{K}_6(\text{Fe},\text{Cu},\text{Ni})_{25}\text{S}_{26}\text{Cl}$) в Мурунском массиве были описаны М.Г.Добровольской [1,2,3].

Джерфишерит впервые был открыт в метеоритах в 1966 году [4]. В настоящее время его находки известны во многих крупных щелочных комплексах. Кроме Мурунского массива

джерфишерит обнаружен в перидотитах Инаглинского массива, в медно-никелевых месторождениях Норильского региона и в кимберлитах Южной Африки и Якутии.

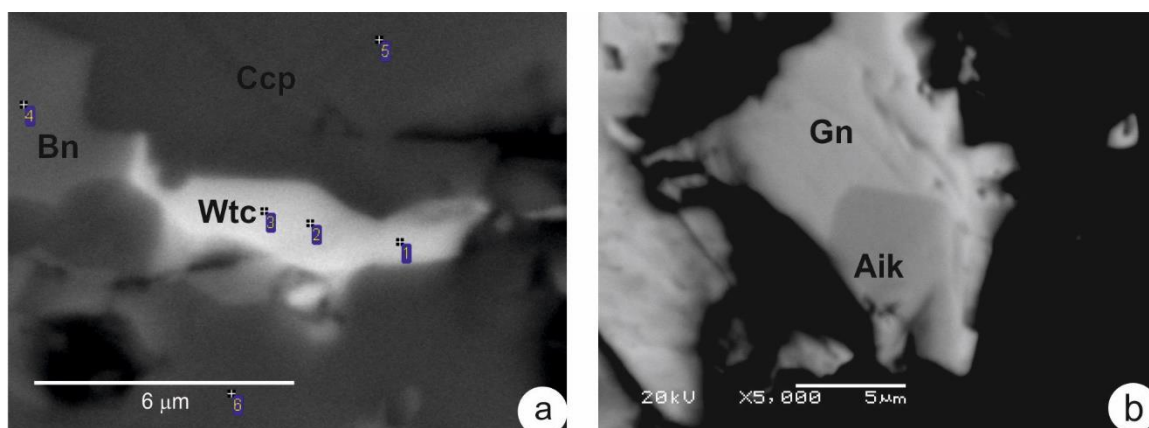


Рисунок 1 – Минерализация висмута. а – виттихенит (Wtc) в борнит (Bn)-халькопиритовой (Ccp) матрице, б – айкинит (Aik) в галените (Gn)

Таблица 1 – Химический состав виттихенита (1-3) и айкинита (4-5)

№№ п/п	№ анализа	S	Fe	Cu	As	Pb	Bi	Сумма
1	2-1	19.58	4.62	36.47			38.87	99.54
2	3-2	20.21	5.68	35.52			37.88	99.28
3	3-3	19.39	4.81	36.59			40.03	100.82
4	16-1	14.73	1.41	9.68		40.24	33.71	99.77
5	16-4	14.98		11.16	0.25	41.53	32.34	100.26

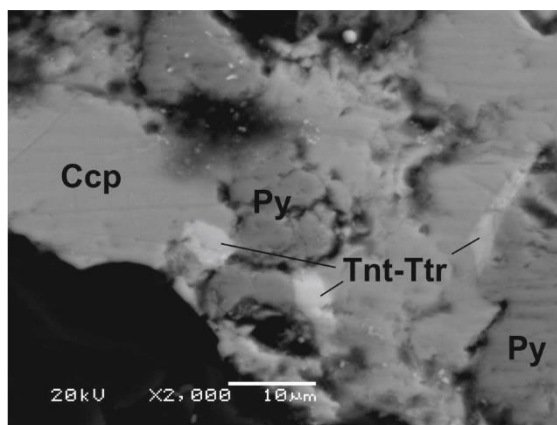


Рисунок 2 – Минерализация теннантита-тетраэдрита (Tnt-Ttr) в пирит (Py)-халькопиритовой (Ccp) матрице

Таблица 2 – Химический состав блеклой руды

№ анализа	S	Fe	Cu	Zn	As	Ag	Sb	Сумма
5-1	25	1.79	36.75	9.28	9.53	5.17	11.46	98.99
5-3	26.91	1.57	34.97	8.41	10.8	7.55	12.31	102.52

Джерфишерит представляет собой сульфид необычного химического состава с относительно постоянным содержанием калия (до 10 %) и различным количеством железа (35.49-51.90%), меди (0.05-15.32%) и никеля (0-19.81%).

Исследователи изоморфизма джерфишерита отмечают изоморфное замещение Fe на Cu и Ni и ограниченное замещение Cu на Ni, K на Na, K на Li. Присутствие Cl в джерфишерите

указывает на изоморфизм между серой и хлором. Анализ накопленных данных о химическом составе джерфишерита из различных сред и метеоритов позволил выявить три разновидности этого сульфида: первая обогащена Fe (до 50 мас.%) в метеоритах, пегматитах Хибинского массива и Cu-Ni месторождениях Норильского региона; вторая обогащена Cu (до 23 мас. %) в щелочных породах; третья обогащена Ni (до 20 мас. %) в кимберлитах [2].

Исследование фазовых соотношений в системе (K,Na)-(Fe,Ni)-Cu-S-H₂O показало, что сульфиды группы щелочных металлов кристаллизовались в неравновесных условиях. Образование сульфидов K-Na в массивах ультращелочных пород связано с постмагматическими процессами калиевого метасоматоза [2].

В Мурунском массиве была описана обогащенная медью разновидность джерфишерита [1]. Особенностью обнаруженного нами калиевого сульфида (участок Жерловый) является значительная примесь серебра от 3,99 до 4,8 мас.%. Ag-содержащий джерфишерит выявлен в виде идиоморфных зерен кремового цвета размером 20-40 мкм среди халькопирита (рисунок 3, таблица 3). Иных минералов, содержащих серебро, в образце не выявлено. Здесь, по-видимому, также имеет место изоморфизм, выраженный в замещении катионов Fe и Cu на Ag.

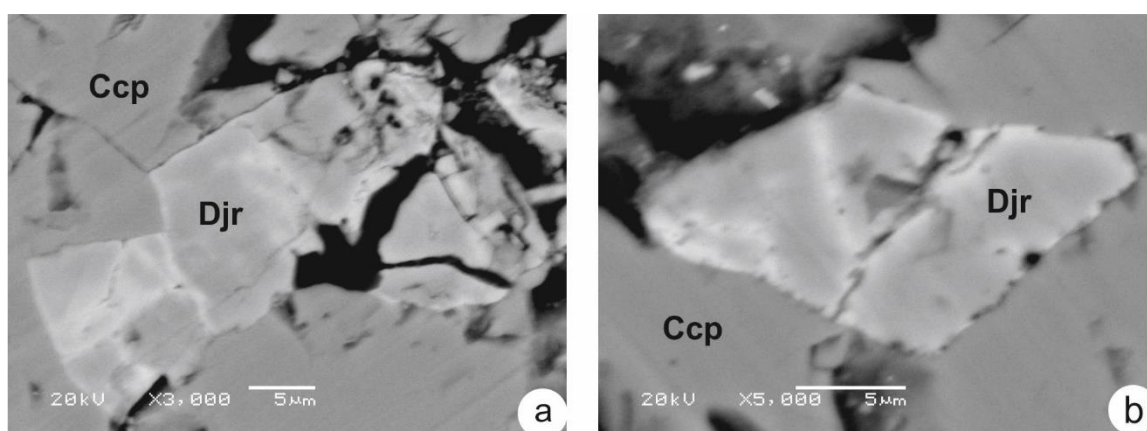


Рисунок 3 – Идиоморфные зерна Ag-содержащего джерфишерита (Djr) среди халькопирита (Ccp)

Таблица 3 – Химический состав Ag-содержащего джерфишерита Мурунского рудного узла и джерфишерита по литературным и интернет данным

№ анализа	S	Cl	K	Fe	Cu	Ni	Ag	Сумма
1-5	32.37	1.72	6.87	32.95	17.86		4.62	96.4
2-5	32.55	1.59	7.33	33.04	18.77		4.41	97.7
3-3	33.06	1.65	7.19	32.29	17.19		4.71	96.1
4-3	32.91	1.43	6.3	31.77	19.4		4.8	96.62
6-1	33.81	1.4	6.66	32.73	17.82		3.99	96.42
Дж ¹	34,40	1,52	8,54	39,98	16,44	0,07		101,04
Дж ²	32,51	1,38	9,15	32,66	18,58	5,72		100
Дж ³	33,34	1,42	9,38	42,43	10,16	2,35		100

¹ джерфишерит из чароититов Мурунского массива по данным [1] содержит также Cr-0,03%; Tl-0,06%.

² джерфишерит по данным <https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/MineralData?mineral=Djerfisherite>

³ джерфишерит по данным <http://www.webmineral.com/data/Djerfisherite.shtml> содержит также Na-0.92%.

Находки канфильдита в Мурунском массиве в качестве акцессорного минерала в щелочных породах были отмечены В.П.Роговой. В результате последних исследований интенсивная минерализация канфильдита со значительным содержанием теллура установлена в эгирин-биотит-полевошпатовой породе (участок Жерловый) (рисунок 4, таблица 4). Те-канфильдит образует ксеноморфные зерна, реже идиоморфные призматические кристаллы размером от

первых мкм до 60 мкм. Сульфотеллурид встречается в сростании с гесситом и галенитом, а также в самостоятельных зернах в жильном матриксе. Часто встречается он среди минералов олова – кестерита и джинбандиита; наблюдались также зерна Те-канфилдита цементирующие флогопит. Отмечается как массивная, так и пористая структура Те-канфилдита.

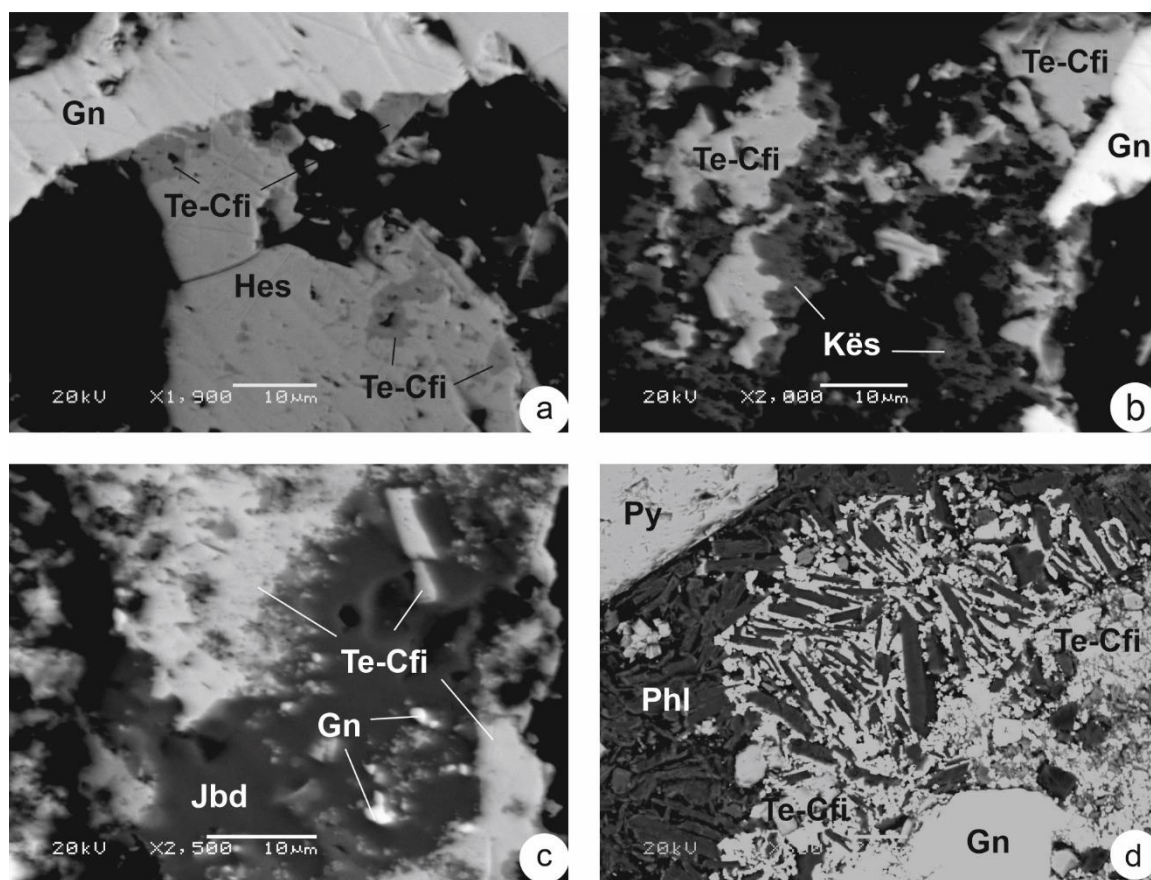


Рисунок 4 – Минерализация Те-канфилдита (Te-Cfi). а – Те-канфилдит в гессите (Hes) и на границе с галенитом (Gn), b – Те-канфилдит в кестерите (Kës), справа зерно галенита (Gn), c – Те-канфилдит и галенит (Gn) в джинбандиите (Jbd) d – Те-канфилдит цементирует зерна флогопита (Phl).

Таблица 4 – Химический состав Те-канфилдита

№ анализа	S	As	Ag	Sn	Te	Сумма
5-9	10.01	2.8	63.51	7.19	17.14	100.65
5-10	8.6		64.23	7.43	18.97	99.23
26-2	8.78		63.95	7.51	19.48	99.72
27-1	9.34		63.94	5.52	19.38	98.19
28-2	9.67		63.48	8	20.11	101.26
2-2	8.87		65.71	7.55	19.27	101.39
2-3	9.29		66.39	8.7	16.34	100.72
4-1	8.5		65.2	8.17	16.46	98.33
7-2	9.29		64.94	7.67	18.19	100.09
9-4	10.94		66.7	6.94	16.31	100.9
11-2	8.88		69.29	5.49	17.17	100.84
15-1	9.2		66.9	6.09	16.89	99.08
17-6	9.26		66.4	7.36	18.42	101.44
19-2	9.29		68.1	7.87	15.9	101.17

Ранее на Алданском щите Те-канфилдит был установлен в рудах Федоровской жильной зоны Лунного Au-U месторождения. Сульфотеллурид образует ангедральные вкрапления в жильном матриксе в ассоциации с пиритом, марказитом, гесситом и названными сульфосолями Ag-Tl [5].

Исследователи недавно открытого сульфотеллурида серебра – ченгуодаита ($\text{Ag}_9\text{FeTe}_2\text{S}_4$) на золоторудном кварцевожильном месторождении Бунан в гранито-гнейсах (Китай), при сравнении его с другими сульфотеллуридами серебра, отмечают особое сходство с канфилдитом и Те-канфилдитом благодаря замещению $\text{Fe}^{3+} + \text{Ag}^+ \rightarrow \text{Sn}^{4+}$ и $2\text{Te}^{2-} \rightarrow 2\text{S}^{2-}$ [6]. Ченгуодаит сосуществует с галенитом, халькопиритом, гесситом, электруммом и названными Ag_6TeS_2 , $\text{Ag}_{16}\text{FeBiTe}_3\text{S}_8$.

3. Выводы

Новые находки минералов висмута, сурьмы, теллура, олова показывают удивительный далеко не исчерпанный потенциал Мурунского массива, особенно в отношении рудной минерализации. Характерной особенностью минералов является изоморфизм, являющийся следствием неравновесности условий их образования.

4. Благодарности

Исследование выполнено за счет государственного задания ИГАБМ СО РАН.

5. Литература:

- [1] Dobrovolskaya M.G., Rogova V.P., Tsepin A.I., Malov V.S. On sulfide mineralization in charoite rocks (Murun massif) // Mineralogicheskij Zhurnal, 1980, 2, 6. pp. 3-13.
- [2] Dobrovolskaya M.G., Nekrasov I.Ya. Phase relations in systems containing alkali metals // Doklady Akademii Nauk SSSR, 1992, 322, 2. pp. 373-377.
- [3] Dobrovolskaya M.G., Tsepin A.I., Evstigneeva T.L., Vyal'sov L.N., Zaozerina A.O. Murunskite, $\text{K}_2\text{Cu}_3\text{FeS}_4$ a new sulfide of potassium, copper, and iron // Zapiski Vsesoyuznogo Mineralogicheskogo Obshchestva, 1981, 110, 4, pp. 468-473.
- [4] Fuchs L.H. Djerfisherite, alkali copper-iron sulfide: A new mineral from enstatite chondrites // Science, 1966, 153, pp. 166-167.
- [5] Novoselov, K.A., Belogub, E.V., Blinov, I.A. Te-canfieldite from ores of the Lunnoe Au-U deposit (Aldan region, Republic Sakha of Yakutia) // Mineralogy, 2019, 5, pp. 49–56.
- [6] Gu X., Watanabe M., Xie X., Peng S., Nakamuta Y., Ohkawa M., Hoshino K., Ohsumi K., Shibata Y. Chenguodaite ($\text{Ag}_9\text{FeTe}_2\text{S}_4$): a new tellurosulfide mineral from the gold district of East Shandong Peninsula, China // Chinese Science Bulletin, 2008, 53, pp. 3567-3573.

ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ ОРЕОЛЫ СТРУКТУР ДИАТРЕМОВОЙ АССОЦИАЦИИ

Константин Константинов¹, Михаил Томшин², Максим Хороших³

¹ Институт «Сибирская школа геонаук», ФГБОУ ВО «Иркутский национально-исследовательский технический университет», 664074, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 83

² ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН», 677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

³ АО «Южно-Верхоянская горнодобывающая компания», 677000, Россия, г. Якутск, ул. Дзержинского, 23

PETROPHYSICAL AUREOLES OF DIATREME ASSOCIATION STRUCTURES

Konstantin Konstantinov¹, Mikhail Tomshin², Maxim Khoroshikh³

¹ Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov str., Irkutsk, 664074, Russia

² Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia,

³ JSC «Yuzhno-Verkhoyanskaya Mining Company», 23, Dzerzhinsky str., Yakutsk, 677000, Russia

Abstract. Petro- and paleomagnetic studies of Early Paleozoic rocks of carbonate basement of a number of diamond deposits in the Yakutsk diamondiferous province were carried out to study changes in the values of petrophysical parameters in the zone of dynamic influence of a kimberlite pipe. It is shown that during the formation of kimberlite diatremes accompanied by pulsational, upward-shifting explosions, thermoelastic stress fields characterized by epigenetic changes and related petrophysical aureoles appear in the kimberlite-bearing medium. Naturally, some of these petrophysical aureoles are petromagnetic heterogeneities of burning and stress, within which kimberlite-bearing rocks have contrastingly changed their original magnetic characteristics under the action of thermodynamic processes. Generally, petromagnetic aureoles are reflected in the changing nature of anisotropy magnetic susceptibility: from sedimentary to dyke geotype. In addition, petromagnetic magnetic susceptibility aureoles are accompanied by the formation of metachronous natural residual magnetization vectors in kimberlite-bearing rocks. The size of petromagnetic aureoles (petromagnetic heterogeneities) may significantly exceed the size of the kimberlite pipe itself, which helps to identify and delineate the most promising areas. In addition, the magnetoseismic effect can create zones near kimberlite bodies that are difficult to penetrate for relatively viscous, protocystal-rich basite magmas. This explains their wedging out along petrophysical barriers: splitting into low-power "tongues", formation of trap-free "windows" and "corridors", toroidal shafts with sharply increasing thickness in intrusions, etc. Having relatively elevated values of magnetic and density parameters, such magmatic formations will be reflected in the observed geophysical fields. Thus, it is reasonable to consider petromagnetic aureoles as one of the important petrophysical search criteria for the detection of indigenous kimberlite bodies.

1. Введение

По своей природе петрофизические ореолы (ПФО) аналогичны первичным геохимическим ореолам [1]. Окружающие (вмещающие) рудные тела эпигенетически измененные горные породы могут менять не только свои исходные минералогический, химический и пр. составы, но и физические свойства (плотность, намагниченность, проводимость и т. п.). Благодаря этому возникают ПФО (петрофизические неоднородности (аномалии) – ПФН(А)) – это часть геологического пространства, один из важных таксонов петрофизической модели (ПФМ) [2], в котором наблюдаются изменения первоначальных физических характеристик горных пород в

результате воздействия различных физико-химических процессов [3, 4]. Их (ПФО) вещественная регистрация является актуальным для разработки ПФМ и выбора, на ее основе, соответствующего физическим эффектам оптимального комплекса геофизических методов поисков месторождений полезных ископаемых. В этой связи необходимо установить практическую возможность некоторых из петрофизических параметров по обнаружению ПФН(А) околотрубочного пространства и связанных с ним потенциальных геофизических полей. Таким образом, цель проведенных исследований заключается в повышении качества поисковых геолого-геофизических работ на основе изучения ПФН(А). Основная задача заключается в выборе петрофизических методов, способных фиксировать тонкие изменения значений физических параметров кимберлитовмещающих пород.

2. Аналитические и экспериментальные работы

С начала алмазопроисловых работ в ЯАП постоянно ведутся петрофизические исследования всех структурно-вещественных комплексов и, в т. ч., вмещающих кимберлиты терригенно-карбонатных пород [5]. В основном, представления о физических свойствах горных пород получены в ходе геофизических исследований скважин (каротаж), лабораторных измерений керна и образцов, отобранных в ходе геологических маршрутов. В комплекс изучения физических свойств горных пород входят измерения объемной плотности, магнитной восприимчивости, естественной остаточной намагниченности, удельного электрического сопротивления, проводимости, радиоактивности и др.

В процессе проведения петрофизических исследований структурно-вещественных комплексов ЯАП собран уникальный материал по магнитным свойствам горных пород. Для изучения этих параметров использовались ориентированные в современной системе координат образцы, которые отбирались из горных пород с ненарушенными элементами залегания в естественных и искусственных обнажениях. Опыт петрофизических работ показал, что первичные измерения тех или иных физических параметров не всегда подходят для решения поставленной задачи, что объясняется их большой дисперсией. Поэтому нам следует остановиться на прецизионных методах, которые позволяют однозначно интерпретировать полученные материалы и, в то же время, являются высокопроизводительными. К ним можно отнести следующие магнитометрические анализы [6], которые вполне реально выполнять в производственных условиях:

1. Анизотропия магнитной восприимчивости (АМВ) [7]. Несмотря на то, что измерение магнитной восприимчивости (α) входит в комплекс методов каротажа поисковых скважин, ее анизотропия ранее не изучалась. Метод изучения АМВ может быть востребован для измерения петроструктуры горных пород с целью определения их происхождения и эволюции.

2. Измерения векторов естественной остаточной намагниченности (ЕОН, I_n) для решения вопросов возраста и природы намагниченности горных пород.

В общем, предложенные АМВ и палеомагнитные методы позволяют установить для кимберлитовмещающих пород, соответственно, изменение петроструктуры и относительное время проявления наложенных процессов.

В ходе многолетних петрофизических исследований для кимберлитовмещающих образований раннего-среднего палеозоя ЯАП основным минералом-носителем намагниченности является гематит с точками Кюри $650 \div 670$ °С.

В процессе изучения АМВ горных пород получен материал, который может иметь прикладное значение. Например, на участке р. Ыгыатта изучены четыре обнажения (с обн.10-24 по обн.10-27), сложенные алевропесчаниками аппаинской свиты позднего девона (рисунок 1). Видимых интрузивных образований в их пределах не установлено, хотя не исключено их более широкое развитие на территории в прошлом. Тем не менее, в обн.10-24 установлен классический осадочный геотип АМВ: $T \rightarrow 1, F \gg L$ (рисунок 2 А); в обн.10-25 – осадочный геотип АМВ сохраняется, но показатели (Т, F и L) ниже (рисунок 2 Б); в обн.10-26 – классический даечный геотип АМВ с северо-западным простиранием плоскости магнитного расслоения (рисунок 2 В);

в обн.10-27 – гибридный геотип АМВ (рисунок 2 Г). Одновременно с этим меняется объемная плотность σ_{cp} алевро-песчаников, соответственно: 1983, 2526, 2676 и 2432 кг/м³. Повышенному значению плотности в обн.10-26 соответствует даечный геотип АМВ. Возможно, что аномальное поведение АМВ в районе обн.10-26 образовано магнитоупругим (сейсмомангнитным) эффектом, связанным с внедрением какого-то слепого плутонического тела (дайки или трубки). В этой связи, на этом участке необходимо провести дополнительные поисковые геолого-геофизические работы.

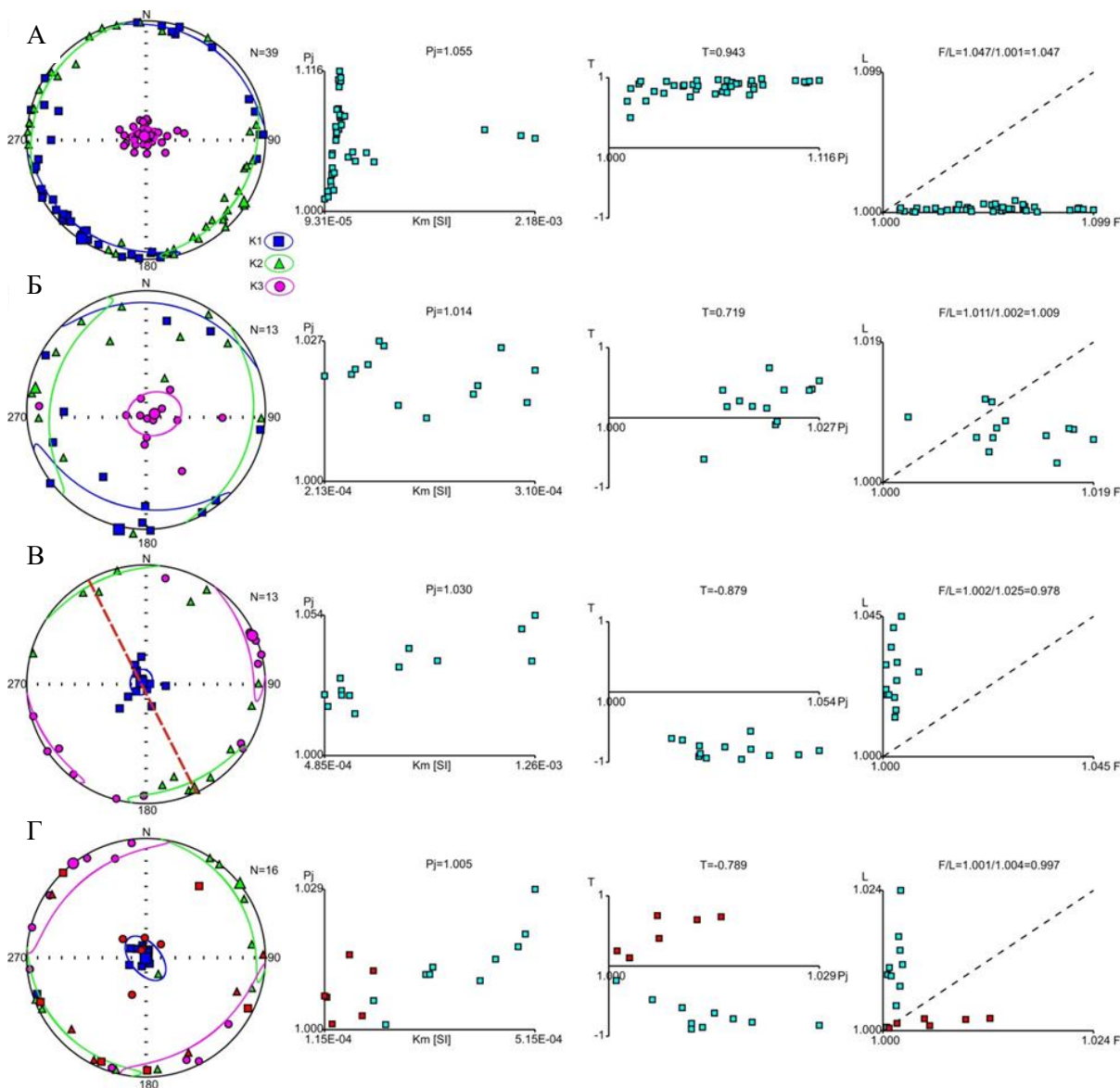


Рисунок 1 – Изменения геотипов АМВ алевро-песчаников аппаинской свиты р. Ыгыатга, ЯАП.
А - обн.10-24, Б – обн.10-25, В – обн.10-26, Г - обн.10-27.

Палеомагнитные данные по месторождению трубки Нюрбинская выделяют несколько характеристических компонент векторов ЕОН. Для вмещающих пород карбонатного цоколя характерна компонента *Hm*, носителем которой является гематит. Следы метакронных компонент *M* (Тк от 450 до 500 °С) и *P* (≈ 350 °С) относительно поздних тектономагматических процессов сохранились в кимберлитовмещающих породах и свидетельствуют о существенном влиянии процессов кимберлитовнедрения (рисунок 2) [7].

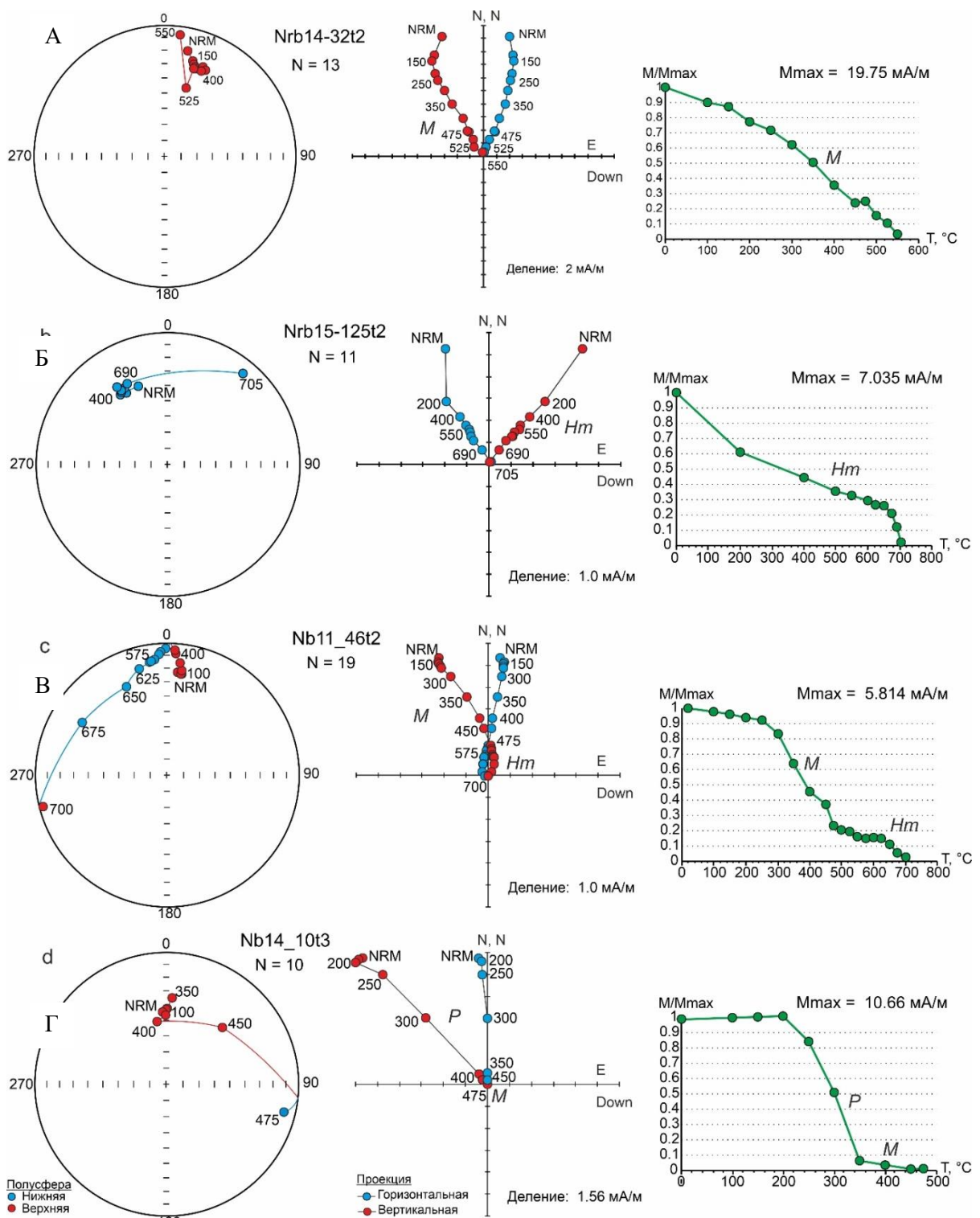


Рисунок 2 – Изучение компонентного состава ЕОН кимберлитов (А) и вмещающих пород (Б - Г) трубки Нюрбинская (гематитовая *Hm* – первичная, магнетитовая *M* и пирротиновая *P* - метасинхронные)

Проведенные исследования установили, что в терригенно-осадочных образованиях вокруг кимберлитовых трубок формируются не только ПОР химических элементов и минералов, но и «первичные ореолы» изменения петрофизических параметров. В ходе специальных петро- и палеомагнитных исследований было наглядно показано влияние давления и температуры на окружающее кимберлитовые трубки терригенно-осадочные образования. Смена АМВ с «осадочного» геотипа на «гибридный» или «дачный» как раз и является следствием термоупругих напряжений и связанного с ними сейсмомагнитного (тектономагнитного)

эффекта. Термоупругие напряжения, в зависимости от компетентности литологического разреза, могут распространяться на разные расстояния от кимберлитовой трубки. Эти напряжения также будут сопровождаться изменениями магнитной текстуры и структуры, которые надежно регистрируются в образцах в отличие от значений объемной плотности. ПФН(А) постепенно исчезают и переходят в «стерильные» («фоновые») образования. Этот количественный переход (зависит от технических возможностей аппаратуры) от «аномальных» к «фоновым» является «петрофизическим барьером», который можно наблюдать на микро- или наноуровнях. Первые, как результат инфильтрации и консервации флюидов во вмещающие породы могут так же регистрироваться при литохимических поисках. Вторые, характеризуются более тонкими эффектами, и поэтому могут распространяться на значительно более существенные расстояния, по сравнению с первыми.

С другой стороны ПФН(А) стресса, могут создавать плотностные барьеры во вмещающих породах, на которые чутко реагируют и более молодые магматические образования. Известны многочисленные случаи [8], когда вблизи кимберлитов в силлах долеритов происходит резкое, двух-, трехкратное увеличение их мощности, изменение своего первоначально горизонтального залегания с задираньем вверх, могут сминаться («гормошится») и щепиться на маломощные «языки», а в особых случаях образуют «трапповые окна» и даже «трапповые коридоры» (рисунок 3).

3. Выводы

1. При формировании кимберлитовых диатрем в кимберлитовмещающей среде возникают поля термоупругих напряжений и, связанными с ними, ПФО обжига и/или стресса.
2. ПМН(А) в кимберлитовмещающих породах будут отражаться в изменении характера АМВ (от осадочного до даечного геотипа) и наличием векторов метасинхронной ЕОН термо-, пьезоостаточной и т.п. природы.
3. Благодаря магнитоупругому эффекту вблизи кимберлитовых тел образуются зоны труднопроницаемые для базитовых магм. Это объясняет их выклинивание вдоль петрофизических барьеров: расщепление на маломощные «языки», образование безтрапповых «окон» и «коридоров», торообразных валов с резко возрастающей в интрузивах мощностью и т. п. Такие магматические образования будут отражаться в наблюдаемых геофизических полях характерными аномалиями.

Таким образом, ПФО целесообразно рассматривать в качестве одного из важного петрофизического поискового критерия обнаружения коренных кимберлитовых тел.

Таблица 1 – Значения петрофизических параметров, принятых для построения ПФМ (см. рис. 3)

№ условного обозначения	Тип пород	σ , кг/м ³	α , 10 ⁻⁵ СИ	I_n , 10 ⁻³ А/м	D , °	J , °	Q , ед.
1	вмещающие породы	2670		практически не магнитные			
2	кимберлиты	2550	100	40	350	70	0.6
3	долериты 2 фазы	2950	1000	2500	50	70	4.0
4	долериты 3 фазы	3000	1200	920	270	-70	1.5
5	ПМН 2 типа (обжига)	2950	1000	500	300	-10	0.8

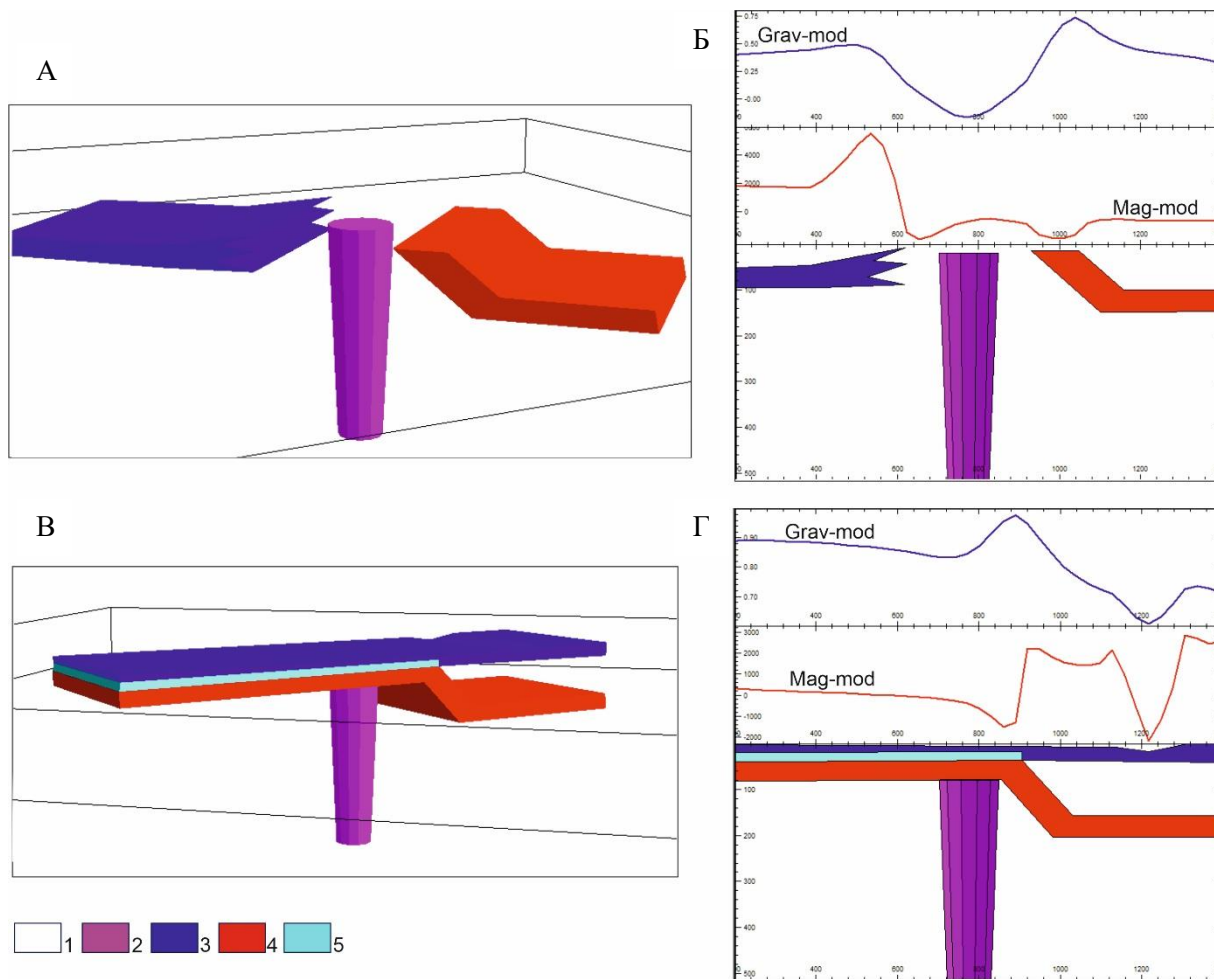


Рисунок 3 – Физико-геологические 3D модели поведения траппов вблизи кимберлитовых трубок: А, В – перспектива; Б, Г – разрезы. Условные обозначения: 1 - вмещающие породы, 2 - кимберлиты; 3 - долериты 2 фазы, 4 - долериты 3 фазы, 5 - ПМН 2 типа (обжига). Для расчета гравимагнитного эффекта использовались значения из табл.

5. Литература:

- [1] Ворошилов В.Г. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых: учебное пособие / Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 104 с.
- [2] Вахромеев Г.С., Давыденко А.Ю. Моделирование в разведочной геофизике. М.: Недра, 1987, 194 с.
- [3] Константинов К.М., Мишенин С.Г, Томшин М.Д., Корнилова В.П., Ковальчук О.Е. Петромагнитные неоднородности пермотриасовых траппов Далдыно-Алакитского алмазоносного района (Западная Якутия) / Литосфера, 2014. № 2. С. 77–98.
- [4] Константинов И.К., Константинов К.М., Хороших М.С., Киргуев А.А., Орлова Г.В. Анизотропия магнитной восприимчивости петромагнитных неоднородностей зон обжига и стресса осадочных и магматических горных пород. Геофизика, 2023, № 4. – С. 41-49.
- [5] Зинчук Н.Н., Бондаренко А.Т., Гарат М.Н. Петрофизика кимберлитов и вмещающих пород. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. – 695 с.
- [6] Шолпо Л.Е. Использование магнетизма горных пород для решения геологических задач. Л., Недра, 1977. – 182 с.
- [7] Konstantinov K.M., Yakovlev A.A. et al., 2017. Petro- and paleomagnetic characteristics of the structural–material complexes of the diamond mining of the Nyurbinskaya pipe (Middle Markha district, West Yakutia). *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (1), 135–169. doi:10.5800/GT-2017-8-1-0235.

- [8] Никулин В. И., Лелюх М. И., Фон-дер-Флаасс Г.С. Алмазопрогностика (методическое пособие). – Иркутск: 2002. – 320 с.

**БЛАГОРОДНОМЕТАЛЬНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ И РТ-ПАРАМЕТРЫ
ОБРАЗОВАНИЯ Au-Mo-Cu-ПОРФИРОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ АК-СУГ
(ВОСТОЧНЫЙ САЯН)**

Ренат Кужугет¹, Наталья Анкушева²

¹ ФГБУН «Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН», 667007, Россия, г. Кызыл, ул. Интернациональная, 117а

² ФГБУН «Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии» УрО РАН, 456317, Россия, г. Миасс, тер. Ильменский заповедник

**NOBLE METAL MINERALIZATION AND PT-PARAMETERS OF FORMATION
OF THE AK-SUG PORPHYRY Au-Mo-Cu DEPOSIT (EASTERN SAYAN)**

Renat Kuzhuget¹, Natalia Ankusheva²

¹Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS, 117a, Internatsionalnaya str., Kyzyl, 667007, Russia

²Federal State Budgetary Institution of Science South Urals Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Ilmensky Reserve, Miass, 456317 Russia

Abstract. Ore mineralization of the Ak-Sug porphyry Au-Mo-Cu deposit formed during three stages: 1) porphyry-copper mineralization with simple sulfides in quartz-sericite and quartz-sericite-chlorite metasomatites, 2) subepithermal Au-Bi-Te-Pd-quartz mineralization in quartz-sericite metasomatites, and 3) intermediate-sulfidation Au-Ag mineral assemblages with selenides, tellurides, and Sb and As sulfosalts in argillites. The Ak-Sug deposit exhibits the features of the evolution of mineral assemblages, temperatures, composition, and fluid salinity during the transition from porphyry copper to the epithermal stage. At the early stages of the ore-forming process, the fluid was magmatic, whereas the later stages involved meteoric waters and the composition of the fluid transformed from high-saline (up to 32.9 wt % NaCl eq) CO₂-aqueous-chloride to aqueous-chloride (from 7 to 1.4 wt % NaCl eq) with Na, K, and Mg carbonates and sulfates. A wide diversity of Au-Ag minerals of subepithermal and epithermal mineral assemblages is caused by variations in fS₂, fSe₂, and fTe₂.

1. Введение

Медно-порфировые месторождения служат источником большого количества Cu, Mo и Re, а также они содержат значимые количества Au, Ag и ЭПГ. Они образуются в различных геодинамических обстановках: субдукционных, постсубдукционных, коллизионных и постколлизионных [1–3]. Медно-порфировые месторождения могут совмещать Au-Ag эпитермальные, полиметаллические (Zn-Cu-Pb-Ag±Au) и другие типы оруденения, которые могут быть производными единой порфирово-эпитермальной рудно-магматической системы (telescoped porphyry Cu system) [1].

В региональном плане Аксугский рудный узел локализован в Саяно-Тувинском сегменте северной части Центрально-Азиатского орогенного пояса и представляет собой аккреционно-коллизионную структуру, возникшую при геодинамической эволюции и закрытии Палеоазиатского океана [4]. В Ак-Сугском рудном узле, кроме одноименного месторождения, выявлено несколько медно-порфировых рудопроявлений в интрузивных породах Ак-Сугского комплекса (С₁ак) – Кадырой, Гребешковый, Даштыг и др., эпитермального Au-Ag intermediate sulfidation (IS) типа в гидротермально-изменённых нижнекембрийских эффузивно-осадочных породах – жильное рудопроявление Биче-Кадыр-Оос [5].

Возраст рудоносных порфиров Ак-Сугского Au-Mo-Cu-порфирового месторождения (U-Pb-датировка (циркона) интрузий от 515±4 до 499±6 млн лет [6], Re-Os-датировка (молибденита)

518, 517, 516 и 511 млн лет [7]) позволили предположить, что Au-Mo-Cu оруденение сформировалось в период геодинамического перехода от островодужного (570–518 млн лет) к аккреционно-коллизийному (510–450 млн лет) режиму.

Месторождение Ак-Суг расположено на южном склоне Восточного Саяна в зоне сопряжения докембрийских и раннекаледонских структур Кандатского разлома. Оруденение приурочено к Ак-Сугскому плутону, который локализован на пересечении Даштыгойского грабена СЗ направления с зоной трещиноватости субширотного Ак-Сугского разлома. Плутон сложен среднезернистыми породами (габброиды, диориты, тоналиты), вмещающими штоко- и дайкообразные тела (малые интрузии, рудоносный комплекс) порфировых пород, с которыми ассоциирует Cu-Mo оруденение.

2. Результаты

Золото-молибден-медно-порфировое оруденение месторождения Ак-Суг сопровождается ореолами гидротермально измененных пород, развитых по рудоносным порфирам и вмещающим гранитоидам. Метасоматическая зональность Ак-Суг согласуется с типовой зональностью метасоматической колонки медно-порфирового месторождения. Для месторождения Ак-Суг установлено, что рудная минерализация отлагалась в три этапа. В первый этап формировалось медно-порфировое оруденение с минеральными ассоциациями простых сульфидов (пирит, халькопирит, борнит, молибденит, галенит, сфалерит) в кварц-серицитовых и кварц-серицит-хлоритовых метасоматитах. Во второй этап отлагалась золото-висмута-теллуридно-палладиево-кварцевая субэпитемальная минерализация с халькопиритом, энаргитом, борнитом, пиритом, гесситом, золотом, электрумом, клаусталитом, S-кавацулитом, Se-тетрадимитом, Bi-теннантитом (до 15 мас. % Bi), меренскиитом $PdTe_2$, сопчеитом $Ag_4Pd_3Te_4$, темагамитом Pd_3HgTe_3 , арсенопалладинитом Pd_8As_3 , сульфовисмутитами Cu и Pb в кварц-серицитовых метасоматитах (Рисунок 1).

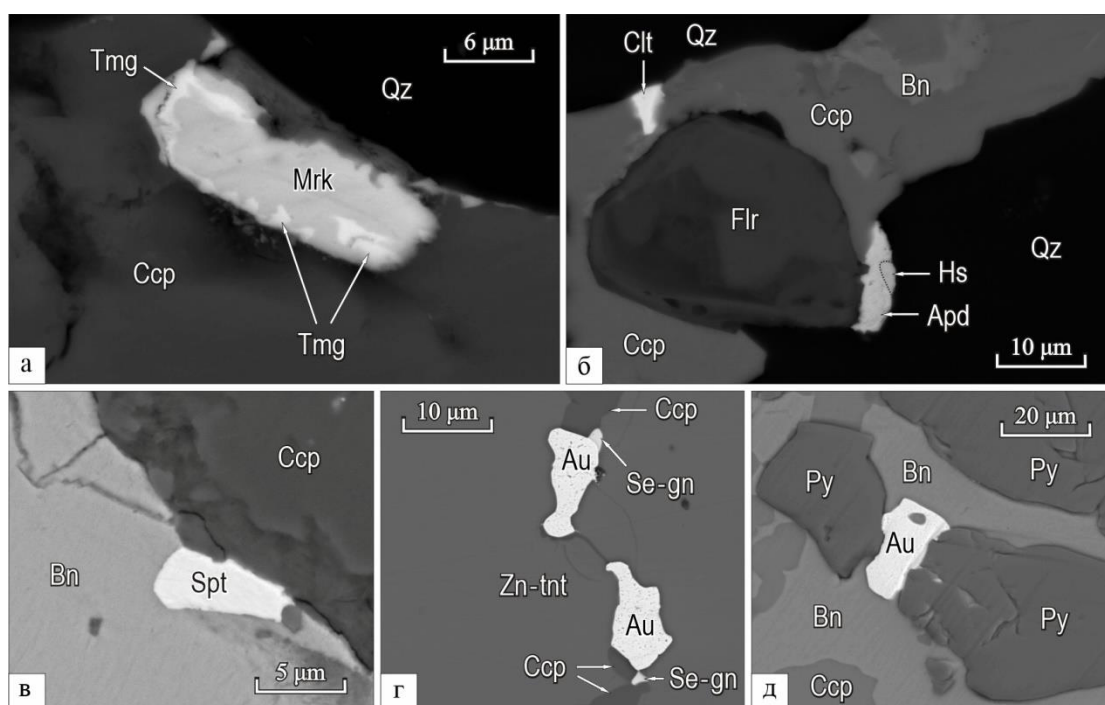


Рисунок 1 – Формы выделения меренскиита (Mrk), темагамита (Tmg), арсенопалладинита (Apd), сопчеита (Spt), гессита (Hs) с борнитом (Bn), халькопиритом (Ccp), кварцем (Qz), клаусталитом (Clt), Zn-теннантитом (Zn-tnt), Se-галенитом (Se-gn) пиритом (Py) и аксессуарным флоренситом (Flr) тоналит-порфиров. Снимки в режиме BSE.

С третьим этапом связаны Au-Ag минеральные ассоциации с калаверитом, петцитом, сильванитом, гесситом, эмпреситом, науманнитом и сульфосолями Sb и As (Рисунок 2) [8].

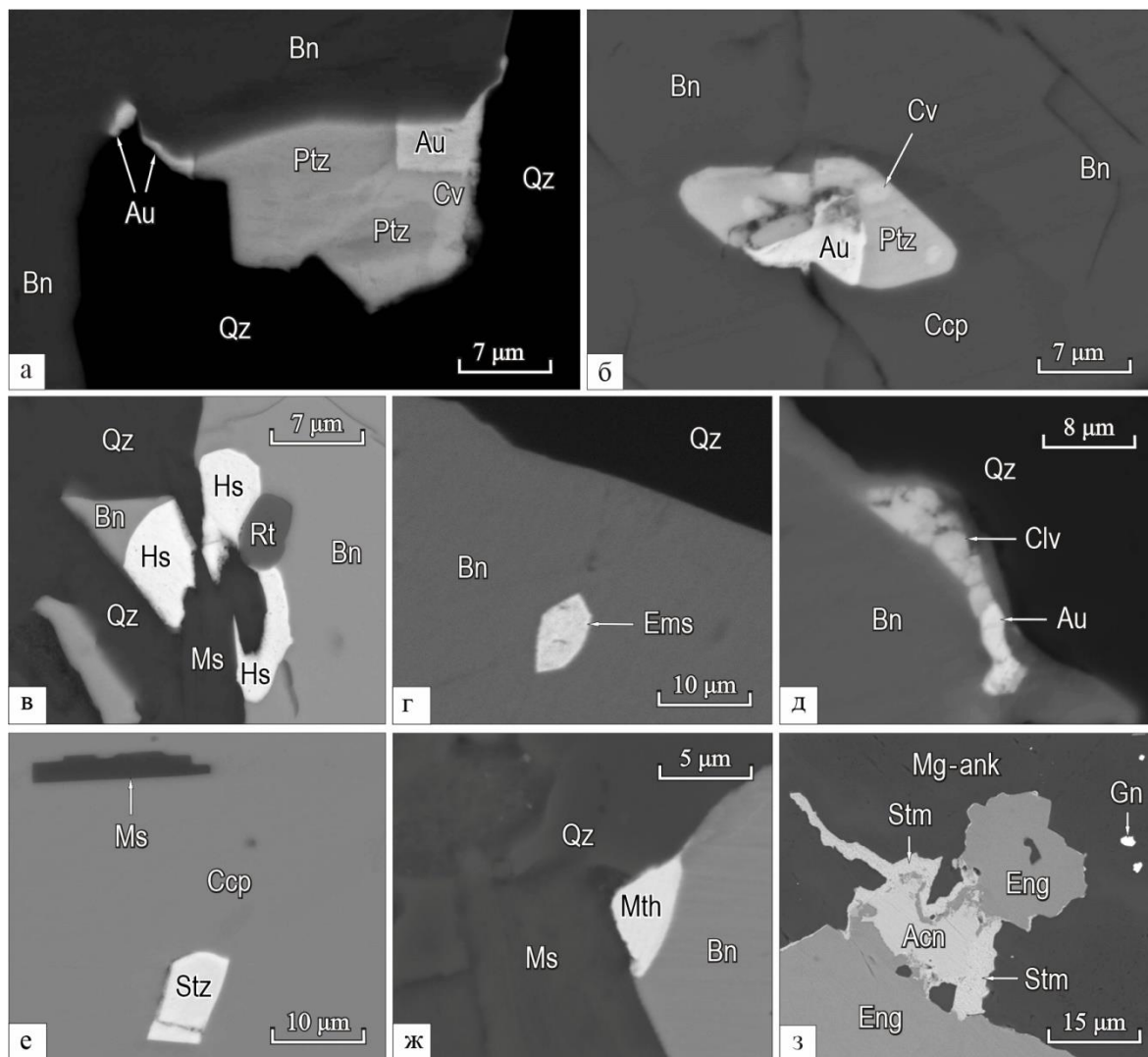


Рисунок 2 – Формы выделения золота (Au), петцита (Ptz, калаверита (Cv), гессита (Hs), эмпресита (Ems), сильванита (Clv), штульцита (Stz), эмпресита (Ems), акантита (Acn), штромейерита (Stm) и энаргита (Eng) в кварце (Qz), борните (Bn), халькопирите (Ccp), гидросерисците (Ms), Mg-анкерите (Mg-ank). Снимки в режиме BSE.

Изучение флюидных включений, рамановская спектроскопия и минеральная термометрия (парагенезис теллуридов Au и Ag) показали, что медно-порфировое оруденение отлагалось из углекислотно-водно-хлоридного Na-K±Fe флюида с концентрациями солей 20.1–32.8 мас. % NaCl-экв. при 470–395°C, субэпитермальная минерализация – при P~0.96–1.0 кбар из углекислотно-водно-хлоридного Na-K±Fe±Ca±Mg флюида с соленостью 7.5–15 мас. % NaCl-экв. при 445–365 °C. Эпитермальные минеральные ассоциации отлагались при P~0.55 кбар из углекислотно-водно-хлоридного Na-K±Fe±Ca±Mg флюида с концентрациями солей 1.4–12.6 мас. % NaCl-экв. при 370–200°C.

Изотопный состав S флюида разных минеральных ассоциаций месторождения характеризуется околонулевыми значениями от -2.7 до +0.4 ‰, что позволяет утверждать, что они являются производными единой порфировой системы. Значения δ¹⁸O флюида медно-порфирового (от 5.8 до 6.4 ‰) и субэпитермального (от 5.7 до 6.2 ‰) этапов указывают на его магматогенный генезис; а эпитермального (от +0.6 до +5.2 ‰) – на смешение магматического флюида с метеорными водами (от 0.4 до 5.7 ‰) (Рисунок 3).

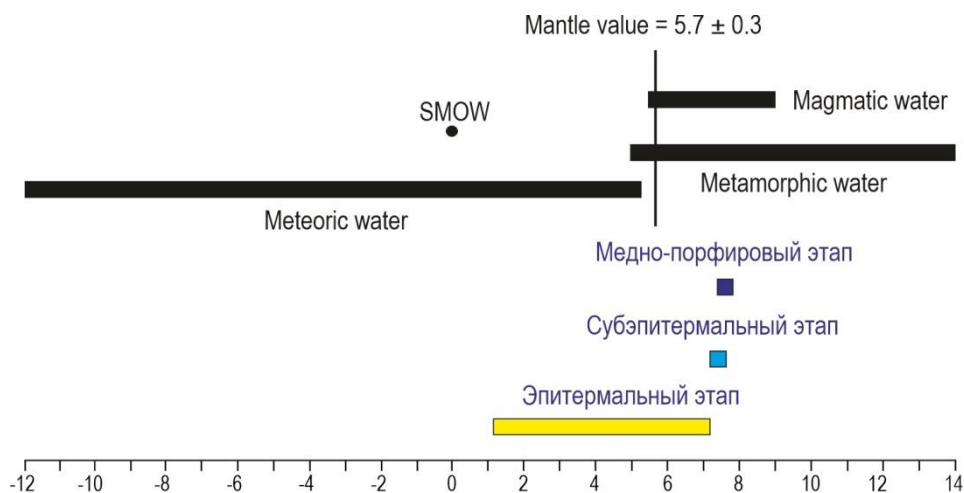


Рисунок 3 – Изотопный состав кислорода флюида месторождения Ак-Суг

Полученные изотопные данные в сочетании с минералого-геохимическими особенностями и условиями образования руд позволили проследить закономерности эволюции минеральных парагенезисов, температур, состава и концентрации флюидов месторождения Ак-Суг при переходе от медно-порфирового к эпитеpмальному этапу [8].

Эпитеpмальный этап месторождения Ак-Суг обладает сходными минералого-геохимическими особенностями и условиями образования руд с оруденением эпитеpмального Au-Ag рудопроявления Биче-Кадыр-Оос intermediate sulfidation типа, находящегося в 12 км к СВ.

Оруденение Биче-Кадыр-Оос представлено золото-сульфидно-кварцевыми и золото-полисульфидно-карбонатно-кварцевыми жилами с аргиллитовыми зонами в вулканогенно-осадочных породах нижнего кембрия. Минералого-геохимическими исследованиями установлены две стадии рудообразования: золото-сульфидно-кварцевая стадия с пиритом, марказитом, пирротинном, арсенопиритом, халькопиритом, реже сфалеритом, гесситом, золотом и электрумом; и поздняя золото-полисульфидно-карбонатно-кварцевая стадия с золотом, электрумом, Hg-электрумом, Se-акантитом, Se-галеном, борнитом, теннантитом, тетраэдритом, гесситом, теллуробисмутитом, висмутинитом, матильдитом, джемсонитом, урайитом, самородным Вi и баритом. Исследования флюидных включений, рамановская спектроскопия и термометрия минералов (парагенезис электрума и сфалерита) установили, что рудные жилы образовались при $P \sim 0,5$ кбар из водного CO_2 -Na-K-хлоридного флюида (4.9–9.6 мас. % экв. NaCl). и температуры от 330 до 200°C (ранние золотосульфидно-кварцевые жилы при 330–270°C и поздние золото-полисульфидно-карбонат-кварцевые жилы при 290–200°C) и вариациях $f\text{O}_2$, $f\text{S}_2$, $f\text{Se}_2$ и $f\text{Te}_2$. Изотопный состав S в сульфидах и значения $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ флюида +1.3 и +4.7 ‰ ($T = 300\text{--}275^\circ\text{C}$) указывают на участие магматической S в рудообразовании. Изотопные данные кислорода свидетельствуют о том, что при формировании жил магматический флюид смешивался с метеорной водой ($\delta^{18}\text{O}_{\text{флюида}}$ составляет от +3.4 до +6.4 ‰) [5].

3. Выводы

Таким образом, ранне- и среднекембрийское золото-медно-порфировое месторождение Ак-Суг характеризуется закономерностями эволюции минеральных парагенезисов, температур, состава и концентрации флюидов при переходе от медно-порфирового к эпитеpмальному этапу. Наличие в Ак-Сугском золото-молибден-медно-порфировом рудном узле эпитеpмального Au-Ag оруденения Биче-Кадыр-Оос свидетельствует о существовании единой порфирово-эпитеpмальной рудно-магматической системы. Отметим, что наиболее древние представители медно-порфирового типа из-за длительного развития эрозионных процессов обычно не сохраняются и/или типа значительно эродированы.

4. Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00344, <https://rscf.ru/project/23-27-00344/>.

5. Литература:

- [1] Sillitoe, R.H. Porphyry copper systems // *Economic Geology*, 2010, vol. 105, pp. 3–41.
- [2] Hou, Z., Zhang, H., Pan, X., Yang, Z. Porphyry Cu(-Mo-Au) deposits related to melting of thickened mafic lower crust – examples from the eastern Tethyan metallogenic domain // *Ore Geology Reviews*, 2011, vol. 39, pp. 21–45.
- [3] Richards, J.P. Giant ore deposits formed by optimal alignments and combinations of geological processes // *Nature Geoscience*, 2013, v. 6, pp. 911–916.
- [4] Berzin, N.A. Kungurtsev, L.V. Geodynamic interpretation of Altai-Sayan geological complexes // *Russ. Geol. Geophys.*, 1996, v. 37, pp. 56–73.
- [5] Kuzhuget, R.V., Ankusheva, N.N., Hertek, A.K., Kalinin, Yu.A., Damdinov, B.B., Pirajno, F., Butanaev, Yu.V., Suge-Maadyr, N.V., Soldup, Sh.N. Precious-metal mineralization and formation conditions of the Biche-Kadyr-Oos epithermal Au-Ag ore occurrence (Eastern Sayan, Russia) // *Minerals*, 2023, vol. 13, pp. 1529.
- [6] Berzina A.N., Berzina A.P., Gimón V.O. Paleozoic-Mesozoic porphyry Cu(Mo) and Mo(Cu) deposits within the southern margin of the Siberian Craton: geochemistry, geochronology, and petrogenesis (a review) // *Minerals*, 2016, vol. 6, pp. 125.
- [7] Pollard, P.J., Pelenkova, E., Mathur, R. Paragenesis and Re-Os molybdenite age of the Cambrian Ak-Sug porphyry Cu-Au-Mo deposit, Tyva Republic, Russian Federation // *Economic Geology*, 2017, vol. 112, pp. 1021–1028.
- [8] Kuzhuget, R.V., Ankusheva, N.N., Khertek, A.K., Mongush, A.O., Butanaeva, Yu. The Ak-Sug porphyry copper-gold-molybdenum deposit, East Sayan: noble metal mineralization, PT-parameters, and composition of ore-bearing fluid // *Geology of Ore Deposits*, 2023, vol. 65, Suppl. 1, pp. S58–S84.

**СТРОЕНИЕ РУДНОГО ГОРИЗОНТА УЧАСТКА БУРАННЫЙ
МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТОМТОР И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ REE₂O₃ и Y₂O₃**

Елена Лазарева, Сергей Жмодик, Николай Добрецов, Иван Зольников,
Александр Толстов, Виктория Лямина

ФГБУН «Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева»,
630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3

**STRUCTURE OF THE ORE HORIZON OF THE BURANNY SITE OF THE
TOMTOR DEPOSIT AND DISTRIBUTION OF REE₂O₃ AND Y₂O₃**

Elena Lazareva, Sergey Zhmodik, Ivan Zolnikov, Nikolay Dobretsov,
Alexander Tolstov, Victoria Lyamina

Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3, Akademika Koptyuga ave.,
Novosibirsk, 630090, Russia

Abstract. The paper discusses the structural-morphological characteristics of the ore horizon of the Buranny site of the Tomtor deposit (Arctic Siberia). At the base of the ore layer, the Northern and Southern depressions are established, separated by a linear elevation of sublatitudinal strike. In the Northern Depression, the pools of two submeridional structures are completely filled with ore material, and the pools of the third are partially filled. The pools of the sublatitudinal structure of the Southern Depression are partially filled with ore material. All pools are additionally filled with Permian coarse coal-bearing sediments.

Differentiation of REE₂O₃ and Y₂O₃ within the ore layer is observed. The proportion (%) of Y₂O₃ from the sum of REE₂O₃+Y₂O₃ (Y_{REE+Y}) varies from 0.86 to 21%. Maximum values are observed at the saddles of the base of the ore layer, in local depressions of saddles or at the edges of pools. Ores with high Y_{REE+Y} values contain authigenic phosphates of both LREE and Y; the content of MREE and HREE increases in such ores. It is assumed that fluctuations in Eh-pH parameters during the accumulation of ore matter led to the fractionation of rare earth elements.

1. Введение

На севере Республики Саха (Якутия) находится крупное Sc-REE-Y-Nb месторождение, связанное с Томторским комплексом ультраосновных пород и карбонатитов, который является одним из крупнейших в мире [1, 2]. Комплекс располагается восточнее Анабарского щита в осевой части Уджинского поднятия. В его строении выделяют внешнее кольцо, сложенное щелочными и нефелиновыми сиенитами и ультрамафитами — фойдолитами [3], центральное ядро, сложенное породами карбонатитового комплекса, подразделяющимися на безрудные и рудные. Ядро отделяется от щелочных пород кольцом микроклин-слюдястых пород. Кора выветривания, образованная по всем породам массива, имеет наиболее мощный профиль (до 300 м) по рудным карбонатитам. Стратифицированные пластовые залежи, представляющие богатые Nb-REE руды, залегают во впадинах на коре выветривания [2, 4].

Руды признаны уникальным природным концентратом, что вызывает большой интерес к формирующим их процессам и порождает большое количество гипотез [5]. Научная дискуссия, начатая в 90х годах XX века, продолжается по сей день. Предполагалось, что: 1) руды являются изменёнными щелочными карбонатит-ультрамафитовыми туфолами [6, 7]; 2) гидротермальными рудами [8]; 3) эпигенетически изменёнными верхними горизонтами коры выветривания [2]; 4) озёрными отложениями, сочетающими делювиальный и хемогенно-осадочный материалы [4, 9]; 5) руды были сформированы в результате деятельности циано-бактериальных сообществ, развивающихся в прибрежно-морских зонах литорали/сублиторали

[10]; 6) авторы данной работы полагают, что отложение руд происходило в экзогенных условиях в обстановке термального водоёма, при значительной роли биогенного фактора [5, 11]. Различия в точках зрения обусловлены сложностью процессов, накладывающийся друг на друга. Совокупность данных указывает не только на полигенность, но и на полихронность формирования Томторского месторождения [6, 12, 13, 14].

Структурно-морфологические характеристики рудного пласта несут важнейшую информацию, необходимую для реконструкции процессов рудообразования, однако, в открытой печати почти не обсуждались. А.Д. Коноплёв исследовал распределение различных фаций осадков в рудном пласте [4, 9], эти исследования также включали некоторые сведения о распределении Nb, REE и Y. Целью данного исследования было моделирование формы кровли и подошвы рудного пласта, перекрывающих его пермских континентальных и юрских морских отложений участка Буранный, выявление закономерностей распределения REE_2O_3 и Y_2O_3 . В работе были использованы архивные данные Эбеляхской ГПП. При помощи пакетов программ QGis и Micromine построена в абсолютных отметках высот цифровая 3D модель рудного горизонта участка Буранный и перекрывающих отложений. Анализ распределения Y_2O_3 и REE_2O_3 по площади рудного горизонта был проведен с использованием данных о средневзвешенном содержании компонентов более чем в 300 скважинах. Данные сопоставлены с минеральным составом некоторых образцов с различным соотношением REE_2O_3 и Y_2O_3 . Для характеристики образцов руд использованы методы электронной сканирующей микроскопии и ИСП-МС.

2. Результаты

Богатые тонкослоистые руды участка Буранный, описываются исследователями, как пластовое тело и хорошо распознавались при разведке по текстурным и геохимическим характеристикам. Как правило, их подстилали породы сидеритового горизонта [9]. Пермские отложения, перекрывающие руды, отличаются грубообломочной часто гравелитовой текстурой, присутствием большого количества углистых остатков и наличием угольных слоёв.

Подошва рудного слоя неровная, образует понижения и возвышения в диапазоне глубин около 130 м (Рисунок 1). В целом по участку можно выделить две депрессии – Северную и Южную, которые отделены друг от друга валообразным возвышением субширотной ориентировки, в пределах которого рудный слой частично отсутствует (Рисунок 1а). Внутри депрессии осложнены понижениями второго порядка, которые представляют собой изометричные, как правило, глубокие воронкообразные формы, сгруппированные в линейные структуры, которые ориентированы в Северной депрессии субмеридионально, а в Южной субширотно. Наряду с контрастно выраженными глубокими воронкообразными формами имеются локальные неглубокие понижения.

Наиболее крупная и глубокая воронка расположена в западной части Южной депрессии. Перепад высот между наиболее высокой позицией подошвы рудного слоя и самой низкой её позицией на дне Западной воронки Южной депрессии составляет 120 м (Рисунок 1а). Ось Южной депрессии совпадает с разломом, выявленным при разведочном бурении.

В кровле рудного слоя наблюдается частичное наследование контуров понижений второго порядка, установленных по морфологии подошвы. Понижения в разной степени заполнены рудным веществом: от незначительной, до абсолютной (Рисунок 1б). Восточная и южная воронки Южной депрессии заполнены рудным веществом на 72% от объёма, а самая глубокая западная воронка только на 29 %. Значительная часть понижений в подошве рудного слоя внутри Северной депрессии участка Буранный заполнены тонкослоистыми рудами полностью (> 92% от объёма), но наиболее глубокие воронки, локализованные вдоль субмеридиональной срединной оси Северной депрессии заполнены лишь частично на 60-84 %. В целом на участке Буранном можно выделить четыре наиболее ярко выраженных серии воронкообразных форм, сгруппированных в линейные структуры (субширотная в Южной депрессии и три субмеридиональных в Северной депрессии). Это приводит к выводу о связи воронок с разломными зонами (для Южной депрессии эта связь уже установлена). Мощность рудного

пласта участка Буранный варьирует в широких пределах – местами горизонт полностью выклинивается, а максимум составляет 37.8 м. Значения мощности рудного пласта не всегда коррелируют с глубиной подошвы рудного слоя. Нередко значительные мощности рудного слоя обнаруживаются как на склонах воронкообразных форм, так и в локальных, неглубоких понижениях за пределами воронок.

Пермские континентальные отложения заполняют депрессии в кровле рудного слоя полностью, фактически выравнивая все понижения. В некоторых местах пермские отложения отсутствуют и рудный горизонт перекрыт юрскими морскими отложениями.

Полученные данные могут свидетельствовать или о неравномерном накоплении вещества в различных воронках, или о различном возрасте формирования депрессий, отдельных воронок или локальных понижений. Основываясь на сопоставлении размеров, особенностях микроморфологии минералов руд, присутствию органических остатков, аналогом обстановки, в которой накапливались руды Томторского месторождения [5], авторы считают крупные термальные водоёмы кальдеры Узон, сформированные на месте воронок фреатического взрыва [15, 16]. Как показывают изотопные исследования, метан был одним из основных газов на одном из этапов формирования коры выветривания Томторского комплекса [17], что поддерживает гипотезу вероятного формирования крупных воронок.

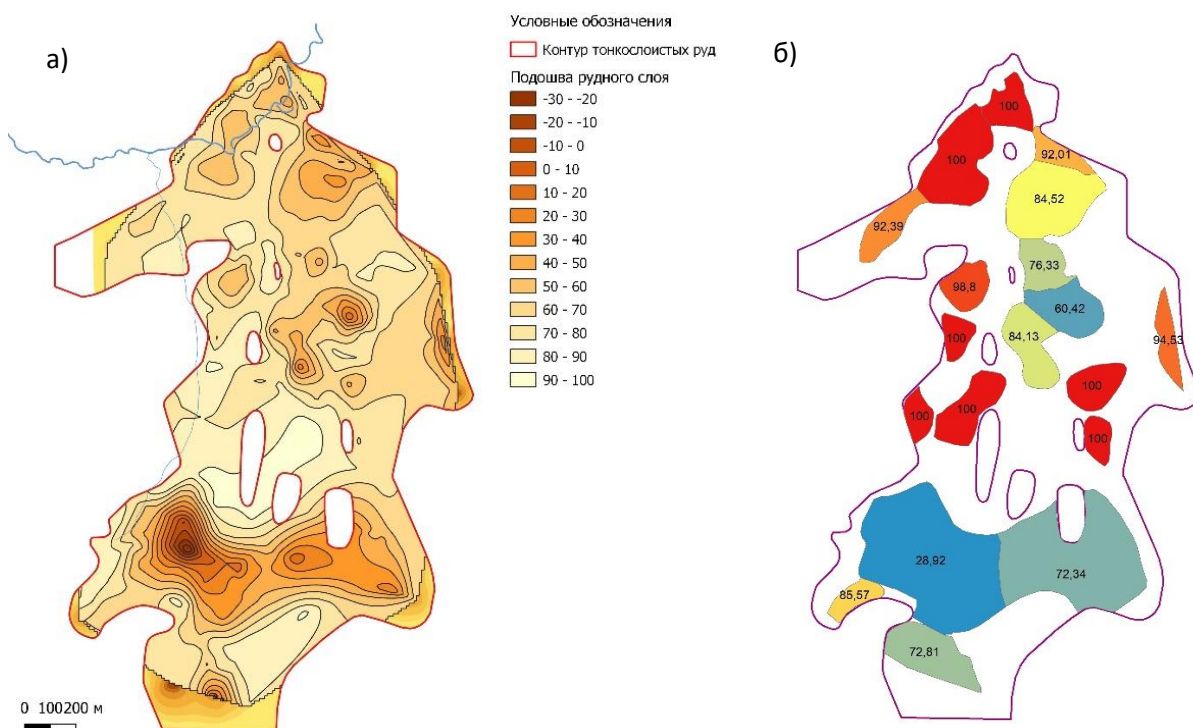


Рисунок 1 – Строение подошвы рудного горизонта участка Буранный месторождения Томтор (а) и доля (%) заполнения впадин и воронок (б).

Ранее уже отмечалось, что отношение $Y_2O_3/\Sigma REE_2O_3 \times 100$ колеблется в разных участках месторождения от 4-8 до 60-70 [9]. Полученные нами результаты также не показывают прямой зависимости между содержанием Y_2O_3 и REE_2O_3 в рудах. Доля (%) Y_2O_3 от суммы $REE_2O_3 + Y_2O_3$ (в сокращении – Y_{REE+Y}) варьирует в широких пределах от 0.86 до 21%. Максимальные значения Y_{REE+Y} характерны не только для руд с относительно невысокими содержаниями редкоземельных элементов, но и для участков рудного пласта, с содержания REE_2O_3 более 5%, в которых Y_{REE+Y} может достигать 17%. Картирование показало, что $Y_{REE+Y} > 7\%$ наблюдаются на седловинах подошвы рудного слоя, в локальных понижениях седловин или на краях воронок (Рисунок 2).

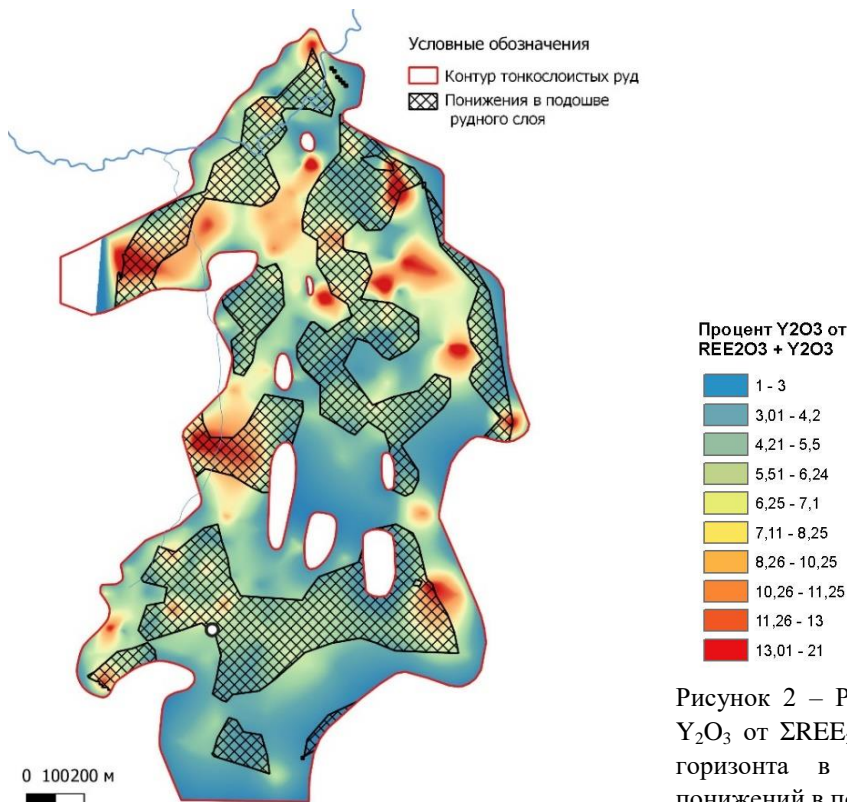


Рисунок 2 – Распределение $Y_{\text{REE+Y}}$ (доля (%) Y_2O_3 от $\Sigma \text{REE}_2O_3 + Y_2O_3$) по площади рудного горизонта в сопоставлении с контурами понижений в подошве.

Основными минералами тонкослоистых руд являются монацит, минералы группы плюмбогуммита, пирохлор, рутил, гётит, сульфиды [5]. Минералы группы плюмбогуммита находятся в рудах преимущественно в виде колломорфных выделений, но встречаются участки, где преобладают зональные кристаллы и их агрегаты, где Ca-, Ba-, Sr, и REE- минералы сменяют друг друга. Монацит-Ce в рудах формирует разнообразные биоморфные агрегаты [5, 11, 18]. По данным сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии, монацит часто встречается в виде наночастиц размером около 50 нм, которые плотным слоем покрывают внешнюю часть галлуазитовых трубок (длиной 800-3000 нм, диаметром 300 нм) [5]. Подобные формы выделения свидетельствуют о кристаллизации минерала из коллоида и/или образования в результате дегидратации H_2O -содержащего фосфата. Содержания Ce, La, Nd в монаците варьируют, главным образом незначительно, но в некоторых участках руд существенно [18], что может свидетельствовать о колебаниях Eh-pH параметров при отложении водных фосфатов REE.

Значительное количество спектров редкоземельных элементов в рудах, нормированных на хондрит выглядят подобными в части LREE, но различаются в области MREE и HREE (Рисунок 3а спектры 1 и 2). В рудном горизонте были выявлены участки, в которых помимо фосфатов LREE (Рисунок 2б) содержится фосфат Y (Рисунок 3с). Морфологические признаки обоих минералов свидетельствуют об их аутигенной природе. В рудах, где присутствует фосфат Y значительно увеличивается содержание MREE и HREE (Рисунок 3а спектр 3). Нормированный спектр среднего содержания редкоземельных элементов в фосфатах LREE (Рисунок 3а спектр 4) и Y (Рисунок 3а спектр 5), по основным закономерностям распределения схож с нормированным спектром валовых содержаний редкоземельных элементов в руде.

Как показывают наблюдения, Y аномалия не характерна для нормированного спектра богатых руд. $Y_{\text{REE+Y}}$ в веществе, содержащем фосфаты Y (TM-96), составляет 21%, следовательно, следует ожидать, что в участках рудого пласта, где $Y_{\text{REE+Y}}$ более высокое, также содержатся в повышенных количествах MREE и HREE. Данные участки имеют важное экономическое значение. Авторы предполагают, что колебания $Y_{\text{REE+Y}}$ могут быть связаны с колебаниями Eh-

рН условий формирования руд. При исследовании бокситов было показано, что черчит формируется при более высоком Eh и более низком рН, чем рабдофан [19]. Участки предположительно обогащённых черчитом ($Y_{REE+Y} > 7\%$, Рисунок 2), располагаются в мелководных частях предполагаемого термального водоёма, что могло обеспечивать более окислительную обстановку в процессе формирования руд.

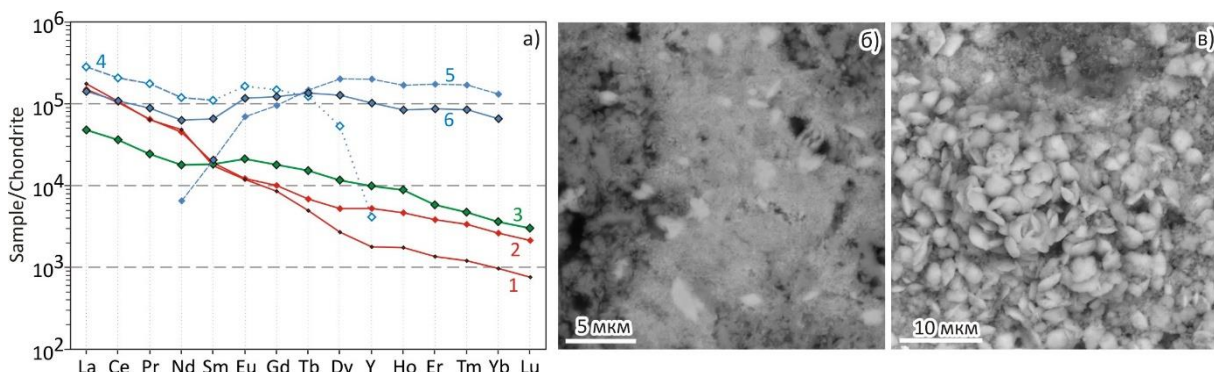


Рисунок 3 – Распределение редкоземельных элементов (а) (1 и 2 – в рудах в северной части участка Буранный по данным ИСП-МС [Лазарева 2015], 3 – в рудах центральной части участка Буранный образец ТМ-96 скв. 58549/112.5-112.9 по данным ИСП-МС, 4 - в фосфате Се образца ТМ-96 по данным СЭМ, 5 – в фосфате Y образца ТМ-96 по данным СЭМ, 6 - в усреднённом спектре по результатам анализов 4 и 5); (б) - фосфат Се образца ТМ-96; (в) - фосфат Y образца ТМ-96.

3. Выводы

1. В подошве рудного слоя участка Буранный установлено 2 депрессии (Северная и Южная, разделённые линейной возвышенностью субширотного простирания), внутри которых имеются воронкообразные впадины, сгруппированные в линейные структуры. Одна субширотная структура зафиксирована в Южной депрессии и три субмеридиональных в Северной. В Северной депрессии воронки двух субмеридиональных структур заполнены рудным материалом полностью, а воронки третьей частично. Воронки субширотной структуры Южной депрессии заполнены рудным материалом частично. Частично заполненные рудами воронки дозаполнены пермскими грубообломочными угленосными отложениями.
2. Наблюдается дифференциация REE_2O_3 и Y_2O_3 внутри рудного слоя. Доля (%) Y_2O_3 от $\Sigma REE_2O_3 + Y_2O_3$ (Y_{REE+Y}) варьирует от 0.86 до 21%. Максимальные значения наблюдаются на седловинах подошвы рудного слоя, в локальных понижениях седловин или на краях воронок. В рудах с высокими значениями Y_{REE+Y} содержатся аутигенные фосфаты как LREE, так и Y. В участках рудного горизонта, где присутствует фосфат Y, значительно увеличивается содержание MREE и HREE. Предполагается, что колебания Eh-pH параметров в процессе накопления рудного вещества привели к фракционированию редкоземельных элементов.

4. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ 23-63-10017.

5. Литература:

- [1] Erlich, E.N., The new province of alkali rocks on the north of Siberian platform and its geological aspects // Zapisky Vsesoiuznogo Mineralogicheskogo Obshchestva, 1964, vol. 93, pp. 682-393 [in Russian].
- [2] Lapin, A.V. Tolstov, A.V. Minerageny of carbonatite weathering crust: A Handbook [in Russian]. Moscow:GEOKART:GEOS, 2011, 308 pp.
- [3] Tolstov, A.V., Tyan, O.A., 1999. Geology and Ore Content of the Tomtor Massif [in Russian]. Yakutsk:YaNTs SO RAN, 1999, 164 pp.

- [4] Konoplev, A.D., Tolstov, A.V., Vasil'ev, A.T., et al., Localization of rare-metal mineralization at the Tomtor deposit, in: *Rare-Metal–Uranium Ore Genesis in Sedimentary Rocks. Collected Research Works [in Russian]*. Moscow:Nauka, 1995, pp. 223–241.
- [5] Lazareva, E.V., Zhmodik, S.M., Dobretsov, N.L., Tolstov, A.V., Shcherbov, B.L., Karmanov, N.S., Gerasimov, E.Yu., Bryanskaya, A.V. Main minerals of abnormally high-grade ores of the Tomtor deposit (Arctic Siberia) // *Russian Geology and Geophysics*, 2015, vol. 56(6), pp. 844–873.
- [6] Entin, A.R., Zaitsev, A.I., Nenashev, N.I., et al. Sequence of geological events related to the intrusion of the Tomtor massif of ultrabasic alkaline rocks and carbonatites (Northwestern Yakutia) // *Geologiya i Geofizika*, 1990, vol. 31 (12), pp. 42–50.
- [7] Vladykin, N.V. Potassium alkaline lamproite-carbonatite complexes: petrology, genesis, and ore reserves // *Russian Geology and Geophysics*, 2009, vol. 50 (12), pp. 1119–1128.
- [8] Kravchenko, S.M., Pokrovsky, B.G. The Tomtor alkaline ultrabasic massif and related REE-Nb deposits, northern Siberia // *Econ. Geol.*, 1995, vol. 90 (3), pp. 676–689.
- [9] Konoplev, A.D., Kuz'min, V.I., Epshtein, E.M. The geologic and mineral features of the talus–lacustrine placer on the weathering crust of rare-metal carbonatites, in: *The Mineralogy and Geochemistry of Placers [in Russian]*. Moscow:Nauka, 1992, pp. 111–124.
- [10] Zhmur, S.I., Kravchenko, S.M., Rozanov, A.Yu., Zhegallo, E.A., On the genesis of the rare-earth–niobium ores of Tomtor (northern Siberian Platform) // *Dokl. Akad. Nauk*, 1994, vol. 336 (3), pp. 372–375.
- [11] Dobretsov, N.L., Zhmodik, S.M., Lazareva, E.V., et al., Structural and Morphological Features of the Participation of Microorganisms in the Formation of Nb–REE–Rich Ores of the Tomtor Field (Russia) // *Doklady Earth Sciences*, 2021, vol. 496(2), pp. 135–138.
- [12] Vladykin, N.V., Kotov, A.B., Borisenko, A.S., Yarmolyuk, V.V., Pokhilenko, N.P., Sal'nikova, E.B., Travin, A.V., Yakovleva, S.Z. Age boundaries of formation of the Tomtor alkaline-ultramafic pluton: U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological studies // *Doklady Earth Sciences*, 2014, vol. 454(1), pp. 7–11.
- [13] Skublov, S. G. Tolstov, A. V., Baranov, L. N., Melnik, A. E., Levashova, E. V. First data on the geochemistry and U-Pb age of zircons from the kamaphorites of the Tomtor alkaline-ultrabasic massif, Arctic Yakutia // *Geochemistry*, 2020, vol. 80(3), pp. 125505.
- [14] Dobretsov, N.L., Lazareva, E.V., Zhmodik, S.M., et al., Ultrapotassic Rock from the Tomtor Complex of Ultrabasic Alkaline Rocks and Carbonatites (Arctic Siberia) // *Doklady Earth Sciences*, 2020, vol. 495(2), pp. 884–887.
- [15] *Volcanism, Hydrothermal Process and Ore Formation [in Russian]*, Moscow:Nedra, 1974, 264 pp.
- [16] Dobretsov, N.L., Lazareva, E.V., Zhmodik, S.M., et al. Geological, hydrogeochemical, and microbiological characteristics of the Oil site of the Uzon caldera (Kamchatka). *Russian Geology and Geophysics*, 2015, vol. 56 (1–2), pp. 39–63.
- [17] Ponomarchuk, V.A., Dobretsov, N.L., Lazareva, E.V., Zhmodik, S.M., Karmanov, N.S., Tolstov, A.V., Pyryaev, A.N. Evidence of microbial-induced mineralization in rocks of the Tomtor carbonatite complex (Arctic Siberia) // *Doklady Earth Sciences*, 2020, vol. 490(2), pp. 76–80.
- [18] Lazareva, E., Zhmodik, S., Dobretsov, N., Tolstov, A., Karmanov, N., Dar'in, A., Kirichenko, I. Layered Nb-REE ores in the Tomtor Complex (Arctic Siberia): Formation conditions. *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, 2019, vol. 98, p. 05011.
- [19] Liu, X., Wang, Q., Zhang, Q., Zhang, Y., & Li, Y. Genesis of REE minerals in the karstic bauxite in western Guangxi, China, and its constraints on the deposit formation conditions // *Ore Geology Reviews*, 2016, vol. 75, pp. 100–115.

**ФОРМИРОВАНИЕ РОССЫПНОЙ ЗОЛОТОНОСНОСТИ БАССЕЙНА РЕКИ
ГОНАМ, ОБЪЕКТ ЮРСКИЙ (АЛДАНО-СТАНОВОЙ ЩИТ)**

Евгений Лоскутов, Зинаида Никифорова, Анатолий Журавлев, Алексей Иванов
ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

**FORMATION OF PLACER GOLD CONTENT OF THE GONAM RIVER BASIN,
YURSKY OBJECT (ALDAN-STANOVVOY SHIELD)**

Evgeny Loskutov, Zinaida Nikiforova, Anatoly Zhuravlev, Aleksey Ivanov
Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. The placer gold content of the Yursky creek (right tributary of the Gonam river) has been studied. It was revealed that the Cretaceous conglomerates and the producing layer of the alluvial placer are composed of pebbles and boulders of the same petrographic composition. The petrographic composition of pebbles and boulders is as follows: leucogranites, granite-gneisses, metagabbro, diafluorinated shales of sericite-chlorite-epidote-quartz composition and quartzites. Gold from alluvial deposits and conglomerates of the Cretaceous age also has the same typomorphic features and is represented mainly by flake and lamellar forms, measuring 0.1-0.25 mm, sometimes there are larger gold particles, with a shagreen surface and casts of impressing of minerals of the host deposits, often with through holes. The gold fineness has a wide range from 720 to 1000‰. Inclusion minerals represented by pyrite, chalcopyrite, galena, presumably chamosite and difficult-to-diagnose aluminosilicates were found in native gold from conglomerates. A similar set of mineral inclusions was also identified in native gold from the alluvial deposits of the Yursky creek. The common character of mineralogical and geochemical features of alluvial gold from alluvium and conglomerates, as well as the same petrographic composition of pebbles in conglomerates and the producing horizon allows us to conclude that the placer of the Yursky object was formed due to the supply of gold from the Cretaceous conglomerates. superimposed late ore mineralization.

1. Введение

Россыпная золотоносность на территории Алдано-Станового щита известна с конца XIX века, где и в настоящее время ведется добыча россыпного золота различными недропользователями. Проблема золотоносности состоит в том, что до сих пор не установлены коренные источники золота, послужившие формированию столь богатых россыпей на исследуемой площади. Ведется активная дискуссия о происхождении золоторудных проявлений, одни исследователи считают, что рудными источниками для формирования россыпей послужили оруденения докембрийского этапа рудообразования [1], другие – мезозойского этапа [2]. В данном сообщении рассмотрено, за счет каких источников сформировалась россыпь в бассейне р. Гонам (руч. Юрский).

Скважинами установлен мощный пласт золотоносных конгломератов мелового возраста в бассейне реки Гонам и его правого притока ручья Юрский. Изучено россыпное золото в количестве 90 знаков из 3-х скважин, которые опробованы в интервале от 0 до 250 м, глубиной более 300 м. Цементированные конгломераты подвергались дроблению, затем выделялся тяжелый шлик, из которого было извлечено самородное золото. Кроме этого, изучены минералого-геохимические особенности россыпного золота в количестве 250 знаков из аллювиальных отложений по трем разведочным линиям россыпи ручья Юрский. Исследование типоморфных особенностей (морфологии, химического состава, микровключений, внутренней структуры) самородного золота проводилось при применении известных минералого-геохимических методов.

2. Основной раздел

В геологическом строении территории принимают участие стратифицированные образования широкого возрастного диапазона. Здесь в различном объеме представлены метаморфические докембрийские комплексы пород, слагающие складчатый фундамент, а также осадочные мезозойские и кайнозойские отложения. Породы метаморфических комплексов претерпели неоднократный прогрессивный и регрессивный метаморфизм нескольких фаций: гранулитовой, амфиболитовой, эпидот-амфиболитовой и зеленосланцевой. В отдельный комплекс выделены породы регрессивного метаморфизма эпидот-амфиболитовой и зеленосланцевой фаций, которые на исследуемой площади образуют мощные зоны диафтореза. Эти зоны широко распространены в районе сочленения Алданского щита и Становой области и представлены в виде рассланцованных, интенсивно измененных пород – диафторитов, которые являются благоприятной средой для локализации золоторудных проявлений. Практически все исследователи связывают образование диафторитов с результатом воздействия постмагматических гидротермальных растворов на уже динамометаморфизованные породы зон разломов, т.е. относят диафторез к гидротермально-метасоматическому процессу [3]. Тектонические депрессии, с сохранившимися в них юрскими и меловыми осадочными отложениями, и трещинные интрузивные тела относятся к структурам мезозоя. В тектонических депрессиях вблизи региональных субширотных глубинных разломов отмечается интенсивная дислоцированность мезозойских осадочных пород. Меловая система в данном районе представлена песчано-конгломератовой толщей. Песчано-конгломератовые отложения перекрываются пирокластическими и эффузивными породами. Отложения представлены туфами, трахиандезитами, трахиандезитобазальтами, базальтами, а в основании выделяется базальный горизонт лавобрекчий и ксенотуфов с обломками докембрийских пород. Вулканыты по составу относятся к калиево-натриевой серии. Туфоконгломераты подсвиты слабо золотоносны.

Мезозойские магматические образования широко распространены на исследуемой площади в виде даек на западе и отдельных массивов на востоке. Возраст их определяется как позднеюрский- раннемеловой, севернее района работ подобные образования прорывают юрские отложения, а сингенетические им эффузивные породы имеют нижнемеловой возраст. В керне скважин мезозойские магматические образования представлены только габбро и андезитами. В основном эти породы встречаются в нижних горизонтах скважин и на границе фундамента, а также в виде силлов среди меловых терригенно-осадочных пород. Отмечаются участки, где описанные магматические породы интродуцируют конгломераты.

Промышленная россыпь руч. Юрский сформирована, вероятно, за счет разрушения и размыва золотоносных песчано-конгломератовых толщ. К кайнозойскому комплексу континентальных пород отнесены русловые и пойменные (высокой и низкой поймы) отложения, преобладают валунно-галечные образования с песчаным заполнителем. Степень окатанности различная, в основном средняя и низкая, снижающаяся к верховьям мелких водотоков. По петрографическому составу в обломочном материале аллювия преобладает галька местных пород. В целом, для верхнечетвертичных отложений района работ характерна слабая оторванность и недалекая транспортировка обломочного материала от материнских коренных пород. На площади развития конгломератов верхнеюрского-нижнемелового возраста в составе аллювия преобладает в основном хорошо-идеально окатанная галька, гравий и валуны конгломератов, резко отличающиеся степенью окатанности от современных. Мощные пачки песчаников формируют супесно-песчаный аллювий с малым количеством крупно-грубообломочной фракции.

Золотоносные конгломераты залегают в базальных горизонтах нагорнинской свиты мелового возраста, мощность которой в данном районе варьирует от 350 до 1000 м. Нагорнинская свита со стратиграфическим несогласием залегают на породах кристаллического фундамента, а к северу иногда перекрывает терригенные отложения юхтинской свиты юрского возраста. Петрографический состав гальки конгломератов представлен лейкогранитами, гранито-

гнейсами, метагабброидами, диафторированными сланцами серицит-хлорит-эпидот-кварцевого состава и кварцитами. Цемент полимиктовый зеленого и серо-зеленоватого цвета.

По данным Ю.А. Зубкова (2005ф), аллювиальная россыпь ручья Юрский представляет собой пластовую залежь протяженностью свыше 8 км. Мощность продуктивного пласта от 1,3 до 2,5 м с содержаниями золота от 0,6 до 1,4 г/м³. Грубообломочный материал аллювия руч. Юрского и притоков слабо окатан, содержит обломки тех же пород, что и в гальках конгломератов, а также обломки нижнемеловых андезитов и габбро, которые в скважинах секут конгломераты. Минеральный состав шлиха: магнетит, ильменит, гранат, пироксен, амфиболы. Реже встречаются циркон, рутил, пирит, шеелит, галенит.

Минералого-геохимические особенности россыпного золота меловых конгломератов (Таблица 1). Золото представлено в основном изометричными формами размером 0,1- 0,5 мм, что составляет 80% от всего изученного золота. Золотины желтого цвета, поверхность грубоямчатая с отпечатками вдавливания минералов вмещающих отложений, иногда со сквозными отверстиями, шрамами и др. Единичные золотины образуют псевдосрастания (агрегаты) золота с окатанным кварцем, ильменитом, магнетитом. Необходимо отметить, что некоторые золотины имеют сквозные отверстия и разрывы, практически полностью пересекающие площадь золотины. Обнаружена частица золота в срастании с цирконом, в которой отчетливо наблюдается, что зерно заполняет пространство не полностью. При детальном рассмотрении таких индивидов «рудного» золота под электронным микроскопом было установлено, что некоторые из минералов прилегают к золоту не вплотную, а между ними существует пространство. Эти минеральные скопления на поверхности золотин весьма легко удаляются даже при малейшем физическом воздействии. Предполагается, что формирование таких агрегатов «рудных срастаний» золота не сингенетическое и относится к псевдорудному золоту. Подобное золото было ранее обнаружено в девонских конгломератах Тимана [4].

Таблица 1 – Минералого-геохимические особенности россыпного золота из меловых конгломератов и аллювиальных отложений (объект Юрский)

Золотоносные отложения	Размер золота (мм)	Морфология (%)	Гранулометрия (%)	Пробность (%)	Характерные признаки
конгломераты	0,12-1,08	Комковидное – 31 Интерстициальное – 22 Трещинное – 40 Удлиненное – 7	<0,25 – 36 0,25-0,5 – 43 0,5-1,0 – 16 >1 – 5	720-1000 (среднее = 899) n = 96	Сквозные отверстия Разрывы Тонкая высокопробная оболочка
аллювиальные	0,17-1,23	Комковидное – 40 Интерстициальное – 13 Трещинное – 38 Удлиненное – 9	<0,25 – 8 0,25-0,5 – 52 0,5-1,0 – 37 >1 – 3	614-1000 (среднее = 889) n = 247	Сквозные отверстия Разрывы Тонкая высокопробная оболочка

Образование агрегатов золота с минералами вмещающих отложений со сквозными отверстиями и разрывами объясняется следующим образом. Агрегаты золота (псевдорудное золото) сформированы в результате воздействия литостатического давления вышележащих пород [5]. При формировании палеороссыпи мелового возраста образовались золотоносные галечно-гравийные аллювиальные отложения, затем эта россыпь в результате проявления тектонических движений (сброс) была погребена предположительно мощными отложениями до 1 км [6]. Вследствие воздействия вышележащих толщ возникло литостатическое давление на золото. В связи с этим произошло вдавливание минералов вмещающих толщ с образованием отпечатков минералов на поверхности, разрывов и сквозных отверстий на золотилах. Это, в

конечном итоге, привело к формированию агрегатов «рудного» золота «в сростании» с жильными минералами. Микрозондовым анализом определена пробность, которая изменяется от низкопробного 720‰ до весьма высокопробного 1000‰ и в среднем составляет 899‰. В пределах чувствительности микрозондового анализа элементы примеси не обнаружены. В золоте выявлены микровключения, представленные кварцем, полевым шпатом, пиритом, халькопиритом, галенитом и трудно диагностируемыми алюмосиликатами.

Минералого-геохимические особенности россыпного золота аллювиальных отложений (см. Таблица 1). Изучена россыпная золотоносность ручья Юрский. Золото из аллювиальных отложений представлено также в основном чешуйчатыми, пластинчатыми (трещинными) и комковидными формами, в подчиненном количестве присутствуют интерстициальные и дендритовидные. Размер золота в основном 0,1-0,25 мм, отмечаются золотины крупного размера от 0,5 до 1 мм (около 40%) и более 1 мм. В основном золото хорошо и средне окатанное, но в единичных случаях встречаются плохо обработанные частицы. Иногда золотины образуют агрегаты: сростание золота с кварцем, полевым шпатом и другими минералами, у некоторых на поверхности наблюдаются отпечатки выкрашивания или вдавливания минералов. Эти агрегаты золота легко разрушаются при легком нажиме иглой, что свидетельствует о механическом сростании минералов с золотом. Цвет золотин желтый, соломенно-желтый, поверхность золотин ямчато-бугорчатая с отпечатками вдавливания минералов вмещающих отложений, иногда со сквозными отверстиями в центральной части или поперечными разрывами. Пробность золота варьирует в широких пределах от низкопробного до высокопробного от 614 до 1000‰. Средняя пробность составляет 882–888‰. Преобладает в основном высокопробное золото (53,46 %), среднепробное составляет 33,67 %. Элементы примеси в пределах чувствительности микрозондового анализа не установлены. Микровключения представлены кварцем, различными по составу полевыми шпатами, ильменитом, халькопиритом, пиритом, галенитом, трудно диагностируемыми алюмосиликатами и фазой, состоящей из оксида FeCrNi.

Следует отметить, что морфология золота и химический состав как в конгломератах, так и в аллювиальных отложениях, указывает на единый источник минерализации. Схожий набор микровключений (сульфиды и трудно диагностируемые алюмосиликаты) установлен как в самородном золоте из аллювиальных отложений руч. Юрский, так и в золоте конгломератов мелового возраста. На аллювиальном золоте также наблюдаются черные пленки шамозита с пиритом в виде налета, которые сохранились, несмотря на пребывание золота в экзогенных условиях при формировании россыпи.

3. Выводы

Таким образом, детальное изучение минералого-геохимических особенностей самородного золота из аллювиальных отложений ручья Юрский и конгломератов мелового возраста позволило выявить их сходство по морфологическим особенностям, геохимическому составу и минералам включениям. Полученные данные дают основание полагать, что источниками россыпей бассейна р. Гонам (руч. Юрский) являлись золотоносные конгломераты мелового возраста.

4. Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГАБМ СО РАН.

5. Литература:

- [1] Kravchenko A.A., Smelov A.P., Beryozkin V.I. Dobretsov V.N. Mineralogy and geochemistry of gold-ore two-pyroxene crystalline shales of the Aldan shield (on the example of the P. Pinigin deposit) // Russian Geology. 2008. №5. P. 56–65.

- [2] Molchanov A.V., Terekhov A.V., Shatov V.V., Petrov O.V., Kukushkin K.A., Kozlov D.S., Shatov N.V. Gold areas and clusters of the Aldan-Stanovoy metallogenic province // *Regional geology and metallogeny*. 2017. № 71. P. 93–111.
- [3] Vetluzhskikh V.G. Gold content of the North-Stanovoy metallogenic zone (South Yakutia, Amur region) // *Russian Geology*. 2007. № 1. P. 59–71.
- [4] Gimmelfarb G. B., Belonozhko L. B., Zaborsky Y.V. Explanatory note to the geological map of the USSR on a scale of 1: 200 000. Stanovaya series, sheet N-51-VI. M.: VAGT, 1970, 1971. P. 99.
- [5] Nikiforova Z.S., Filippov V.E. Gold of pseudo-ote habit in ancient conglomerates // *AS USSR report*. 1990. V. 311. № 2. P. 455–457.
- [6] Никифорова З.С., Филиппов В.Е., Цаплин А.Е. Эоловое золото одного из россыпных месторождений Тиманского кряжа // *Геология рудных месторождений*. 1991. Т. 33. № 2. С. 112-116.

ТИПОМОРФНЫЕ ОСОБЕННОСТИ САМОРОДНОГО ЗОЛОТА ЗОЛОТО-МЫШЬЯКОВО-СУЛЬФИДНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ МАНИТАНЫРДСКОГО РАЙОНА (ПОЛЯРНЫЙ УРАЛ): СОПОСТАВЛЕНИЕ С АНАЛОГИЧНЫМИ ТИПАМИ ЗОЛОТОГО ОРУДЕНЕНИЯ СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ

Татьяна Майорова^{1,2}, Людмила Ефанова¹

¹ ФГБУН ФИЦ «Коми научный центр», «Институт геологии имени академика Н.П. Юшкина»
УрО РАН, 167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, 54

² ФГБОУ ВО «Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина»,
167001, Россия, г. Сыктывкар, Октябрьский пр-т, 55

TYPOMORPHIC FEATURES OF NATIVE GOLD FROM GOLD-ARSENIC-SULFIDE OCCURRENCES OF THE MANITANYRD REGION (POLAR URALS): COMPARISON WITH SIMILAR TYPES OF GOLD MINERALIZATION IN THE NORTH-EAST OF RUSSIA

Tatiana Mayorova^{1,2}, Ludmila Efanova¹

¹ Institute of Geology of Komi SC UB RAS, 54, Pervomayskaya str., Syktyvkar, 167982, Russia

² Pitirim Sorokin Syktyvkar State University, 55, Oktyabrsky ave., Syktyvkar, 167001, Russia

Abstract. In the ore occurrences of the Manitanyrd region, gold is associated with sulfides and is present in the ores in two forms – finely dispersed, submicroscopic in arsenopyrite and pyrite and native gold in the chalcopyrite-galena-sphalerite association. A comparative analysis of the composition of gold shows that the composition of gold (fineness, impurity elements) of a small deposit differs from the gold of ore occurrences in its lower fineness, its large dispersion, the presence, in addition to Ag, of Hg impurities, and the difference in the composition of fine and native gold. The identified typomorphic features of gold and their comparison with known gold ore objects in the North-East of Russia indicate some features of the genesis of ore occurrences in the region. Gold mineralization combines the features of orogenic deposits and gold-arsenic-sulfide deposits in black shale strata, differing from the latter by localization in Precambrian volcanic rocks.

1. Введение

Типоморфные свойства самородного золота широко используются для получения генетической информации о конкретных объектах, поскольку они показывают контрастные различия для каждой группы месторождений разных геолого-промышленных и геолого-генетических типов [1, 2, 3]. Выявление типоморфных особенностей золота рудопроявлений Манитанырдского района является актуальной задачей для уточнения генезиса этих объектов. Изучение состава самородного золота проводилось в ЦКП «Геонаука» (Институт геологии Коми НЦ УрО РАН) на сканирующем электронном микроскопе JSM-6400 (JEOL, Япония) с волновым спектрометром Microspec (модель WDX-400, USA) и энергодисперсионным спектрометром Link, а также на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 3LMN (Tescan, Чехия) с энергодисперсионным спектрометром X-Max 50 (Oxford Instruments, Oxford, UK).

В Манитанырдском районе Полярного Урала расположены рудопроявления и небольшое месторождение, которые относятся к золото-сульфидно-кварцевому и золотосульфидному (золото-мышьяковому) формационным типам и одному золото-пирит-арсенопиритовому минеральному типу с различным соотношением главных и второстепенных рудных минералов. Их размещение контролируется протяженной зоной разломов северо-восточного простирания в пределах единой Нияюской рудной зоны (рисунок 1), в которой вмещающие породы гидротермально изменены, катаклазированы и милонитизированы, а руды частично окислены и

дезинтегрированы. Все породы района претерпели региональный метаморфизм зеленосланцевой фации. Характерной особенностью золоторудных проявлений этого района является их локализация в древних вулканогенных и вулканогенно-осадочных породах верхнего рифея – нижнего кембрия.

Месторождение Верхняяюское-2 и рудопроявление Верхнелекелецкое относятся к жильному золото-сульфидно-кварцевому типу, золото-мышьяковому (арсенопиритовому) подтипу. Вмещающими породами на Верхняяюском-2 служат вулканиты основного состава бедамельской серии верхнего рифея – верхнего венда. Руды представлены преимущественно пиритом и арсенопиритом с тонкодисперсным золотом, второстепенные минералы – самородное золото, сфалерит, халькопирит, галенит, редко встречаются блеклые руды и минералы висмута. Содержание сульфидов в жилах колеблется от 1–2 до 70%. Среднее содержание Au 4.8 г/т, по отдельным пробам достигает 32.1 и 92.4 г/т. Рудопроявление Верхнелекелецкое локализуется в краевой части дайки долеритов. Рудная зона представляет собой полосу метасоматитов переменной мощности (0.5-2 м), параллельную контакту дайки, с вкрапленной сульфидной минерализацией, четковидной кварцевой жилой и многочисленными прожилками, также содержащими сульфидную (золото-арсенопирит-пиритовую) минерализацию [4].

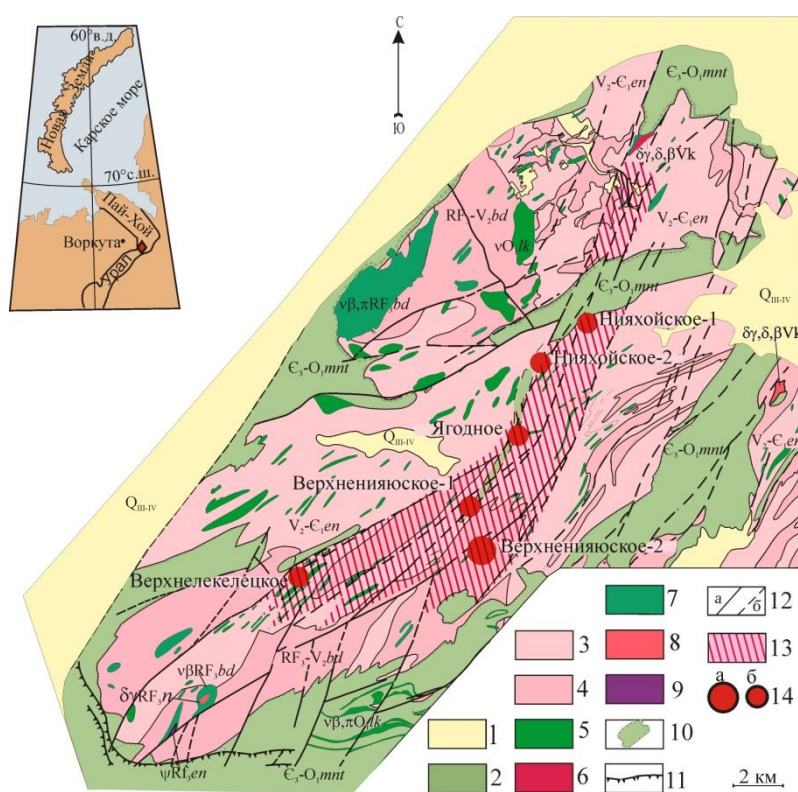


Рисунок 1 – Геологическое строение и золоторудные проявления Манитаньрдского района [5].

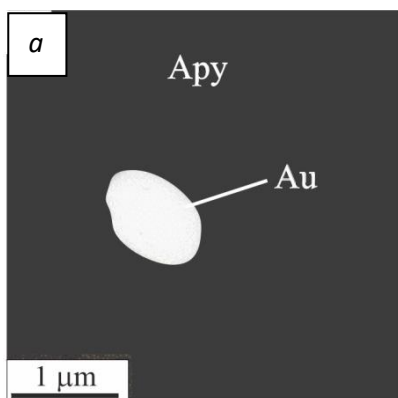
1 – четвертичные отложения; 2 – манитаньрдская серия ($C-O_1mnt$): конгломераты, гравелиты, кварцитопесчаники; 3 – энганэпейская свита (V_2-C_1en): переслаивание алевритистых сланцев, туфопесчаников, туфоконгломератов; 4 – бедамельская серия (RF_3-V_2bd) эффузивы основного, среднего, реже кислого состава, их туфы. Интрузивные образования: 5 – леквожский комплекс: габбро, пикродолериты; 6 – кызыгейский комплекс габбро-диоритовый плутонический; 7 – экструзивно-субвулканические образования нижней толщи бедамельской серии: габбро, габбро-долериты; 8 – нияюский комплекс плагиогранит-тоналитовый плутонический; 9 – энганэпейский комплекс гипербазитовый плутонический; 10 – зона несогласия; 11 – тектонические покровы; 12 – разрывные нарушения: а – достоверные по геологическим данным, б – предполагаемые; 13 – Нияюская рудная зона. 14 – золоторудные месторождения (а) и проявления (б).

Рудопроявления Верхненияюское-1, Нияхойское-1 и 2, Ягодное относятся к типу минерализованных зон с вкрапленной сульфидной, преимущественно пиритовой минерализацией (содержание сульфидов 1–2%, Au первые г/т), и немногочисленными, маломощными сульфидно-кварцевыми жилами (среднее – 7.38 г/т Au). Руды размещаются в вулканогенно-осадочных отложениях энганэпейской свиты верхнего венда – нижнего кембрия. Для месторождения и всех рудопроявлений характерна однотипная золото-мышьяковая (пирит-арсенопиритовая или арсенопирит-пиритовая) минерализация с второстепенной золото-халькопирит-галенит-сфалеритовой ассоциацией, проявленной в разной степени.

2. Минеральный состав руд

Главными рудными минералами на всех рудопроявлениях являются пирит и арсенопирит, но их соотношение варьирует. В подчиненном количестве постоянно присутствуют сфалерит (преобладает), халькопирит, галенит, но иногда они образуют значительные скопления. В небольших количествах часто встречаются тетраэдрит (иногда теннантит), редкие минералы – аурустибит, самородный висмут, сульфосоли, сульфоантимониды и сульфоарсениды (гисенит, айкинит, буланжерит, ульманит, герсдорфит). На месторождении Верхненияюское-2 отчетливо выделяются две стадии рудообразования: ранняя золото-пирит-арсенопиритовая с тонкодисперсным золотом и поздняя золото-халькопирит-галенит-сфалеритовая с крупным золотом, блеклыми рудами и сульфосолями Pb, Cu, Bi, Sb, разделенные периодом катаклаза [5]. На других рудопроявлениях ранняя золото-пирит-арсенопиритовая стадия с тонкодисперсным золотом проявлена повсеместно, однако халькопирит, галенит и сфалерит – главные минералы поздней стадии на месторождении Верхненияюское-2, встречаются здесь только в виде микровключений в арсенопирите и пирите, редко в кварце [6].

Золото в рудах связано с сульфидами и встречается в двух формах. Оно образует субмикронные и микронные выделения в пирите и арсенопирите размером от 500 нм до 20 мкм (преимущественно 1-5 мкм) (ранняя стадия рудообразования). Более крупные частицы самородного золота размером от 0.5 до 1.5-2 мм развиваются по трещинкам в пирите и арсенопирите в ассоциации с минералами поздней стадии – сфалеритом, халькопиритом, галенитом, реже с тетраэдритом и минералами висмута (рисунок 2).



б

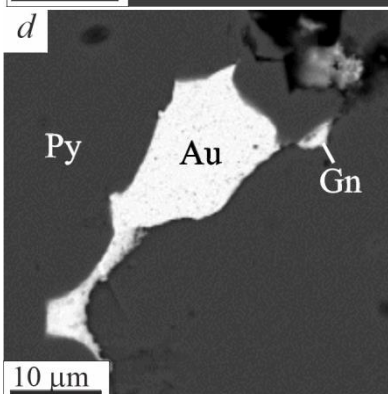
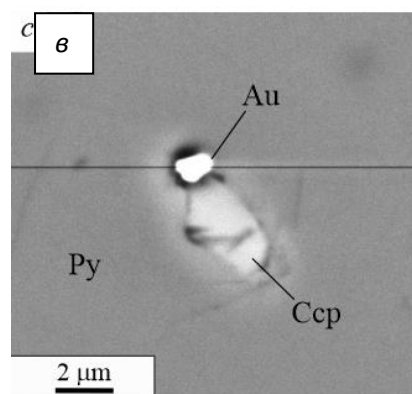


Рисунок 2 – Формы выделения самородного золота в рудах: а, б – тонкодисперсное, субмикроскопическое в арсенопирите и пирите (Верхненияуское-2 и Ягодное соответственно), в – самородное (Верхненияуское-2). Аббревиатура: Ару – арсенопирит, Ру – пирит, Сср – халькопирит, Гп – галенит, Au – золото.

3. Типоморфные особенности самородного золота

На всех изученных рудопроявлениях тонкодисперсное золото ранней стадии (золото I) характеризуется средней и высокой пробностью с максимумами этого значения в областях 800-900‰, 900-950‰ и 950-1000‰ и относительно низкой дисперсией, основной примесью является Ag (рисунок 3). Самородное золото поздней стадии (золото II) на месторождении Верхненияуское-2 имеет относительно низкую пробность с полимодальным распределением на гистограмме пробности, разброс значений этого показателя лежит в области 300-950‰ (рисунок 3, а). Типоморфным признаком золота поздней стадии является присутствие наряду с Ag примеси Hg. На проявлениях Нияхойское-2, Верхнелекелецкое, Ягодное золото ранней стадии (золото I) отличается средней и высокой пробностью с одномодальным распределением и небольшой дисперсией в области 800-950‰ (рисунок 3, б, в, г). Золото поздней стадии (золото II) имеет относительно более низкую пробность также с одномодальным распределением и небольшой дисперсией. Примесь Hg, наряду с Ag, присутствует в золоте обеих стадий на Нияхойском-2 и не обнаружена на рудопроявлениях Верхнелекелецкое и Ягодное.

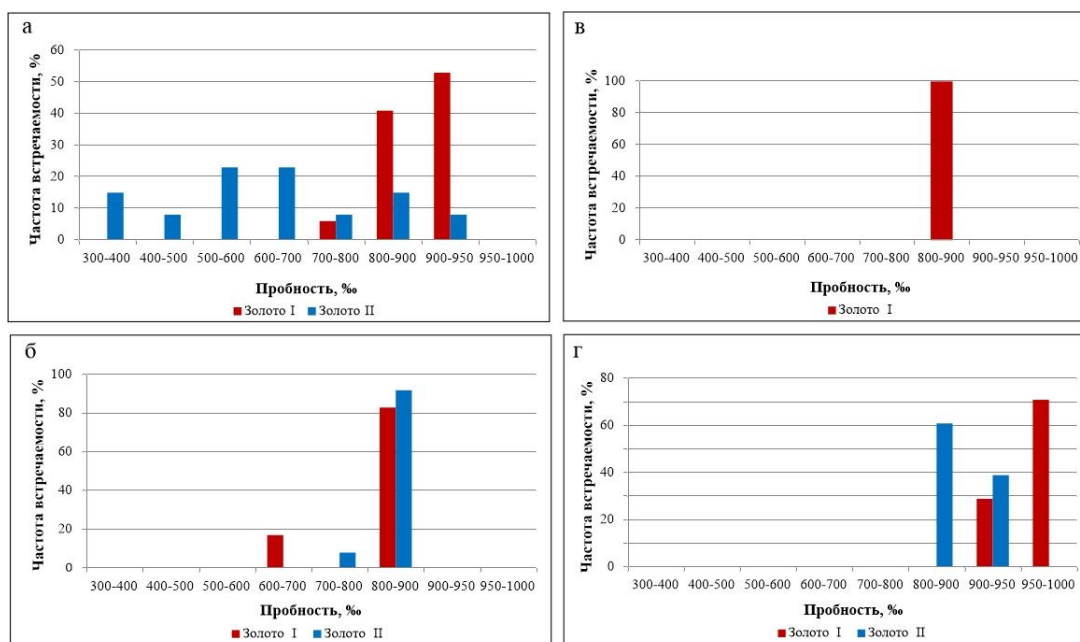


Рисунок 3 – Гистограммы пробности золота в проявлениях Манитаньрдского района: а – Верхненияуское-2, б – Нияхойское-2, в – Верхнелекелецкое, г – Ягодное

Таким образом, существенные различия в пробности золота ранней и поздней стадий установлены на месторождении Верхненияуское-2, на других рудопроявлениях они незначительны. Вместе с тем, золото поздней стадии (золото II) минерализованных зон (Нияхойское-2, Ягодное) характеризуется, преимущественно средней пробностью (800-900‰). Соотношение Au:Ag в рудах Верхненияуское-2 в среднем составляет 1:3, но в пределах месторождения варьирует в широких пределах – от 1:1 до 1:80, крайне редко в отдельных пересечениях встречаются значения 2:1 и 1:100.

Самородное золото месторождения Верхненияуское-2 по типоморфным особенностям (низкая пробность, широкий разброс значений этого показателя и полимодальное распределение) сходно с эпитермальными вулканогенными месторождениями, а рудопроявлений Нияхойское-2 и

Ягодное (средняя и высокая пробность, одномодальное распределение с низкой дисперсией) с золото-мышьяково-сульфидными в черносланцевых толщах [3] и в вулканогенных комплексах [7].

4. Выводы

1. Золото в рудах Манитаньрдского района связано с сульфидами и встречается в двух формах – субмикронных и микронных выделениях в пирите и арсенопирите, и в виде частиц самородного золота в халькопирит-галенит-сфалеритовая ассоциации.
2. Существенные различия в пробности золота ранней и поздней стадий установлены на месторождении Верхнеияуское-2, на других рудопроявлениях они незначительны.
3. По типоморфным особенностям золота жильное золото-сульфидно-кварцевое месторождение Верхнеияуское-2 сходно с эпиптермальными вулканогенными месторождениями, тогда как золотосульфидные минерализованные зоны (Нияхойское-2, Ягодное) – с золото-мышьяково-сульфидными в черносланцевых толщах и редко в вулканогенных комплексах. Основные выводы исследования могут быть представлены в кратком разделе выводов, который может быть выделен отдельно или образовывать подраздел обсуждения или раздела результатов и обсуждения.

5. Благодарности

Работа выполнена в рамках госзадания Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.

6. Литература:

- [1] Pal'yanova, G.A. Physicochemical modeling of the coupled behavior of gold and silver in hydrothermal processes: Gold fineness, Au/Ag ratios and their possible implications // Chem. Geol., 2008, vol. 255, pp. 399-413.
- [2] Volkov, V.A. Gold-sulfide deposits of disseminated ores in the North-East of Russia: features of the geological-genetic model // Gold and technology, 2021, vol. 4 (54), pp. 48-58.
- [3] Savva, N.E., Kravtsova, R.G., Anisimova, G.S., Palyanova, G.A. Typomorphism of Native Gold (Geological-Industrial Types of Gold Deposits in the North-East of Russia) // Minerals 2022, 12, 561. <https://doi.org/10.3390/min12050561>
- [4] Mayorova, T.P., Efanova, L.I., Sokerina, N.V. Mineralogical and geochemical features of the ores of the Verkhnelekeletskoye gold-quartz-sulfide occurrence in the Polar Urals (Manitanyrd Ridge) // Vestnik of Geosciences, 2022, vol. 6(330), pp. 10-25. DOI: 10.19110/geov.2022.6.2
- [5] Kuznetsov, S.K., Mayorova, T.P., Sokerina, N.V., Filippov, V.N. Gold ore mineralization of the Verkhneniyayuskoye deposit in the Polar Urals. Russ. Zapiski RMO, 2011, CXXXX, vol. 4, pp. 58-71.
- [6] Efanova, L.I., Kuznetsov, S.K., Tarbaev, M.B., Mayorova, T.P. Gold mineralisation of the Manitanyrd region and prospects for the development of resource potential (Polar Urals) // Ores and metals, 2020, vol. 3, pp. 39–51. DOI: 10.24411/0869-5997-2020-100.
- [7] Kryazhev, S.G., Dvurechenskaya, S.S., Okulov, A.V., Fedak, S.I. Gold-arsenic sulfide mineralization of the Kayancha area, Gorny Altai // Ores and metals, 2023, vol. 4, pp. 36-51. DOI: 10.47765/0869-5997-2023-10018

УДК 551.14, 552.321.6 (571.56)

**ПАЛЕОГЕОТЕРМА, МЕТАСОМАТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И
ГЛУБИННЫЕ РАЗРЕЗЫ МАНТИИ ПОД НЕКОТОРЫМИ ТРУБКАМИ
АЛАКИТ-МАРХИНСКОГО КИМБЕРЛИТОВОГО ПОЛЯ**

Максим Милаушкин^{1,2}, Владимир Мальковец^{1,2}, Анастасия Гибшер^{1,2}, Игорь Яковлев^{1,2}

¹ АК «АЛРОСА» (ПАО), 630007, Россия, г. Новосибирск, ул. Советская, 5

² ФГБУН «Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева»,

630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3

**PALAEOTHERM, METASOMATIC TRANSFORMATIONS AND MANTLE
DEPTH SECTIONS BENEATH SOME PIPES OF THE ALAKIT-MARKHA
KIMBERLITE FIELD**

Maksim Milaushkin^{1,2}, Vladimir Malkovets^{1,2}, Anastasiya Gibsher^{1,2}, Igor Yakovlev^{1,2}

¹ PJSC «ALROSA», 6, Lenin str., Mirny, 678175, Russia

² Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3, Akademika Koptyuga ave.,
Novosibirsk, 630090, Russia

Abstract. Clinopyroxene xenocrystals from the heavy fraction mineral concentrate of the Yubileinaya pipe and garnet xenocrystals from Bobkov, CNIGRI, Schukina, Iskorka, Morozovykh, Amakinskaya, Kismet, Sytykanskaya and A16/A17 pipes were studied. The mantle palaeogeotherm beneath the Yubileinaya kimberlite pipe was reconstructed using monomineral clinopyroxene geothermobarometry and FITPLOT software. It was found that the paleogeotherm of the Yubileinaya kimberlite pipe corresponds to a surface heat flux of 34.8 mW/m². The lithosphere thickness is 230 km and the "diamond window" thickness is 110 km. The "diamond window" thickness, determined by the "Y-edge", is 75 km. Based on the calculated equilibrium temperatures of the garnets and their Y contents, the depths of the basement of the depleted lithosphere ("Y-edge") beneath the studied kimberlite pipes were calculated. Using the reconstructed palaeogeotherm and the "Y-edge", the thickness of the diamond window was calculated for the TSNIGRI pipe - 60 km, Sytykanskaya - 60 km, Iskorka - 55 km, Bobkova - 47 km, Amakinskaya - 47 km, Kismet - 46 km, A16/A17 - 45 km, Schukina - 37 km, Morozovs - 36 km. The chemical composition of garnets indicates three types of metasomatic transformations of the lithospheric mantle - metasomatism with the participation of carbonatite melts/fluids (S-shaped REE spectra), metasomatism with the participation of silicate melts (enrichment of Ti and HFSE) and metasomatism with the participation of water-potassium fluids (enrichment of Zr, without significant enrichment of Y and HFSE). Two rock types were found to predominate: Depleted peridotites and deformed lherzolites metasomatized by silicate melts. The depth distribution of peridotite garnets was used to construct sections of mantle columns beneath kimberlite pipes. It was found that the mantle section beneath the Morozovs, Schukina, A16/A17, Kismet, Amakinskaya, Bobkova pipes from depths below 160-170 km and beneath the Iskorka, Sytykanskaya and CNIGRI pipes from depths below 180-185 km is dominated by garnets of deformed lherzolites. At this depths, the rocks have been subjected to strong metasomatic action of silicate melts. At depths of 125-185 km the rocks have been affected by carbonatite melts/fluids and to a lesser extent phlogopite metasomatism. Thus, the low diamondiferousness of the nearby pipes is associated with both the low thickness of the diamond window and a higher degree of diamond-destroying metasomatism by silicate melts.

1. Введение

Кимберлитовые трубки являются основными месторождениями алмазов, которые также предоставляют уникальный материал для исследования самых глубинных частей литосферной мантии. Кимберлиты встречаются в пределах древних кратонов, возраст формирования литосферы которых начинается с 3,6 млрд лет, таким образом литосфера кратонов является своеобразным породным архивом, который запечатлел максимально длительную петрологическую эволюцию литосферы.

Алмазоносность кимберлитов зависит от многих факторов, таких как мощность кратонной литосферы опробуемой кимберлитовой магмой, мощность опробуемого “алмазного окна”, а также степени проявления мантийных метасоматических процессов.

Для выяснения мощностей литосферы и “алмазного окна” традиционно используется метод реконструирования палеогеотермы с применением методов минеральной геотермобарометрии, главным образом по ксенолитам перидотитов. Кимберлиты трубок Алакит-Мархинского кимберлитового поля (АМКП) как правило интенсивно серпентинизированы; свежие неизмененные ксенолиты отсутствуют. Вследствие этого расчет палеогеотермы по традиционным методам минеральной термобарометрии для ксенолитов произвести не представляется возможным. Однако в концентрате тяжелой фракции кимберлитов (КТФ) присутствуют гранаты и клинопироксены мантийных парагенезисов подходящие для проведения расчетов РТ параметров методами мономинеральной термобарометрии.

С целью расширения представлений о строении и составе литосферной мантии под АМКП была оценена палеогеотерма, мощность литосферы и “алмазного окна” под трубкой Юбилейная на основе изучения клинопироксенов из КТФ трубки Юбилейная. Для характеристики мантийных парагенезисов и построения мантийных колонн распространения разных типов породных ассоциаций в литосферной мантии под кимберлитовыми телами, изучен химический и редкоэлементный состав гранатов из некоторых трубок АМКП.

Объектами исследования являются несколько близкорасположенных кимберлитовых трубок: Юбилейная, Бобкова, ЦНИГРИ, Щукина, Искорка, Морозовых, Амакинская, Кисмет, Сытыканская, А16/А17. Трубки как правило перекрыты терригенными и терригенно-осадочными породами каменноугольного и каменноугольно-пермского возраста. Возраст трубок оценивается как среднепалеозойский (D_3-C_1). Абсолютный возраст для большинства трубок определен по Rb/Sr изохроне и варьирует от ~360 до 370 млн лет. Более надежные датировки имеются для трубки Юбилейная 356 ± 7 млн. лет (SHRIMP по перовскиту) [1]. Алмазоносность исследуемых тел варьирует, но в целом, за исключением трубок Юбилейная и Сытыканская трубки являются низко-убогоалмазоносными.

Химический состав 199 зерен клинопироксенов и 1288 зерен гранатов определялся на приборе Jeol JXA 8100 в ЦКП “Многоэлементных и изотопных исследований” ИГМ СО РАН (г. Новосибирск). Микроэлементный состав 1273 зерен гранатов исследован методом ЛА-ИСПМС в Лаборатории экспериментальной геохимии и петрологии мантии Земли (Геолого-геофизический факультет Новосибирского государственного университета). РТ параметры равновесия клинопироксенов рассчитывались с применением термобарометра NT00 [2], а мантийная палеогеотерма на момент внедрения кимберлитов ~356 млн лет была реконструирована с помощью программы FITPLOT [3]. При использовании программы FITPLOT использовались следующие параметры: значение теплогенерации в мантии - 0 мВт/м^3 [3], а значение температуры мантийной адиабаты на поверхности 1315°C [3]. Выбранные значения мощности верхней (ВК) и нижней коры (НК) составили 12 км и 29 км, соответственно. Теплогенерация в ВК составляет 0.76 мкВт/м^3 , а в НК – 0.36 мкВт/м^3 . РТ параметры равновесия гранатов рассчитывались с помощью Ni-в-гранате и Cr-в-гранате геотермобарометра [4]. Нижняя граница деплетированной литосферы – «Y-край» определялась на основе рассчитанных температур равновесия гранатов и содержания в них Y. Построение разрезов мантийных колонн осуществлялось по методологии [5, 6].

2. Результаты

2.1 Исследование хромдиопсидов из трубки Юбилейная и построение мантийной палеогеотермы

Для идентификации клинопироксенов из гранатовых перидотитов использовалась классификационная диаграмма [7], основанная на содержании Cr_2O_3 и Al_2O_3 в хромдиопсидах. Для отбраковки клинопироксенов, не находящихся в равновесии с гранатом и ортопироксеном в условиях мантии, использовались фильтры, предложенные [2, 8]. В результате из 199 клинопироксенов пригодными для построения геотермы оказались 63 хромдиопсида. Результирующий поверхностный тепловой поток реконструированной палеогеотермы составил 35.5 мВт/м^2 , при мощности литосферы 218 км, и мощности “алмазного окна” 93 км.

В глубинной части мантии на глубинах от 167 до 213 км выделяется группа высокотемпературных точек с рассчитанными температурами $> 1200^\circ\text{C}$. Эти хромдиопсиды были исключены из дальнейших построений, так как их РТ параметры превышают значение теплового потока и занижают мощность литосферы. Данное обстоятельство связано либо с особенностями термобарометра PNT00, так как экспериментальные данные использованные для его калибровки были получены только до 60 кбар [8], либо с локальным тепловым воздействием астеносферы на глубинную часть литосферной мантии, что привело к образованию так называемых катаклазированных перидотитов и повышенным значениям температуры равновесия исследуемых хромдиопсидов [9].

Среди 63 хромдиопсидов присутствует восемь зерен с низкими параметрами давления (20-27 кбар) и температурами от 725 до 846°C . Возможно, что эти малоглубинные хромдиопсиды не характеризуют первоначальные свойства литосферной мантии, а происходят из горизонта, где восходящие расплавы останавливаются на достаточно долгое время и реагируют с более холодной литосферой, образуя текстурно уравновешенные крупнозернистые гибридные породы до извержения вмещающего их кимберлита [9]. Поэтому эти хромдиопсиды также были исключены из процедуры построения палеогеотермы.

Значения температур равновесий, оставшихся 23 зерен хромдиопсидов варьируют от 752 до 1175°C , а значения давлений от 32 кбар до 62 кбар, что соответствует глубинам ~ 100 -194 км. Результирующий тепловой поток составил 34.8 мВт/м^2 , а мощность литосферы и “алмазного окна” 230 км и 105 км. Таким образом палеогеотерма реконструированная по РТ параметрам 23 хромдиопсидов, представляет собой среднюю часть разреза, с наиболее холодным тепловым потоком [10], который вероятней всего отображает стабильную кондуктивную геотерму, не подвергшуюся разогреву мантийными расплавами [9, 10].

В работе [9] приведены РТ оценки хромдиопсидов из ксенолитов трубки Удачная в том числе и по мономинеральному клинопироксеновому термобарометру NT00. Мы использовали приведенные в работе [9] РТ оценки клинопироксенов для реконструирования палеогеотермы под трубкой Удачная для того чтобы сравнить палеогеотерму, мощности литосферы и “алмазного окна” под трубками Юбилейная и Удачная. Параметры мощности и теплогенерации использованные при реконструировании палеогеотермы трубки Удачная такие же как для трубки Юбилейная.

Результирующий поверхностный тепловой поток для трубки Удачная составил 35.1 мВт/м^2 , при мощности литосферы 224 км, и мощности “алмазного окна” 99 км. По причине высоких температур равновесия мы исключили хромдиопсиды из переходных и катаклазированных перидотитов из трубки Удачная и использовали только хромдиопсиды из крупнозернистых перидотитов. В результате тепловой поток составил 34.7 мВт/м^2 , мощность литосферы 233 км, мощность “алмазного окна” 108 км.

Полученные результаты указывают на то, что палеогеотермы трубок Юбилейная и Удачная характеризуются близкими значениями теплового потока, а также мощностью литосферы и мощностью “алмазного окна”. Однако алмазоносность кимберлитов трубки Юбилейная в 2 раза ниже алмазоносности трубки Удачная. Следовательно, разница в алмазоносности может быть связана не только с мощностью опробуемой литосферы и “алмазного окна”, но и также с

другими петрологическими параметрами, такими как степень проявления алмазо-генерирующего и алмазо-деструктивного метасоматоза [6].

2.2 Исследование состава гранатов из трубок Алакит-Мархинского поля

Среди изученных гранатов из девяти кимберлитовых трубок большая часть зерен (967 гранатов, 75.1%) представлена гранатами перидотитового парагенезиса. Среди гранатов перидотитовой ассоциации преобладают лерцолитовые гранаты (568 зерен из 967; 58.7%). Верлитовые гранаты представлены в незначительном количестве (21 гранат из 967; 2,2%). Остальные 378 зерен (39,1%) относятся к гарцбургит-дунитовой ассоциации. Среди гарцбургит-дунитовых гранатов в поле включений в алмазах попадает 163 (16.7%) граната. Около четверти гранатов (298 зерен, 23.1%) относятся к мегакристовой ассоциации. Эклогитовые и коровые гранаты присутствуют в количестве 14 зерен (1.1%) и 9 зерен (0.7%), соответственно.

В процентном отношении среди изученных гранатов, согласно классификации [11], большинство зерен (67.6%) представлено гранатами из лерцолитов, в три раза меньше гранатов из кальциевых гарцбургитов (20.5%), из низкокальциевых гарцбургитов – 5.3%, из верлитов – 3.8%, из низкохромистых гранатов – 2.8%.

Гарцбургитовые гранаты (кальциевые и низкокальциевые) характеризуются синусоидальными спектрами распределения REE_N. Такое распределение характерно для минеральных включений перидотитовых гранатов в алмазах («Р-тип»). Предполагается, что образование S-образных спектров РЗЭ в гранатах из гарцбургит-дунитов связано с метасоматическим воздействием на них карбонатитовых расплавов/флюидов, обогащенных LREE и обедненных MREE, HREE и HFSE. В целом для кальциевых и низкокальциевых гранатов характерен положительный наклон спектров от La_N к Nd_N, отрицательный наклон спектров от Sm_N до Dy_N и положительный от Ho_N до Yb_N. В низкокальциевых гранатах синусоидальность спектров распределения REE выражена отчетливо, тогда как часть гранатов из кальциевых гарцбургитов характеризуются спектрами с повышенными концентрациями MREE и HREE, из-за чего синусоидальность выражена слабо или отсутствует. Особенно ярко это проявлено в гранатах из трубок Сытыканская (~60%), Шукина (~60%), Искорка (~50%). Такая картина распределения элементов может объясняться высокой пропорцией «переходных» гранатов, расположенных вблизи границы гарцбургиты/лерцолиты на диаграмме CaO/Cr₂O₃.

Для лерцолитовых гранатов характерны спектры распределения REE типичные для гранатов из фертильной мантии (низкие содержания LREE и высокие MREE и HREE). Однако стоит отметить, что часть лерцолитовых гранатов характеризуются синусоидальными спектрами REE, с высокими содержаниями LREE и пониженным содержанием MREE. Это может быть связано с отсутствием в системе клинопироксена и/или указывать на очень высокие степени карбонатитового метасоматоза.

Верлитовые и низко-Cr-гранаты (Cr₂O₃<1.5 мас. %) гранаты характеризуются широким диапазоном концентраций MREE и HREE, и «нормальными» (типичными для гранатов из фертильной мантии) спектрами распределения REE.

По содержанию Y, Zr, Ti в область деплетированных перидотитов попадают низкокальциевые гарцбургиты и большая часть кальциевых гарцбургитов. Концентрации Y и Zr в этих гранатах не превышают 15 и 40 ppm, соответственно. Такие низкие содержания указывают на то, что эти гранаты были вынесены из мантийных пород, которые не подвергались воздействию мантийного метасоматоза, а представляют собой рестит от плавления. Часть гранатов как из кальциевых гарцбургитов, так и лерцолитов попадают в поле флогопитового метасоматоза. В область силикатного метасоматоза попадают преимущественно гранаты из лерцолитов.

На основе рассчитанных температур равновесия гранатов и содержания в них Y, была определена нижняя граница деплетированной литосферы – «Y-край» [11], в гранатах из трубки Бобкова «Y-край» составляет 1079°C, ЦНИГРИ - 1163°C, Шукина - 1041°C, Искорка - 1090°C, Морозовых - 1031°C, Амакинская - 1094°C, Кисмет - 1017°C, Сытыканская - 1161°C, А16/А17 -

1072°C. В гранатах из трубки Юбилейная «У-край» определен по гарцбургитовым гранатам в работе [12] и составляет 1250°C.

Лерцолитовые гранаты по температурам равновесия подразделяются на две группы. Первая характеризуется умеренными температурами, не превышающими температуры ~1100-1150°C. Данная группа соответствует типичным кратонным лерцолитам, обедненным несовместимыми элементами в результате процессов частичного плавления литосферной мантии. Вторая группа ($T > 1150-1200^\circ\text{C}$) обогащена Y, Zr, Ti, относится к деформированным перидотитам и является результатом взаимодействия астеносферных расплавов с вмещающим деплетированным мантийным субстратом [11].

Для построения глубинных разрезов мантийных колонн, которые представляют собой распространение разных парагенетических типов гранатов по глубине, была проведена проекция полученных температур равновесия гранатов на реконструированную по клинопироксенам из трубки Юбилейная палеогеотерму. В результате установлены глубины распространения гарцбургит-дунитовых гранатов и мощности «алмазного окна» под исследуемыми трубками: ЦНИГРИ (125-185 км), Сытыканская (125-185 км), Искорка (125-180 км), Бобкова (125-172 км), Амакинская (125-172), Кисмет (125-171 км), А16/А17 (125-170 км), Щукина (125-162 км), Морозовых (125-161 км). На этих глубинах мантийные породы испытывали воздействие карбонатитовых расплавов/флюидов и в меньшей степени флогопитового метасоматоза. С глубин от нижней химической границы литосферы (НХГЛ) и ниже в мантийном разрезе под трубками начинают преобладать гранаты с признаками силикатного метасоматоза. Это означает, что породы из которых они вынесены были подвержены сильному метасоматическому воздействию силикатных расплавов.

3. Выводы

1. С использованием мономинеральной клинопироксеновой геотермобарометрии для клинопироксенов из КТФ месторождения трубки Юбилейная реконструирована мантийная палеогеотерма на момент внедрения кимберлитов соответствующая тепловому потоку $34,8 \text{ мВт/м}^2$ и мощности литосферы ~230 км. Мощность «алмазного окна» для трубки Юбилейная составляет 75 км.
2. С использованием палеогеотермы для трубки Юбилейная рассчитана мощность алмазного окна для трубок ЦНИГРИ – 60 км, Сытыканская – 60 км, Искорка – 55 км, Бобкова – 47 км, Амакинская – 47 км, Кисмет – 46 км, А16/А17 – 45 км, Щукина – 37 км, Морозовых 36 км.
3. Низкая алмазность близкорасположенных трубок связана как с низкой мощностью «алмазного окна», так и с более высокой степенью алмазо-деструктивного метасоматоза силикатными расплавами.
4. Химический состав гранатов указывает на три типа метасоматических преобразований литосферной мантии – с участием карбонатитовых расплавов/флюидов (S-образные спектры REE), метасоматоза с участием силикатных расплавов (обогащение Ti и HFSE) и метасоматоза с участием водно-калиевых флюидов (обогащение Zr, без существенного обогащения Y и HFSE).
5. Установлено, что с глубин 160-170 км в мантийном разрезе под трубками Морозовых, Щукина, А16/А17, Кисмет, Амакинская, Бобкова, а под трубками Искорка, Сытыканская и ЦНИГРИ с глубин 180-185 км преобладают гранаты из деформированных лерцолитов. На этой глубине породы были подвержены сильному метасоматическому воздействию силикатных расплавов. На глубинах 125-185 км породы испытывали воздействие карбонатитовых расплавов/флюидов и в меньшей степени флогопитового метасоматоза.

4. Благодарности

Авторы признательны АК «АЛРОСА» (ПАО) за предоставленные зерна клинопироксенов и гранатов и любезного разрешения на проведение и публикацию исследований. Исследования проводились при поддержке гранта РНФ 22–27–00724.

5. Литература:

- [1] Lepekhina E. et al. SHRIMP U-Pb zircon ages of Yakutian kimberlite pipes //International Kimberlite Conference: Extended Abstracts. – 2008. – Т. 9.
- [2] Nimis P., Taylor W. R. Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotites. Part I. Calibration and testing of a Cr-in-Cpx barometer and an enstatite-in-Cpx thermometer //Contributions to Mineralogy and Petrology. – 2000. – Т. 139. – С. 541-554.
- [3] Mather K. A. et al. Constraints on the depth and thermal history of cratonic lithosphere from peridotite xenoliths, xenocrysts and seismology //Lithos. – 2011. – Т. 125. – №. 1-2. – С. 729-742.
- [4] Ryan C. G., Griffin W. L., Pearson N. J. Garnet geotherms: Pressure-temperature data from Cr-pyrope garnet xenocrysts in volcanic rocks //Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 1996. – Т. 101. – №. B3. – С. 5611-5625.
- [5] O'Reilly S. Y., Griffin W. L. Imaging global chemical and thermal heterogeneity in the subcontinental lithospheric mantle with garnets and xenoliths: Geophysical implications //Tectonophysics. – 2006. – Т. 416. – №. 1-4. – С. 289-309.
- [6] Malkovets V. G. et al. Diamond, subcalcic garnet, and mantle metasomatism: Kimberlite sampling patterns define the link //Geology. – 2007. – Т. 35. – №. 4. – С. 339-342.
- [7] Ramsay R. R., Tompkins L. A. The geology, heavy mineral concentrate mineralogy, and diamond propectivity of the Boa Esperanca and Cana Verde pipes, Corrego D'anta, Minas Gerais, Brasil //The geology, heavy mineral concentrate mineralogy, and diamond propectivity of the Boa Esperanca and Cana Verde pipes, Corrego D'anta, Minas Gerais, Brasil. – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, Special Publication, 1994. – С. 329-345.
- [8] Ziberna L. et al. Error sources in single-clinopyroxene thermobarometry and a mantle geotherm for the Novinka kimberlite, Yakutia //American Mineralogist. – 2016. – Т. 101. – №. 10. – С. 2222-2232.
- [9] Liu Z. et al. Thermal and compositional anomalies in a detailed xenolith-based lithospheric mantle profile of the Siberian craton and the origin of seismic midlithosphere discontinuities // Geology. – 2022. – Т. 50. – №. 8. – С. 891–896.
- [10] Ionov D. A., Doucet L. S., Ashchepkov I. V. Composition of the lithospheric mantle in the Siberian craton: new constraints from fresh peridotites in the Udachnaya-East kimberlite //Journal of petrology. – 2010. – Т. 51. – №. 11. – С. 2177-2210.
- [11] Griffin W.L., Ryan C.G. Trace elements in indicator minerals: area selection and target evaluation in diamond exploration // Journal of Geochemical Exploration, 1995, vol. 53, pp. 311-337.
- [12] Griffin W. L. et al. The Siberian lithosphere traverse: mantle terranes and the assembly of the Siberian Craton //Tectonophysics. – 1999. – Т. 310. – №. 1-4. – С. 1-35.

**ЛИТОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ОБСТАНОВКИ
ФОРМИРОВАНИЯ ЮРСКИХ ПОРОД ИНЬЯЛИ-ДЕБИНСКОГО СИНКЛИНОРИЯ**

Татьяна Михалицына¹, Инесса Брынько²

ФГБУН «Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский
институт им. Н.А. Шило ДВО РАН», 685000, Россия, г.Магадан, ул. Портовая, 16

**LITHOLOGICAL AND GEOCHEMICAL FEATURES AND CONDITIONS OF
FORMATION OF JURASSIC ROCKS OF YIGNALI-DEBINSKY SYNCLINORIUM**

Tatiana Mikhailitsyna¹, Inessa Brynko²

North-East Interdisciplinary Scientific and Research Institute FEB RAS,
16 Portovaya st., Magadan, 685000, Russia

Abstract. As a result of the analysis of the material composition, generalization and interpretation of geochemical data, some features of the formation of Jurassic sedimentary rocks on the territory of the Inyali-Debinsky synclinorium (Debinsky zone) have been revealed. The chemical composition of the rocks is normally alkaline with a predominance of potassium type. They have a high degree of weathering. The enrichment of Au, Ag, Sc, V, Cr, As, Sb, Cs, and EPG rocks has been established in comparison with their average contents in the upper crust. In the Buchennachskaya Formation sediments (the zone associated with faults), increased concentrations of Ni, Co and W are noted, with a decrease in Au contents. High total concentrations of REE, a bright manifestation of Eu/Eu*, the absence or slight anomaly of Ce/Ce* have been established, all this reflects that precipitation was formed in marginal continental environments. Paleogeodynamic interpretation of the totality of the geochemical data obtained indicates that sedimentation occurred in relatively shallow water conditions, warm climate in an oxide environment. The feeding area that supplied the detrital material to the sedimentation basin could be the Uda-Murgal volcanic arc, composed of rocks of basic and medium composition.

1. Введение

Исследования направлены на определение роли конседиментационных и последующих эпигенетических процессов в формировании золотых руд, приуроченных к определенным стратиграфическим горизонтам. Ключевым акцентом является получение геохимических и минералогических характеристик ранее установленных стратиграфических горизонтов, благоприятных для локализации золотого оруденения [1]. Всестороннее изучение юрских пород позволит проследить эволюцию седиментогенеза мезозойских черносланцевых толщ и оценить их участие в формировании благороднометалльного оруденения.

В настоящей публикации рассмотрен химический состав осадочных пород ранне- и среднеюрского возраста и на основании его интерпретации проведена реконструкция палеогеодинамической обстановки их формирования с определением вероятных источников питания бассейна седиментогенеза.

Литологией и разработкой вопросов стратиграфии осадочных пород Иньяли-Дебинского синклинория в разное время занимались Ю.М. Бычков (1964, 1966, 1967), О.Г. Эпштейн (1971), И.А. Паньчев (1966), В.Е. Литвинов и Б.И. Мальков (1972), Ю.С. Репин в соавторстве с И.В. Полуботко (1996). Начиная с 1936 года, были проведены разномасштабные геолого-съёмочные работы (Б.Н. Владимиров, 1936; А.И. Неймарк, 1945; А.М. Мильков, 1945; П.А. Попов, 1958; И.А. Харьков, 1958; В.Е. Кульков, 1959; Б.И. Мальков, 1965; О.П. Сторожук 1975; 1985; В.В. Уманцев, 1989; В.Г. Ермоленко 1991; В.В. Петухов, 1998; В.А. Шишкин, 2000).

В основу работы положены материалы, полученные авторами при полевых и лабораторных исследованиях в СВКНИИ ДВО РАН в процессе выполнения НИР по программам РАН, гранта

Министерства образования Магаданской области (Соглашение №060) и при участии НОЦ «Север».

Для аналитических исследований отбирались образцы из естественных обнажений пород, наименее затронутые вторичными преобразованиями. Все геохимические работы проводились в ИТиГ ДВО РАН (г. Хабаровск) методом ICP-MS. Они включали в себя определение 46 элементов, в том числе лантаноидов, также было выполнено определение элементов группы благородных металлов (Au, Pt, Ir, Pd, Rh, Ru) с предварительным соосаждением с теллуром; рентгенофлуоресцентным методом проведен силикатный анализ (с учетом общей серы). Всего проанализировано 36 образцов.

2. Литолого-геохимический состав юрских терригенно-осадочных пород Иньяли-Дебинского синклинория.

В тектоническом плане район исследований расположен в юго-восточной части Иньяли-Дебинского синклинория, близ его сочленения с Буюндино-Балыгычанским поднятием и Аян-Юряхским антиклинорием.

Иньяли-Дебинский синклинорий входит в состав Куларо-Нерского турбидитового террейна, являющегося частью Яно-Колымского орогенного пояса. Его строение детально было изучено А.Д. Чеховым (1976, 1990), который выделил юго-западное и северо-восточное крылья и осевую зону, разделенные крупными разломами [2]. Иньяли-Дебинский синклинорий характеризуется изоклинальной складчатостью с преобладанием линейных складок северо-западного и субширотного простирания; доминированием разломов северо-западного простирания; развитием мощных (до 9 км) толщ терригенно-осадочного, терригенно-вулканогенного комплексов, преимущественно юрского возраста. Осадочные толщи регионально-метаморфизованы (начальная ступень зеленосланцевой фации). Юрские отложения развиты в основном в осевой части и северо-восточном крыле, объединены в верхоянский комплекс и слагают Иньяли-Сугойскую область, подразделяющуюся на Иньяли-Дебинскую и Бахапчино-Сугойскую подобласти [3]. Рассматриваемая Иньяли-Дебинская подобласть в свою очередь подразделяется на 9 структурно-фациальных зон, из которых объекты исследований расположены в пределах Дебинской структурно-фациальной зоны [4].

Геохимическое опробование тонкообломочных пород проводилось на двух участках. Первый участок расположен в районе Дебинского прижима, по левобережью р. Колымы в зоне сопряжения крупных разломов Дебинско-Умарского и Паутовского [5]. Представлен нижнеюрскими отложениями бюченнахской свиты (J_1bc), сложенной переслаиванием глинистых сланцев с алевролитами и редкими прослоями мелкозернистых песчаников. Второй участок находится ниже устья руч. Развилистый (левый борт р. Дебин), сложен среднеюрскими породами дебинской свиты (J_2db), представленной переслаиванием темно-серых глинистых сланцев с алевро-глинистыми сланцами, серыми алевролитами с маломощными линзами песчаников. В отложениях обеих свит отмечается вкрапленность пирита.

Распределение петрогенных элементов. По химическому составу (Таблица 1) осадочные породы двух участков близки между собой, преобладающими компонентами являются SiO_2 – среднее содержание 60,68-64,30%; Al_2O_3 – среднее содержание 16,91%-17,80%; количество SiO_2 и Al_2O_3 составляют 77,36%-81,99% (J_1bc , J_2db соответственно). В подчиненном количестве содержатся Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O , CaO , MgO общее содержание, которых составляет в среднем 15,26%-13,05%, из них щелочные элементы Na_2O и K_2O – 5,11%-5,50% (в среднем для J_1bc и J_2db соответственно). По отношению Na_2O/K_2O среди осадочных пород отмечается преобладание калиевого типа. Суммарная щелочность пород колеблется от 3,92% до 6,24%. Содержание TiO_2 , MnO и P_2O_5 составляет - 1,26%-1,16% (в среднем для J_1bc и J_2db соответственно).

Характеристика петрохимических модулей. При исследовании осадочных пород применение литохимических модулей дает возможность более точно проводить их классификацию, восстанавливать петрогенетический характер источников сноса, реконструировать

геодинамические особенности обстановок осадконакопления [6]. Для вычисления модулей используются массовые содержания оксидов (%), расчеты проводились по [7]. Наиболее информативные петрохимические модули осадочных пород приведены в таблице 1.

По гидролизатному модулю (ГМ 0,31-0,49) породы $J_1b\check{c}$ соответствуют глинистым разностям и некоторым основным грауваккам; более широкий диапазон гидролизатного модуля отмечается в алевролитах J_2db (ГМ 0,28-0,51), где одна проба относится к гидролизатным глинистым породам. Алюмокремниевый модуль (АМ) отражает ту же тенденцию химического выветривания, что и гидролизатный модуль. В отложениях J_2db отмечается нарушение корреляции АМ и ГМ, что может указывать на наличие чуждых примесей в породе (низкие АМ при высоких значениях ГМ возникают при появлении железистого вулканогенного материала). Кроме главного классификационного модуля ГМ для более детальной характеристики метаосадочных образований использованы дополнительные петрохимические параметры, учитывающие градации пород по их железистости, фемичности, титанистости и щелочности. Железный модуль (ЖМ) выражает соотношение между железистыми и глиноземистыми продуктами гидролиза. Величина ЖМ для большинства проб значительно меньше единицы и укладывается в интервал 0,20-0,60, что соответствует норможелезистым сиаллитам со стандартным содержанием основных петрогенных окислов; исключением является одна проба $J_1b\check{c}$ с содержанием ЖМ – 0,86 (где Fe_2O_3 – 10,59%).

Таблица 1 – Химический состав (масс %) и петрохимические модули юрских тонкообломочных пород Иньяли-Дебинского синклинория (Дебинская зона)

Оксиды	$J_1b\check{c}$ (n-20)	J_2db (n-15)	Модули	$J_1b\check{c}$ (n-20)	J_2db (n-15)
SiO ₂	<u>50.40-65.84</u> 60.68	<u>57.03-69.96</u> 64.30	ГМ	<u>0.31-0.49</u> 0.41	<u>0.28-0.51</u> 0.37
TiO ₂	<u>0.70-1.20</u> 0.92	<u>0.57-1.35</u> 0.81	АМ	<u>0.21-0.34</u> 0.28	<u>0.21-0.36</u> 0.28
Al ₂ O ₃	<u>11.79-19.34</u> 16.91	<u>14.56-20.69</u> 17.80	ТМ	<u>0.042-0.063</u> 0.055	<u>0.03-0.07</u> 0.04
Fe ₂ O ₃	<u>5.06-10.59</u> 6.65	<u>3.57-6.83</u> 5.11	ЩМ	<u>0.41-1.92</u> 0.89	<u>0.35-2.54</u> 1.07
MnO	<u>0.03-1.13</u> 0.13	<u>0.04-0.08</u> 0.05	ОНЩ	<u>0.23-0.36</u> 0.30	<u>0.27-0.34</u> 0.31
CaO	<u>0.20-8.19</u> 1.34	<u>0.28-2.01</u> 0.71	ЖМ	<u>0.27-0.86</u> 0.40	<u>0.20-0.39</u> 0.28
MgO	<u>1.60-2.79</u> 2.20	<u>1.01-2.63</u> 1.75	ФМ	<u>0.07-0.13</u> 0.10	<u>0.02-0.06</u> 0.04
Na ₂ O	<u>1.66-2.90</u> 2.31	<u>1.52-4.23</u> 2.62	СIA	<u>38-74</u> 65	<u>61-72</u> 67
K ₂ O	<u>1.45-4.10</u> 2.80	<u>1.66-4.37</u> 2.88	CIW	<u>41-83</u> 74	<u>66-87</u> 76
P ₂ O ₅	<u>0.12-0.64</u> 0.21	<u>0.13-1.07</u> 0.29	Fe/Mn	<u>6,0-185</u> 118	<u>56-115</u> 88
S	<u>0.01-4.71</u> 0.70	<u>0.03-0.87</u> 0.40	Ti/Zr	<u>0.006-0.012</u> 0.009	<u>0.004-0.012</u> 0.007
Total	<u>100.07-101.72</u> 100.28	<u>100.02-100.42</u> 100.13	Th/U	<u>4-6</u> 5	<u>4-8</u> 5

Примечание: n – количество проб.
Над чертой – минимальное и максимальное содержание; под чертой – среднее.

Фемический модуль (ФМ) имеет большое значение при распознавании петро- и пирогенных (вулканогенных) отложений - такие породы практически всегда характеризуются значениями ФМ > 0,10. По величине фемического модуля пробы J_2db попадают в интервал 0,02-0,06 с

явным тяготением слюдисто-хлоритовых разностей пород к нижней границе этого интервала; в породах $J_1b\check{c}$ ФМ поднимается до 0,12-0,13. Величина титанового модуля (ТМ), которая зависит от титанистости петрофонда и динамической сортировки обломочного материала, колеблется для $J_1b\check{c}$ в диапазоне от 0,042 до 0,063; в отложениях J_2db – ТМ 0,034-0,065. Максимальные ТМ значения свойственны хорошо отсортированным, многократно переотложенным песчаным породам, минимальные характерны для аргиллитов флиша. По значениям общей нормированной щелочности рассматриваемые породы относятся к нормально-щелочным (ОНЩ 0,23-0,36 – $J_1b\check{c}$, 0,27-0,34 – J_2db). Щелочной модуль (ЩМ) в отложениях J_2db варьирует от 0,35 до 2,54, но в большинстве проб ЩМ < 1.

Для оценки палеоклимата применены индексы химического выветривания CIA [8] и CIW [9]. Используя в качестве критерия для разграничения отложений, формировавшихся в различных климатических обстановках величину коэффициента CIA=70 (CIW=80), т.е. невыветрелые породы характеризуются значениями CIA порядка 50, сильновыветрелые разности имеют CIA до 100 единиц. В отложениях $J_1b\check{c}$ индекс CIA варьирует от 38 до 74; аналогичное поведение отмечается и для индекса CIW. Для пород J_2db индексы CIA и CIW колеблются в относительно узких интервалах 61-72 и 66-87 соответственно. Надежным индикатором процессов выветривания в области питания также является отношение Th/U, параметр отражающий степень выветривания из-за потери U при окислении; значения Th/U превышающие 4 – показатели интенсивного выветривания [10]. В осадочных породах обеих свит величина Th/U колеблется от 4 до 8, что указывает на относительно высокую степень выветривания исходных пород области размыва.

Редокс-обстановка в седиментационном бассейне нижнего и среднеюрского возраста оценивалась по индексам U/Th и Ni/Co [11]. По данным значений U/Th – 0,16-0,25 ($J_1b\check{c}$), U/Th – 0,13-0,27 (J_2db) и Ni/Co – 1-4 ($J_1b\check{c}$), Ni/Co – 0,8-2 (J_2db) осадки накапливались в окислительных придонных обстановках. Дальность переноса терригенного материала рассматривалось по величине Ti/Zr. Повышенные значения отношения Ti/Zr характерны для пелагических (глубоководных) глин и карбонатных пород, так как при формировании этих отложений существенная роль принадлежит обломкам базальтов, поступающих в осадки со срединно-океанических хребтов или океанических островов [10]. Более высокие значения Ti/Zr отмечаются в отложениях $J_1b\check{c}$, также в них наблюдается резкое, скачкообразное поведение данного индикатора, что может предполагать пульсационный характер поступления осадочного материала в бассейн седиментации. В породах J_2db отношение Ti/Zr несколько снижается и приобретает более равномерный характер поведения.

Распределение редкоземельных элементов (REE) по [10]. При сопоставлении распределения редкоземельных элементов отмечается, что максимальные суммарные содержания REE установлены в образце, представленном переслаиванием аргиллитов и алевролитов J_2db (209,54 г/т), минимальные – в песчанистых алевролитах $J_1b\check{c}$ (64,29 г/т). Отношения LREE/HREE в породах J_2db варьируют от 8,22 до 12,68; наиболее значительна дифференциация в отложениях $J_1b\check{c}$, где LREE/HREE – от 3,89 до 10,50. В целом, осадочные породы двух свит, обогащены легкими REE, имеют ярко выраженную отрицательную Eu аномалию. В породах $J_1b\check{c}$ Eu/Eu* изменяется от 0,49 до 0,70, составляя в среднем 0,62; в отложениях J_2db от 0,56 до 1,04 (единично), в среднем 0,70. Распределение цериевой аномалии Ce/Ce* в юрских отложениях имеет схожий характер: $J_1b\check{c}$ – от 0,93 до 1,08 (в среднем 1,0); J_2db – от 0,86 до 1,14 (среднее 0,86).

Также, распределение REE и редких элементов или их отношений традиционно используются для идентификации состава пород в источниках сноса. Например, значения в сланцах, сформированных за счет гранитоидов по [12] составляют: Th/Co – 0,3-7,5; Th/Sc – 0,6-18; La/Co – 1,4-22; La/Sc – 0,7-28; за счет пород основного состава Th/Co – 0,04-1,4; Th/Sc – 0,05-0,4; La/Co – 0,1-0,4; La/Sc – 0,4-1,1. Для отложений $J_1b\check{c}$ Th/Co – 0,07-3,12; Th/Sc – 0,32-0,69; La/Co – 0,23-9,41; La/Sc – 0,73-2,20; в породах J_2db Th/Co – 0,33-6,57; Th/Sc – 0,30-0,91; La/Co – 1,24-20,69; La/Sc – 1,12-3,91.

Из микроэлементов в юрских отложениях установлены повышенные содержания Au, Ag, Cr, As, Sb, Cs и ЭПГ (элементы платиновой группы) по сравнению со средними содержаниями этих элементов в верхней коре [10]. Повышенные концентрации Ni, Co и W установлены в отложениях J_1bc ; для пород J_2db характерны высокие содержания Cd и Pb. По результатам корреляционного анализа микроэлементов выделяются следующие геохимические ассоциации: J_1bc (20 проб) – Cr-V-Li-Ba(1); Zb-Co-Ni-Sr(2); Mo-Cu-Bi-Sn-As-Sb-Pb(3); Au-W-Ag(4); J_2db (16 проб) – Cr-V-Ba-Li-Sn (1); Ni-Co-Zn-Cu(2); Pb-Sr-Sb(3); Mo-As(4); Au-W(5); Bi-Ag(6). Элементы платиновой группы (ЭПГ) в юрских породах распределены крайне неравномерно. Максимальные концентрации Pd (5,85 мг/т) наблюдаются в аргиллитах J_2db , а повышенные содержания платины Pt (до 5,94 мг/т) характерны для пород J_1bc свиты.

Палеогеодинамическая интерпретация полученных результатов. Интерпретация диаграммы [13], разграничивающей поля вероятного состава материнских пород питающих провинций позволяет предположить, что в период накопления осадков преобладали средние вулканические породы, а также, частично кислые (2 пробы - J_1bc и 3 - J_2db) и в меньшей степени основные вулканические породы (2 пробы - J_1bc) (Рисунок 1, а).

Тектонические обстановки бассейнов седиментации реконструировались при помощи диаграммы Дж. Мейнарда с соавторами [14] и М. Бхатия [15] на которых фигуративные точки юрских осадочных пород преимущественно ложатся в область перекрытия полей соответствующих, как бассейнам, связанным с окраинно-континентальными магматическими дугами, так и задуговым бассейнам океанических островных дуг; единичные проанализированные образцы попадают в поля активных и пассивных континентальных окраин (Рисунок 1, b, c).

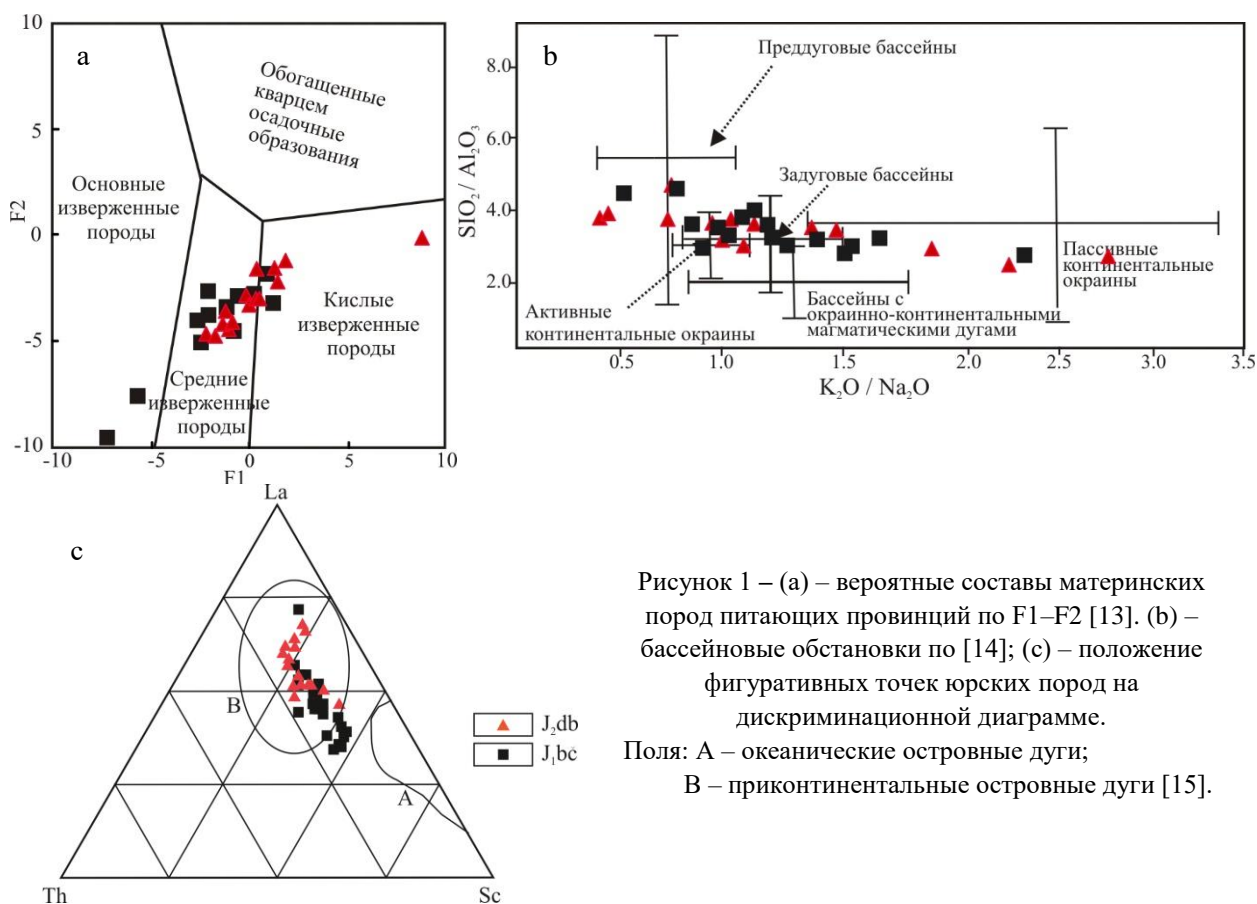


Рисунок 1 – (а) – вероятные составы материнских пород питающих провинций по F1–F2 [13]. (b) – бассейновые обстановки по [14]; (c) – положение фигуративных точек юрских пород на дискриминационной диаграмме.

Поля: А – океанические островные дуги; В – приконтинентальные островные дуги [15].

3. Выводы

В результате обобщения и интерпретации геохимических данных выявлены некоторые особенности формирования ранне-среднеюрских осадочных пород на территории Иньяли-Дебинского синклинория (Дебинская зона):

- по химическому составу породы являются нормально-щелочными с преобладанием калиевого типа (1);
- в геохимическом плане исследуемые породы обогащены Au, Ag, Cr, As, Sb, Cs, ЭПГ по сравнению со средними их содержаниями в верхней коре, для отложений J_1bc (зона сопряженной с разломами) отмечаются повышенные концентрации Ni, Co и W, при снижении содержания Au (2);
- установленные высокие суммарные концентрации REE, отрицательная Eu/Eu* аномалия, отсутствие или незначительная аномалия Ce/Ce*, все это может отражать окраинно-континентальную обстановку формирования (3);
- палеогеодинамическая интерпретация всей совокупности полученных геохимических данных свидетельствует, что седиментация происходила в кислородных условиях при смене режимов от относительно глубоководных (в ранней юре) до шельфовых в среднеюрское время (4);
- источниками сноса являются породы различного состава от кислого до основного, что подтверждается распределением REE и их отношениями Th/Co, Th/Sc, La/Co, La/Sc. Областью питания, поставлявшей обломочный материал в бассейн, могла быть Удско-Мургалская вулканическая дуга, сложенная породами основного и среднего состава, а в среднеюрское время, вероятно, был дополнительный источник питания, располагавшийся в пределах Колымской петли.

4. Благодарности

Авторы благодарят Министерство образования Магаданской области, а также НОЦ «Север» за финансовую поддержку при выполнении исследований.

5. Литература:

- [1] Buryak V. A., Goryachev N. A., Sidorov V. A., Tsybalyuk N. V., Sorokin E. I., Mikhailitsyna T. I., Byakov A. S., Fridovsky V. Yu. The main lithostratigraphic levels of the southeast of the Yano-Kolyma gold-bearing belt, favorable for localization large-volume mining//Problems of geology and metallogeny of Northeast Asia at the turn of the millennium: materials of XI сс. Sev.-Vost. Department of WMO Region. scientific. conf., 100 th anniversary of birth. Yu.A. Bilibina. - Magadan: SVKNIIDVORAS, 2001. - Т. 2. - S. 143-145
- [2] Geodynamics, magmatism and metallogeny of the Russia East: in 2 books. / edited by A. I. Khanchuk. Vladivostok: Dalnauka, 2006. Book 1. p. 572.
- [3] Repin Yu.S., Polubotko I.V. The Lower and Middle Jurassic of North Eastern Russia. Magadan: North-East Scientific Center, 1996. 48 p.
- [4] Resolutions of the Third Cross-Ministerial Regional Stratigraphic Meeting of Pre-cambrian, Paleozoic and Mesozoic in the North-East of Russia (Saint Petersburg, 2002) / Ed. T. N. Root, G. V. Kotlyar. St. Petersburg: Publishing House of VSEGEI, 2009. p. 268
- [5] Goryachev N. A., Palymsky B. F., Petrov A. N., Hasanov I. M. Fault ensembles in the Okhotsk-Kolyma area // Bulletin of Northeast scientific center FEB RAS, 2016, No. 1. P. 3-15
- [6] Sklyarov E. V. G Ladkochub D. P., Donskaya T. V., Ivanov A. V., Letnikova E. F., Mironov A. G., Barash I. G., Bulanov V. A., Syzykh A. I. Interpretation of geochemical data. A. textbook/Ed. E.V. Sklyarova. M.: Internet Inzhiring, 2001. 288 p.
- [7] Yudovich J. E., Ketris M. P. Fundamentals of lithochemistry. St. Petersburg: Science, 2000. 479 p.
- [8] Nesbitt H. W, Young G.M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites // Nature. 1982. V. 299. P. 715–717.
- [9] Harnois L. The CIW index : a new chemical index of weathering // Sed. Geol. 1988. V. 55. №3-4. P. 319-322.

- [10] Taylor S. R. and McLennan S. M. Continental crust: composition and evolution. Moscow: Mir, 1988. 384 pp.
- [11] Jones B., Manning D.A.C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones // Chem. Geol. 1994. V. 111. P. 111–129.
- [12] Cullers R.L. The geochemistry of shales, siltstones and sandstones of Pennsylvanian-Permian age, Colorado, USA: implications for provenance and metamorphic studies // Lithos. 2000. V. 51, 181–203.
- [13] Roser B. P., Korsch R. J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO_2 content and $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ratio // J. Geol. 1986. V. 94, № 5. P. 635–650.
- [14] Maynard J. B., Valloni R., Yu H.S. Composition of modern deep-sea sands from arc-related basins // Ed. J.K. Leggett. Trench-forearc geology: Sedimentation and tectonics on modern and ancient active plate margins / Blackwell Scientific Publications, Oxford. 1982. Part 2. P. 551–61.
- [15] Bhatia M. R. Plate tectonic and geochemical composition of sandstones // J. Geol. 1983. V. 91, № 6. P. 611–627.

**О ПРИРОДЕ РАЗНОТИПНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ АРИАДНЕНСКОГО
МАССИВА БАЗИТ-УЛЬТРАБАЗИТОВ
(СИХОТЭ-АЛИНСКИЙ ОРОГЕННЫЙ ПОЯС)**

Владимир Молчанов¹, Дмитрий Андросов¹, Михаил Медков², Сергей Иванников²

1 ФГБУН «Дальневосточный геологический институт ДВО РАН»,
690022, Россия, г. Владивосток, Проспект 100-летия Владивостоку, 159

2 ФГБУН «Институт химии ДВО РАН»,
690022, Россия, г. Владивосток, Проспект 100-летия Владивостоку, 159

**ON THE NATURE OF THE HETEROGENEOUS MINERALIZATION OF THE
ARIADNE MASSIF OF BASITE ULTRABASITES
(SIKHOTE-ALIN OROGENIC BELT)**

Vladimir Molchanov¹, Dmitry Androsov¹, Mikhail Medkov², Sergey. Ivannikov²

1 Far East Geological Institute FEB RAS,
159 Prospect 100-letiya Vladivostoka, Vladivostok, 690022, Russia

2 Institute of Chemistry FEB RAS,
159 Prospect 100-letiya Vladivostoka, Vladivostok, 690022, Russia

Abstract. In the south of the Russian Far East, a new promising type of sources of strategic and critically important metals (titanium, gold, platinum, niobium, hafnium, copper, antimony, etc.) has been identified – complex ores and placers spatially and genetically related to the Late Mesozoic synorogenic intrusions of ultrabasic basites of the Sikhote-Alin orogenic belt. An example of this is the Ariadne massif of ultrabasic basites and granitoids, in the mafic part of which there is a manifestation of gold-titanium mineralization, in the exocontact – gold-antimony, and in the near-intrusive zone - gold-copper. It was found that mantle and crustal processes were involved in the formation of different types of ores. The obtained materials open up new opportunities for reevaluation of the prospects of the raw material base of the strategic metals of Primorye.

1. Введение

В последние годы на юге Дальнего Востока России выявлен новый тип проявлений стратегических металлов (Ti, Au, Pt, Cu, Sb и т.д.), пространственно и генетически связанных с базит-ультрабазитами [1]. Примером тому может послужить Ариадненский массив, где в мафической части располагается проявление золото-титановых руд, в эндоконтакте – золото-сурьмяных, а в околоинтрузивной зоне – золото-медные образования. В связи с вовлечением их в сферу промышленного освоения многие вопросы формирования разнотипной минерализации, особенностей концентрирования и происхождения в настоящее время становятся достаточно острыми. Раскрытию отдельных аспектов этой обозначенной проблемы будет способствовать установление генетических особенностей формирования этих рудных образований.

2. Результаты исследований

Ариадненский двухфазный массив, расположенный у одноимённого села в бассейне среднего течения р. Малиновка (площадь водосбора р. Уссури, правого притока р. Амур), представляет собой веретёновидное тело (2×20 км), согласное удлинением генеральному СВ простиранию пликативных структур обрамления. Расположен этот массив в зоне крупного СВ разлома, вследствие чего его границы с вмещающими породами на значительном протяжении прямолинейные тектонические. Геофизические данные и резко асимметричная форма контактового ореола шириной до 200 м вдоль СЗ контакта и до 3 км вдоль ЮВ границы свидетельствуют о пологом погружении кровли плутона в юго-восточном направлении [2]. В

ЮЗ части распространены фации перидотитов, которые постепенно сменяются габбро через ильменитовые, плагиоклазовые мономинеральные и плагиоклаз-оливиновые пироксениты. Центральная часть массива представлена фацией, в различной степени амфиболитизированных габбро от мелкозернистых в СВ краевой части до средне-крупнозернистых и участками пегматоидных. Ильменитовое вкрапленное оруденение сосредоточено преимущественно в ЮЗ части интрузии первой фазы и ограничивается площадью распространения ильменитовых габбро, частично охватывая оливиновые пироксениты и перидотиты. Вторая фаза также переменного состава от диоритов до монцодиоритов слагает СВ часть массива. Наблюдаются апофизы и серии субпараллельных жил и просечек диоритоидов светло-серого цвета в мелкозернистых чёрно-зелёных амфиболовых габбро. Эндоконтактные зоны насыщены остроугольными и оплавленными обломками габбро. Ко второй фазе отнесены также немногочисленные, маломощные дайки диабазов, сиенитов, трахибазальтов и умеренно-щелочных пикритов в интрузии первой фазы и во вмещающих массив роговиках, а также своеобразные дайки флюидоэксплозивных брекчий умеренно-щелочных пикритов, приуроченные к ЮВ экзоконтакту плутона. Возможно, что граниты на СВ окончании массива являются фазой Ариадненского массива.

Ариадненский рудно-россыпной узел, совпадающий с контурами одноименного массива, где среди базитов располагается Ариадненское золото-ильменитовое месторождение с россыпями р. Падь Тодохова и кл. Потапова, в экзоконтакте интрузии - золото-сурьмяное Тодоховское рудопроявление и на удалении в черносланцевых породах - золото-медное Конторское рудопроявление.

Для выяснения особенностей происхождения рудного вещества предлагается рассмотреть модель, основанную на предположении о первично магматическом генезисе благороднометальной минерализации, ее связи с ультрабазитами. О возможности существования самородных металлов в мантии свидетельствуют металлические пленки, в том числе и золотые, на алмазах [3]. Помимо золотых пленок, на алмазах установлено присутствие первичных включений ильменитов, что нашло свое отражение в формировании золото-ильменитовых руд Ариадненского месторождения. Ранее отмечалось [4], что транспорт благородных металлов может осуществляться в виде углеродсодержащих комплексов, таких как карбонилы, алогенкарбонилы, металлофуллерены, устойчивых при температурах выше 400-500⁰С. Мантийный флюид, судя по исследованиям газовых включений в первичных порообразующих минералах из ультрабазитов Полярного Урала [5], весьма насыщен разнообразными летучими углеродистыми соединениями (СО, СО₂, СН₄, С₂Н₄, С₂Н₂ и др.), а также свободным водородом и азотом. Водородно-метановый газовый режим способствовал восстановлению самородных металлов с растворенными в них азотом и углеродом. Это практически тот же спектр основных примесей, что и в самородном золоте антимонит-кварцевых жил Тодоховского проявления, из экзоконтактной зоны ультрабазитов. Более того, появление углеродистого пленочного покрытия на этих золотилах, возможно, связано с каталитическими реакциями разложения металлоорганических соединений с образованием твердых фаз на поверхности катализатора, в данном случае, золота [6]. Наличие углеродистых пород во внешнем контуре интрузии могло оказаться благоприятным фактором для локализации медных руд Конторского проявления. Эти осадочные породы могли играть роль геохимического восстановительного барьера для рудоносных флюидов, продуцируемых интрузией ультраосновного состава. Присутствие купроаурида в рудных образованиях [7], в нашем случае медной минерализации, может рассматриваться как отражение их генетических связей с ультрабазитами.

Для оценки источников рудного вещества был проанализирован изотопный состав серы сульфидов, а точнее пирротина золото-титановых руд Ариадненского месторождения, антимонита золото-сурьмяных образований Тодоховского проявления, а также пиритов медных руд Конторского проявления. Было установлено, что изотопные характеристики серы этих сульфидов в целом обладают высокой степенью гомогенности, укладываясь в довольно узкий

интервал, несколько облегченный относительно ультраосновных пород [8]. При этом, значения $\delta^{34}\text{S}$ (4 анализа) пирротина меняются от -3.0 до -3.1‰. Для антимонитов величины $\delta^{34}\text{S}$ (5 анализов) сдвигаются в более тяжелую сторону от -1.8 до -1.5 ‰, тогда как значение $\delta^{34}\text{S}$ для пиритов медных руд (4 анализа) варьируется от -3.1 до -3.5 ‰. Изотопное фракционирование обусловлено, скорее всего, изменениями физико-химических характеристик рудообразующих флюидов (Eh-pH, температуры) в направлении от центра интрузии (ильменитовые габбро, золото-титановые руды) к ее периферии, обусловивших развитие в экзоконтакте и околоинтрузивной зоне ультрабазит-базитов золото-сурьмяных и золото-медных образований. В сущности, изотопно-легкий состав сульфидной серы разнотипных руд свидетельствует, скорее всего, об участии в их формировании коровых процессов. Представляется, что наиболее вероятным источником серы были коровые породы, обогащенные органическим веществом, контаминированные в процессе становления Ариадненской интрузии. Сульфат-редукция осадочных сульфатов привела к появлению значительных количеств сероводорода [9]. Этот сероводород участвовал как в формировании сульфидов титановых руд, так и сурьмяной и медной минерализации. Появление сурьмы и меди в рудоносных флюидах также может быть связана с их мобилизацией из корового вещества. К настоящему времени накоплен значительный материал [10], указывающий на возможность корового происхождения многих металлов, в том числе сурьмы и меди.

Полученные материалы указывают на то, что внешний контур ультрабазит-базитов, где углеродистые породы могли играть роль физико-химических барьеров для разгрузки золотоносных флюидов, перспективен на выявление промышленного орудинения. Ариадненская интрузия в этом контексте обнаруживает черты сходства с Кедровским и Ирокиндинским массивами ультрабазит-базитов (Забайкалье), где наряду с ильменит-титаномагнетитовыми рудами отмечены золотоносные кварцевые жилы. В непосредственной близости от массивов разрабатываются Кедровское и Ирокиндинское золоторудные месторождения, представленные убогосульфидными и сульфидно-кварцевыми жильными образованиями.

3. Выводы

В результате выполненных исследований на примере Ариадненской интрузии показано, что в формировании позднемезозойских рудоносных ультрабазит-базитов Сихотэ-Алиня участвуют мантийные и коровые процессы. При этом в площадном распределении разнотипных руд просматриваются элементы зональности, свидетельствующие в пользу общего мантийно-корового источника рудного вещества: в центре интрузии ультрабазит-базитов сосредоточена золото-титановая минерализация (Ариадненское месторождение), в ее экзоконтакте – золото-сурьмяные руды (Тодоховское проявление), на удалении к северо-востоку – золото-медные образования (Конторское проявление). Присутствие купроаурида в рудных образованиях последнего рассматривается как отражение их генетических связей с поздними этапами ультрабазит-базитового магматизма.

4. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект 23-17-00093 (<https://rscf.ru/project/23-17-00093>).

5. Литература:

- [1] Khanchuk, A. I., Molchanov, V. P. and Androsov, D.V. First Finds of Native Gold and Platinum in the Ilmenite Placers of the Ariadnoye Basite–Ultrabasic Intrusion (Primorye) // *Doklady Earth Sciences*, 2020, vol. 492 (2), pp. 422-425.
- [2] Belyanskii, G. S., Rybalko, V. I., Syas'ko, A. A. et al., State Geological Map of the Russian Federation 1 : 1000000 (3rd Generation). Sheet (L-(52), 53); (K-52, 53). Lake Khanka: Explanatory Note (VSEGEI, St. Petersburg, 2011)

- [3] Makeev, A. B., Filippov, V. N. Metallic films on natural diamond crystals. Ichet'yu Deposit, Middle Timan // *Doklady Earth Sciences*, 1999, vol. 368 (6), pp. 1161–1165.
- [4] Zhmodik, S.N., Mironov, A.G. Agafonov, L.V. et al. Carbonatization of East Sayan ultrabasic rocks and Au-Pd-Pt mineralization // *Russ. Geol. Geophys.* 2004, vol. 45 (2), pp.210–225.
- [5] Bryanchaninova, N. I. Gas inclusions in rock-forming silicates of ultramafic rocks of the Polar Urals as characteristics of mantle fluid regime, Diamond and Diamond Potential of the Timan–Uralian Region. Proc. All-Russian Conference. Geoprint, Syktyvkar, 2001, pp. 88–90.
- [6] Puddephatt, R. J. *The Chemistry of Gold*. Elsevier, 1978. 264 p.
- [7] Novgorodova, M. I. *Native Metals in Hydrothermal Ores*. Nauka, Moscow, 1983. 287 p.
- [8] Rollinson, H.R. *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Longman Group UK Ltd, 1993. 352 p.
- [9] Seal, R. Sulfur isotope geochemistry of sulfide minerals // *Rev. Mineral. Geochem.* 2006, vol. 61. pp. 633–677. <https://doi.org/10.2138/RMG.2006.61.12>.
- [10] Ozerova, N. A. *Mercury and Endogenous Ore Formation*. Nauka, Moscow, 1986. 232 p.

ПЕРСПЕКТИВЫ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ СИНСКОГО УЧАСТКА НЕДР

Эдуард Мырьянов, Алексей Сивцев, Мария Карпова
ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова»,
677000, Россия, г. Якутск, ул. Белинского, 58

PROSPECTS OF OIL AND GAS POTENTIAL OF THE SINISK SUBSOIL AREA

Eduard Myryanov, Alexey Sivtsev, Maria Karpova
North-Eastern Federal University, 58, Belinsky str., Yakutsk, 677000, Russia

Abstract. The information on the geological structure and tectonic position of the Sinsky subsurface area is briefly presented. The existing estimate of the density of the initial geological hydrocarbon resources of the site area is given. Based on the published data, three sediment complexes have been identified as the most promising: terrigenous Vendian, carbonate Vendian and carbonate Cambrian. The productivity of the terrigenous part of the section is justified by the forecast of the zone of improved reservoirs and the absence of a belt of dikes on the way of transit of petroleum hydrocarbons from the deep parts of the Aldan anticline and Vilyui syncline. An assumption is made about the possible development of collectors of analogues of the Preobrazhensky horizon within the studied area. The main object of oil and gas exploration is the Cambrian Inican formation enriched with organic matter. The Inican formation, according to seismic surveys within the area under consideration, falls to depths corresponding to the main oil formation zone. The necessity of drilling a parametric well was noted in order to clarify the structural plan and search for oil and gas deposits.

1. Введение

В пределах северного склона Алданской антеклизы целенаправленные работы по поиску месторождений нефти и газа проводились еще в первой половине 20-го века, но работы не увенчались открытием месторождений нефти и газа. Объективными причинами отрицательных результатов представляются: неудачно выбранные районы первоочередных работ из-за слабой изученности, проведение буровых работ без подготовки площадей геофизическими методами, низкий технический и технологический уровень бурения и испытания глубоких скважин в экстремальных горно-геологических условиях, традиционная нацеленность на поиск антиклинальных структур и др.

По результатам аукциона за право пользования недрами, проведенного в конце 2023 года, Синский участок показал высокую востребованность среди недропользователей. Большая часть Синского участка охватывает Северо-Алданскую нефтегазоносную область. До 2022 года данная нефтегазоносная область носила статус потенциально нефтегазоносной. В 2022 году на Мухтинском лицензионном по результатам геологоразведочных работ открыто Мухтинское газовое месторождение и выполнен оперативный подсчет запасов свободного газа по залежам в отложениях толбачанской и чарской свит. По величине начальных извлекаемых запасов газа месторождение относится к крупным, по сложности геологического строения – к сложным. Это месторождение по сути является первым открытым на территории обширной Северо-Алданской НГО [1].

2. Основная часть

В тектоническом отношении участок охватывает части южного борта Виллюйской синеклизы и северного борта Алданской антеклизы. Согласно схеме нефтегазогеологического районирования, он располагается на границе Виллюйской и Северо-Алданской нефтегазоносных областей Хатанго-Виллюйской нефтегазоносной провинции.

В пределах Синского участка нет пробуренных скважин, поэтому представления о разрезе основываются на данных бурения скважин, находящихся на угловых точках Синской площади (Андреевская 2, Бес-Кюэльская 1, Уордахская 1) и по данным скважины Баппагайская 1, которая располагается рядом с границей площади. Разрез осадочного чехла изучаемого участка представлен венд-кембрийскими, верхнепалеозойскими, мезозойскими и четвертичными отложениями.

Глубина залегания фундамента в пределах площади изменяется от 1,5 до 3,0 км с погружением в северном направлении. Скважинами Баппагайской 1 и Уордахской 1, находящимися в пределах Алданской антеклизы, кристаллический фундамент вскрыт на глубине 3282 м и 1972 м. Скважины Андреевская 2 и Бес-Кюэльская 1, пробуренные на территории Виллойской синеклизы, кристаллический фундамент не вскрыли, так как фундамент на этой территории залегает глубже, чем на Алданской антеклизе. Скважина Андреевская 2 пробурена до глубины 2356 м, а скважина Бес-Кюэльская 1 – до 1530 м.

Согласно схеме нефтегазоносности Сибирского федерального округа и Республики Саха (Якутия) под редакцией В.С. Старосельцева (СНИИГГиМС, 2015) Синский участок расположен в зоне сочленения северо-западной части Северо-Алданской НГО и Виллойской НГО с плотностью начальных геологических ресурсов углеводородов 10-30 тыс.т./км².

Ближайшее месторождение, на котором Государственным балансом учтены запасы газа – Соболах-Неджелинское находится в 100 км севернее изучаемой площади. Нефтепровод ВС-ТО проходит в 300 км юго-западнее площади Синского объекта. Газопровод Кысыл-Сыр – Якутск проходит в 60 км севернее участка.

В пределах Синского участка определенные перспективы связываются с вендским терригенным комплексом отложений. По аналогии с продуктивными горизонтами Непско-Ботубинской антеклизы и Предпатомского прогиба представляется, что изучаемый участок перспективен на выявление аналогов ботубинского горизонта – песчаников нижнебюкской свиты.

Песчаники нижнебюкской подсвиты исследовались на многих площадях: Синская, Толбинская, Мархинская, Русско-Реченская, Наманинская, Олекминская (рис.1). Ранее нижнебюкская подсвита не выделялась, поэтому ниже приводятся обобщенные данные, кроме Синской площади, где ботубинский горизонт залегает восточнее сералахского. Здесь песчаники обладают наиболее высокими коллекторскими свойствами (пористость 19%, проницаемость 3680 мД) [5].

При региональном характере проявлений нефтидов в базальных горизонтах венда (Ченкиямская, Ильгирская, Алексеевская, Мархинская, Наманинская и Нижнеамгинская скважины) они отсутствуют на Синской скважине, хотя здесь песчаники венда имеют наилучшие коллекторские свойства. Этот факт можно объяснить тем, что Синская скважина была заложена вблизи зоны даек и отделяется ею от глубокопогруженных частей Алданской антеклизы и Виллойской синеклизы - зоны генерации нефти.

Выше по разрезу в плане нефтегазоносности следует рассматривать терригенно-карбонатные пласты, приуроченные к низам верхней подсвиты юдомской свиты венда, установленные в пределах Уордахской площади. Данные проницаемые пласты, установленные в Уордахской скважине, в региональном плане могут рассматриваться возрастным аналогом преображенского (на юге) и успунского (на севере) горизонтов Непско-Ботубинской антеклизы.

Продуктивность терригенной пачки успунской свиты впервые была установлена в 2017 году по результатам бурения скважины 115Р на Среднеботубинском нефтегазоконденсатном месторождении. При испытании получен приток газа дебитом более 200 тыс. м³/сут. Базальная пачка приурочена к подошве успунской свиты и представлена на большей части площади глинисто-карбонатными разностями. Песчаники базальной пачки в разрезе ряда скважин, вероятно, представляют собой фацию заполнения врезанной долины [1, 2] Аналогичные

фациальные условия, по всей видимости, вскрыты бурением и на Уордахской площади и могут быть распространены на других участках северного склона Алданской антеклизы.

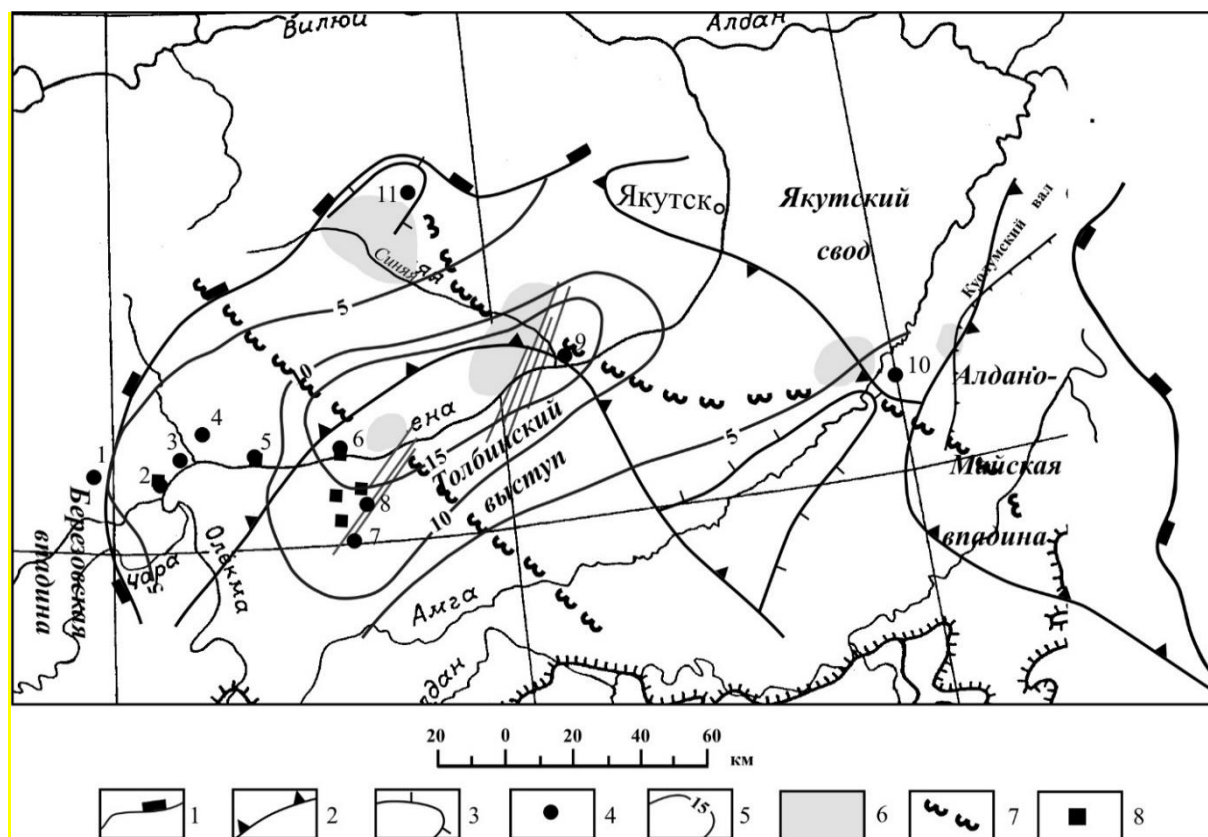


Рисунок 1 – Схематическая карта открытой пористости песчаников венда Северо-Алданской НГО (нижняя часть юдомской, порохтахской свит) [5]

Границы: 1 - нефтегазоносной области, 2 - структур первого порядка, 3 - структур второго порядка; 4 - изученные скважины; 5 - изолинии открытой пористости (в %); скважины: 1 - Усть-Бирюкская, 2 - Олекминская, 3 - Наманинская, 4 - Диринь-Юряхская, 5 - Русско-Реченская, 6 - Мархинская, 7 - Ченкиямская, 8 - Алексеевская, 9 - Синская, 10 - Нихнеамгинская, 11 - Баппагайская.

На наш взгляд, основные перспективы участка связываются с иниканской свитой нижне-среднего кембрия. Свита в непосредственной близости от Синского участка вскрыта Кэнкеменской, Уордахской и Баппагайской площадях и представлена темно-серыми до черными, темно-коричневыми, битуминозными известняками с прослоями темно-серых, иногда известковистых доломитов. Наряду с синской свитой иниканская свита входит в состав Куонамской горючесланцевой формации [3, 4].

По данным сейсморазведочных работ в пределах Синского участка кровля иниканской свиты кембрия находится на глубинах (абс.отм.) от -200 до -3000 м (рис. 2). Предполагается насыщение возможных залежей в основном жидкими УВ. Возможными источниками УВ могут быть обогащенные рассеянным органическим веществом (РОВ) отложения иниканской свиты. В зоне, примыкающей к рифогенным отложениям, катагенез РОВ иниканской свиты достигает градации МК₂, или условий реализации главной зоны нефтеобразования.

Нами осенью 2023 года была организована полевая экспедиция по изучению аналога иниканской свиты на среднем течении реки Лена. От Синского участка недр изученное обнажение находится в 30 и более км. Были обнаружены коренные выходы горючих сланцев синской свиты на дневную поверхность. Образцы, представленные темноцветными породами переданы на геохимический анализ. По предварительным данным они содержат большое

количество РОВ на стадии катагенеза ПК и МК₁. Надо заметить, при соприкосновении с открытым огнем данные образцы свободно горели красным пламенем.

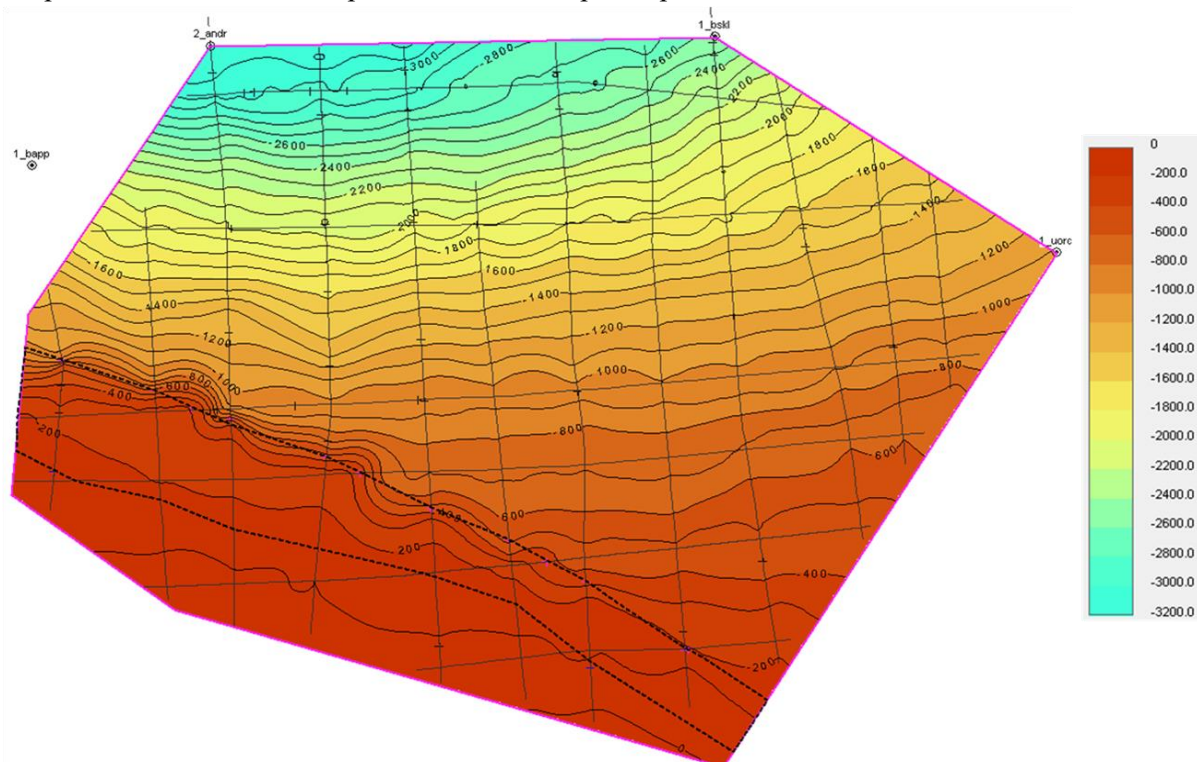


Рисунок 2 – Структурная карта по кровле иниканской свиты [По данным ПАО «Росгеология»].
Пунктиром выделена зона Западно-Якутского барьерного рифового комплекса

В пределах Синского участка недр аналог синской свиты иниканская свита должна была попасть в идеальные условия для нефтеобразования. Учитывая относительно спокойное тектоническое строение вероятность обнаружения залежей нефти в этом районе представляется высокой. В пределах участка резервуарами для нефтегазонакопления могут служить зоны сноса продуктов разрушения барьерного рифа [6].

По перспективам нефтегазоносности пермо-триасового комплекса отложений вопрос остается открытым. Основные региональные флюидоупоры приуроченные к отложениям нижнего триаса выклиниваются, не перекрывая пермские отложения, которые представляются нефтегазоматеринскими в пределах Вилюйской нефтегазоносной области. Уточнение их перспектив в пределах изучаемого участка относится к последующим этапам геологоразведочных работ.

3. Выводы

К первоочередному направлению геологоразведочных работ на Синской площади нужно отнести бурение параметрической скважины для уточнения стратиграфической привязки отражающих горизонтов. Основным проектным горизонтом, на наш взгляд, должна стать иниканская свита кембрия. В пределах только Синского участка недр имеется благоприятное сочетание таких факторов как наличие рифовых массивов, горючесланцевой формации и относительная близость транспортной инфраструктуры и потребителей.

Вторым интересным объектом может рассматриваться терригенная вендская толща – аналог ботубобинского горизонта. Здесь предполагается зона улучшенных коллекторов в терригенном разрезе венда, которая не отдалена от глубоких зон нефтегенерации среднепалеозойскими дайками.

4. Литература:

- [1] Kalinin A.I. Promising oil and gas complexes on the northern slope of the Yakut uplift // *Successes of modern natural science*, 2023, № 12, pp. 185-192, DOI 10.17513/use.38190.
- [2] Agalakov S.E., Gaifullina E. F., Grishchenko M.A., et al. New directions of prospecting and exploration of accumulations of hydrocarbon raw materials // *Business journal Neftegaz.RU*, 2020, № 7(103), pp. 58-64.
- [3] Zueva I.N, Chalaya O.N. and Sivtsev A.I. Comparative characteristics of the Kuonam and Bakken oil shale formations // *Interexpo Geo-Siberia*, 2018, Vol. 2, pp. 65-70, DOI 10.18303/2618-981X-2018-2-65-70
- [4] Sivtsev, A.I., Zueva I.N. and Chalaya O.N. Kuonamskaya oil shale formation as an object of unconventional oil and gas production // *Geology and mineral resources of the North-East of Russia: Proceedings of the VIII All-Russian Scientific and Practical Conference: in 2 volumes*, Yakutsk, April 18-20, 2018, Volume I. Yakutsk: Northeastern Federal University named after M.K. Ammosov, 2018, – pp. 323-326.
- [5] Gornstein D.K. Tectonic structure and prospects of oil and gas potential of the Aldan anteklise. // *M. Nauka*, 1965, 118 p.
- [6] Alexandrov A.R., Sivtsev A.I. Prospects of oil and gas potential of the northern slope of the Aldan anteklise in the zones of reef sediment development. // *Materials of the regional scientific and practical conference dedicated to the 55th anniversary of engineering education in the Republic of Sakha (Yakutia) "Problems of geology and exploration of the subsoil of the North-East of Russia"* - March 29-31, 2011, Yakutsk. – Publishing house of the NEFU printing complex, 2011, Yakutsk. – pp. 7-10.

**МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЗОЛОТА
В КОНГЛОМЕРАТАХ МЕЛОВОГО ВОЗРАСТА
(ВЕРХНЕ-ГОНАМСКИЙ РАЙОН, АЛДАНО-СТАНОВОЙ ЩИТ)**

Зинаида Никифорова, Анатолий Журавлев, Евгений Лоскутов, Алексей Иванов
ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

**MINERALOGICAL FEATURES OF GOLD IN THE CRETACEOUS
CONGLOMERATES (VERKHNE-GONAMSKY REGION, ALDAN-STANOVOY
SHIELD)**

Zinaida Nikiforova, Anatoly Zhuravlev, Evgeny Loskutov, Aleksey Ivanov
Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. The mineralogical and geochemical features of placer gold from the Cretaceous conglomerates of the central part of the Aldan-Stanovy shield have been studied for the first time. It was found that pseudo-ore gold was found in the placer gold of flake and lamellar shape, which is up to 80%. Pseudo-ore gold includes native gold, mainly 0.1-0.25 in size, single grains of interstitial, lumpy and lamellar shape with a typical pitted-tubercular surface with casts of impressing of minerals of the host deposits. Sometimes pseudo-ore gold forms aggregates – intergrowths with quartz and other minerals, single gold particles with through holes and small-scale faults are found. The identification of pseudo-ore gold in the Cretaceous conglomerates indicates the transformation of placer gold in sedimentary deposits, and not the superimposed late ore mineralization.

1. Введение

Золотоносные докембрийские конгломераты толщ известны еще с прошлого века, но до сих пор ведется дискуссия об их генезисе (осадочное или гидротермальное) [1,2,3]. Золотоносность конгломератовых отложений мелового возраста центральной части Алдано-Станового щита (объект Юрский, верховье р. Гонам) установлена в 70-х годах В.Г. Ветлужских [4], позднее подтверждена данными, полученными Ю.А. Зубковым (2005г). Им проведена оценка золотоносности песчано-конгломератовых толщ грабен Верхне-Тимптонского и Верхне-Гонамского золоторудных районов.

Минералого-геохимические особенности самородного золота впервые нами изучены в меловых конгломератах для выявления вторичной наложенной минерализации, в результате проявления мезозойской тектоно-магматической активизации. Скважинами установлен мощный пласт золотоносных конгломератов мелового возраста верхнего течения реки Гонам и ее правого притока ручья Юрский. Опробованы конгломераты в интервале от 0 до 150 м. Изучение золотоносного конгломератового керна из скважин проводилось путем отбора секций длиной от 0,5 до 1,3 м. Галечный материал из конгломератов извлекался отдельно, оставшийся цемент дробился и просеивался через сито, из которого путем промывки получен тяжелый шлик, а затем под бинокуляром отбиралась мономинеральная фракция золота. Россыпное золото исследовано в количестве около 100 знаков из 3-х скважин глубиной 300-400 м. При изучении золота использован комплекс известных минералого-геохимических методов.

2. Основной раздел

Золотоносные конгломераты в бассейне р. Гонам (руч. Юрский) представлены полимиктовыми базальными валунно-галечными образованиями с прослоями, линзами глыбовых конглобрекций, гравелитов и песчаников зеленоватого цвета. Размер гальки от 8-12 см, иногда до 50-60 см, различной окатанности. Мощность песчано-конгломератовой толщи достигает 240

м, а на отдельных участках до 150 м. В составе галечного материала конгломератов присутствуют диафориты, диафорированные кристаллические сланцы, докембрийские плагиограниты и биотитовые граниты – местные породы, что свидетельствует о близости источников сноса. Пробирным анализом установлены содержания золота в меловых конгломератах от 0,05 до 1,5 г/т. Продуктивные золотоносные конгломераты приурочены к базальному горизонту нагорнинской свиты раннего мела. Подстилающими породами являются терригенные отложения юхтинской свиты поздней юры, а местами свита залегает на метаморфических образованиях докембрия. Песчано-конгломератовые отложения перекрываются пирокластическими и эффузивными породами, которые представлены туфами трахиандезитов, трахиандезитобазальтов и базальтов.

Золото характеризуется в основном чешуйчатыми формами размером 0,1-0,25мм, что составляет почти 80% от всего изученного золота (Рисунок 1 а, б, в), иногда отмечаются более крупные золотины до 1,8 мм.

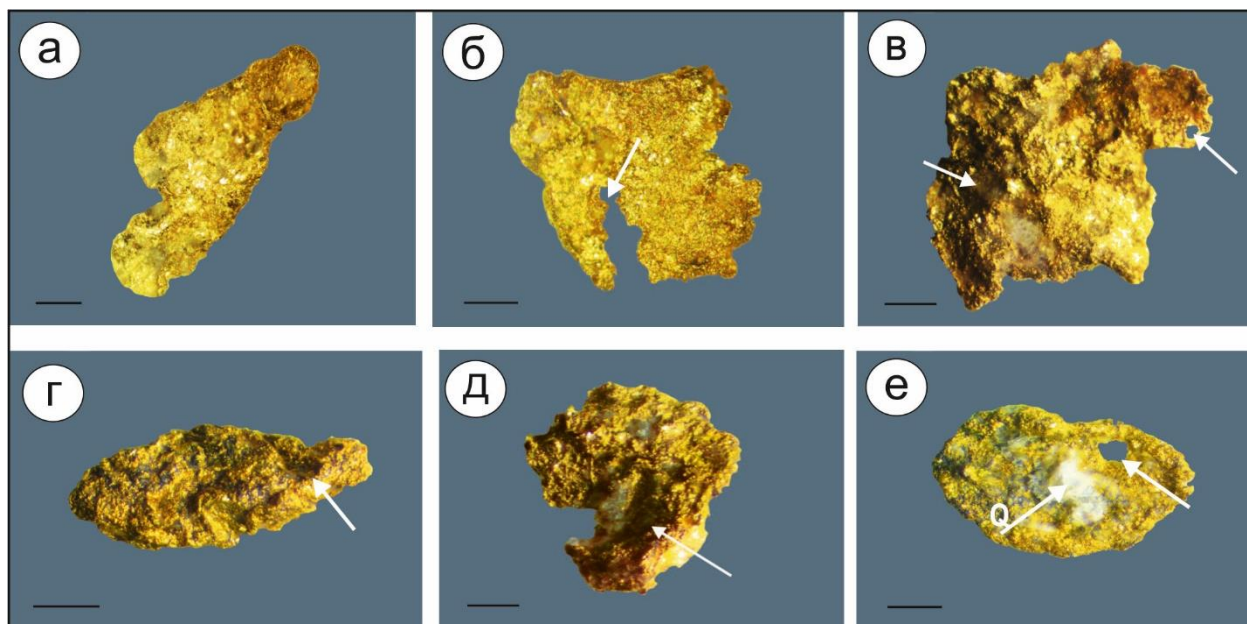


Рисунок 1 – Морфологические формы золота и их поверхность.

а, б, в – чешуйки; поверхность: а – шагрeneвая, б – шагрeneвая с разрывом края золотины; в – грубоямчатая с отпечатками вдавливания минералов со сквозным отверстием; г, д, е – пластинчатые с грубошагрeneвой поверхностью, на которых наблюдаются отпечатки вдавленных минералов; е – золотины в «срастании» с кварцем и со сквозным отверстием.

В подчиненном количестве присутствуют золотины комковидной, пластинчатой и интерстициальной формы. Они имеют преимущественно среднюю обработанность. Золотины желтого и желто-соломенного цвета, поверхность грубоямчатая с отпечатками вдавливания минералов вмещающих отложений. На золотины нередко наблюдаются механические включения кварца, магнетита и других минералов вмещающих отложений. Поверхность у большинства золотины шагрeneвая.

Однако среди хорошо и средне обработанного чешуйчатого золота встречаются неокатанные частицы рудного облика, которые находятся в сростках с кварцем, магнетитом и другими минералами (Рисунок 1 г, д, е). Россыпное золото «рудного» облика характеризуется грубоямчатым, бугорчатым, мелкочаистым микрорельефом. Выступы золотины имеют округленную бугорчатую микроповерхность. Иногда на чешуйчатых и пластинчатых золотины наблюдаются окатанные зерна минералов, которые нередко образуют агрегаты срастания золота с кварцем, полевым шпатом, магнетитом, цирконом и др. минералами (Рисунок 1 д, е). При незначительном нажиме иглой эти агрегаты (сростки золота) легко разрушаются вследствие непрочных контактов золота с минералами вмещающих отложений. При детальном

рассмотрении данных индивидов «рудного» золота под электронным микроскопом было установлено, что некоторые из минералов прилегают к золоту не вплотную, а между ними существует небольшое пространство, что свидетельствует о механическом вдавливании минералов в золото, а не его срастание. Отпечатки вдавленных минералов отличаются округленной формой, отсутствием острых углублений и граней роста. Песчинки кварца имеют окатанную поверхность. На поверхности золотин отмечаются угловатые удлиненные формы вматин в виде продольных борозд, шрамов, царапин и даже сквозные отверстия (Рисунок 1 в, е). Частота встречаемости золотин «рудного облика составляет обычно небольшой процент, но иногда на отдельных участках достигает до 20%.

Обнаружение такого золота давало основание предшествовавшим исследователям предположить, что на сформированную россыпь была наложена вторичная минерализация [5,6,7], в связи с этим велись активные поиски рудных источников. Однако наше детальное изучение позволило предположить, что формирование таких агрегатов «рудных сростаний» золота не сингенетическое и оно относится к псевдорудному золоту. Подобное золото впервые было обнаружено нами в девонских золотоносных конгломератах Тимана [8].

Анализ типоморфных особенностей данного золота, а именно выявление в нем отпечатков вдавленных минералов, непрочных контактов «сростаний» золота с кварцем и другими минералами, а также сквозные отверстия в золотилах (Рисунок 1 в, е) поставили под сомнение правомерность выделения золота как рудного облика в меловых конгломератах. В связи с чем выдвинуто предположение, что данное россыпное золото преобразовалось в результате влияния литостатического давления перекрывающих толщ и приобрело псевдорудный облик. Воздействие литостатического давления на форму россыпного золота нами было изучено ранее экспериментально [9]. При этом было установлено, что первые признаки вдавливания обломочного материала в золотины наблюдались при имитации погружения россыпи на глубину порядка 1 км. При последующем увеличении имитации погружения до 4 км на золотилах появилась грубоамчатая поверхность с отпечатками вдавленных минералов, а также царапины и шрамы. На единичных золотилах произошло вдавливание песчинок кварца и образование агрегатов (срастание золота с кварцем). Было установлено, что процесс преобразования золота резко усиливается в условиях моделирования сочетания литостатического давления с различными тектоническими подвижками. Вполне возможно, что этим и объясняется неравномерность распределения частоты встречаемости «давленного» золота на данном объекте Юрский. Экспериментальные исследования подтверждают предположение, что неокатанное золото рудного облика конгломератов мелового возраста в действительности является россыпным золотом, что подтверждается также результатами химического состава золота. Пробность золота как у хорошо окатанных, так и у слабо окатанных форм и агрегатов золота, одинаковая и варьирует от 722 до 1000 ‰, в среднем 899 ‰, это свидетельствует о том, что золотоносные конгломераты не были подвержены вторичной минерализации.

Таким образом, в меловых конгломератах самородное «рудное» золото (псевдорудное золото) со сквозными отверстиями и разрывами можно объяснить с точки зрения воздействия литостатического давления вышележащих пород. При формировании россыпи мезозойского возраста образовались золотоносные галечно-гравийные аллювиальные отложения, затем эта россыпь, в результате проявления тектонических движений (сброс), была погребена предположительно мощными отложениями до 800 до 1200 метров, согласно разрезу нагорнинской толщи, представленному на стратиграфической колонке к геологической карте 1:200 000 масштаба [10]. Вследствие чего, на основании влияния литостатического давления произошло вдавливание минералов вмещающих толщ, образование разрывов и сквозных отверстий на золотилах. Это в конечном итоге привело к образованию агрегатов «рудного» золота «в сростании» жильных минералов с золотом. Частицы со сквозными отверстиями (псевдорудное золото) также были нами обнаружены в пробах из аллювиальных отложений бассейна р. Гонам.

Итак, результаты минералогического изучения золота из меловых конгломератов руч. Юрский показали, что исследуемое золото имеет существенное сходство с «рудным» золотом, ранее выявленным в конгломератах пермского и юрского возраста на востоке Сибирской платформы [5, 6] и на Восточно-Европейской платформе в конгломератах девонского возраста Тиманского кряжа [7]. В целом, золото «рудного» облика на Тиманском кряже и на востоке Сибирской платформы отнесено нами к псевдорудному золоту [8,9]. Существует предположение, что «рудное» золото конгломератов Витватерсранда также имеет аналогичное происхождение [3].

3. Выводы

Таким образом, результаты минералогических и проведенных ранее экспериментальных исследований дают основания считать, что изученное золото «рудного» облика (агрегаты) из меловых конгломератов является псевдорудным. Оно сформировалось под воздействием литостатического давления при погружении конгломератов на значительную глубину 800-1000 м. Обнаружение псевдорудного золота в конгломератах мелового возраста свидетельствует о преобразовании россыпного золота в результате литостатического воздействия вышележащих пород, а не о наложенной поздней рудной минерализации.

4. Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГАБМ СО РАН.

5. Литература:

- [1] Ivensen Y.P., Levin V.I. Genesis of the Precambrian gold-bearing conglomerates. Proceedings of the Tomsk Polytechnic Institute [Proceedings of the TPI]. 1970. V. 239: Problems of the geology of gold deposits. P. 25–30.
- [2] Davidson C. F. Uniformitarianism and genesis. Min. Mag. v. 110, №3. 1964.
- [3] Oberthur T., Saagger R. Silver and mercury in gold particles from the Proterozoic Witwatersrand placer deposits of Souts Africa: Metallogenic and geochemical implication // Econ. Geol. 1986. Vol. 81. P. 20–31.
- [4] Vetluzskih V.G. Gold content of the southernmost regions of Yakutia // Materials on geology and minerals of the Yakut ASSR. Vy. XVII. Yakutsk. 1970. P. 88–92.
- [5] Aleksandrov A.G., Mendel V.A. Complex gold-rare metal mineralization of basal Paleozoic conglomerates of the Siberian Platform margin // VIII Meeting on the geology of placers. Kiev, 1987. P. 118–120.
- [6] Trushkov Y.N., Izbekov E.D., Tomskaya A.I., Timofeev V.I. The gold content of the Vilyui syncline and its framing. Novosibirsk: Nauka, 1975. P. 149.
- [7] Kotov A.A., Povonsky V.V., Yatskevich B.A. Metal-bearing conglomerates of one of the areas of the Eastern-European Platform // Thesis of the VIII meeting on the geology of placers. Kiev, 1987. P. 176–177.
- [8] Nikiforova Z.S., Filippov V.E., Tsaplin A.E. Aeolian gold of one of the placer deposits of the Timan ridge // Geology of ore deposits. 1991. V. 33. № 2. P. 112–116.
- [9] Nikiforova Z.S., Filippov V.E. Gold of pseudo-ore habit in ancient conglomerates // AS USSR report. 1990. V. 311. № 2. P. 455–457.
- [10] Gimmelfarb G.B., Belonozhko L. B., Zaborsky Y.V. Explanatory note to the geological map of the USSR on a scale of 1:200 000. Stanovaya series, sheet N-51-VI. M.: VAGT, 1970, 1971. P. 99.

**МИНЕРАЛЫ ГРУППЫ ШПИНЕЛИ КИМБЕРЛИТОВ ТРУБКИ ИМ. А.П.
СМЕЛОВА (ЦЕНТРАЛЬНАЯ ЯКУТИЯ)**

Николай Опарин, Олег Олейников
ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

**SPINEL-GROUP MINERALS FROM KIMBERLITES OF THE A.P. SMELOV PIPE
(CENTRAL YAKUTIA)**

Nikolay Oparin, Oleg Oleinikov
Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. The data on the chemical composition and morphological features of spinel-group minerals from kimberlites of the A.P. Smelov pipe (Khompu-May field, Central Yakutia) are presented. The chemistry of spinelides and the established compositional trend allowed to determine the sequence and conditions of their formation.

1. Введение

В настоящей работе рассматриваются особенности морфологии и химического состава минералов группы шпинели кимберлитовой трубки им. А. П. Смелова, расположенной в пределах Хомпу-Майского кимберлитового поля (Центральная Якутия), северный склон Алданской антеклизы.

2. Морфология и особенности химического состава минералов группы шпинели

Кимберлитовая трубка им. А.П. Смелова сложена карбонатизированными и серпентинизированными порфиловым кимберлитом и кимберлитовой брекчией, между которыми существуют постепенные переходы и отсутствуют магматические контакты [1]. Верхняя часть диатремы интенсивно карбонатизирована, вплоть до потери породой первичных текстурно-структурных признаков. Ниже залегают менее измененные вторичными процессами кимберлитовые породы с флогопит-серпентин-карбонатным мезостазиом, в котором широкое распространение имеют минералы группы шпинели – хромит, магнезиохромит, магнезиоферрит, ульвошпинель и магнетит.

Шпинелиды встречаются в следующих формах: 1) в виде идиоморфных и гипидиоморфных гомогенных кристаллов; 2) гетерогенных кристаллов; 3) в составе атоллоидных агрегатов; 4) в виде кайм вокруг ильменита; 5) вростков и включений в пластинках флогопита; 6) макрокристаллов.

При определении химических видов шпинелидов была использована утвержденная ИМА номенклатура [2]. Согласно этой номенклатуре, *гомогенные кристаллы* минералов группы шпинели в основной массе кимберлитов трубки им. А.П. Смелова представлены магнезиохромитом, магнезиоферритом и, в преобладающем количестве, магнетитом (Рисунок 1, а, с). Последний зачастую образует скопления (Рисунок 1, б). Размер таких незональных зерен не превышает 50 мкм.

В составе основной массы наблюдаются редкие *гетерогенные кристаллы* шпинелидов размером от 30 до 40 мкм. Центральная зона таких зерен представлена магнезиоферритом, а периферийная по составу соответствует магнетиту (Рисунок 1, б, ф).

Атоллоидные агрегаты являются наиболее распространенной формой, в которой присутствуют минералы группы шпинели. Для них характерно однородное идиоморфное ядро, которое, в большинстве случаев, представлено магнезиоферритом (Рисунок 1, с), реже магнетитом и ульвошпинелью. Ядро обычно обрамлено «лагуной» (3-20 мкм), которая выполнена серпентином и, в свою очередь, окружена тонким (2-5 мкм) ободком

эпитаксиального облика (Рисунок 1, с), который в точности повторяет форму ядра, что является отражением роста в кристаллографической непрерывности с ядром [3]. По составу и в соответствии с номенклатурой [2] ободок представлен магнетитом, в редких случаях с повышенным содержанием оксида титана (до 9,19 %, Таблица 1). Атоллвидные шпинели диагностированы во многих кимберлитах по всему миру [4, 5, 3, 6, 7]. Существует несколько теорий относительно их генезиса, одной из которых является модель предложенная А. Аберштейнером [8] для атоллвидных агрегатов шпинели из основной массы силлов Бенфонтейн. Изученные агрегаты минералов группы шпинели из трубки им. А.П. Смелова по строению соответствуют 6 стадии этой модели (Рисунок 2), когда в результате процессов постмагматической серпентинизации плеонаст в «лагуне» полностью замещен. В отдельных случаях серпентинизация уничтожила и ядро таких агрегатов, в результате чего сохранился один лишь только ободок (Рисунок 1, с).

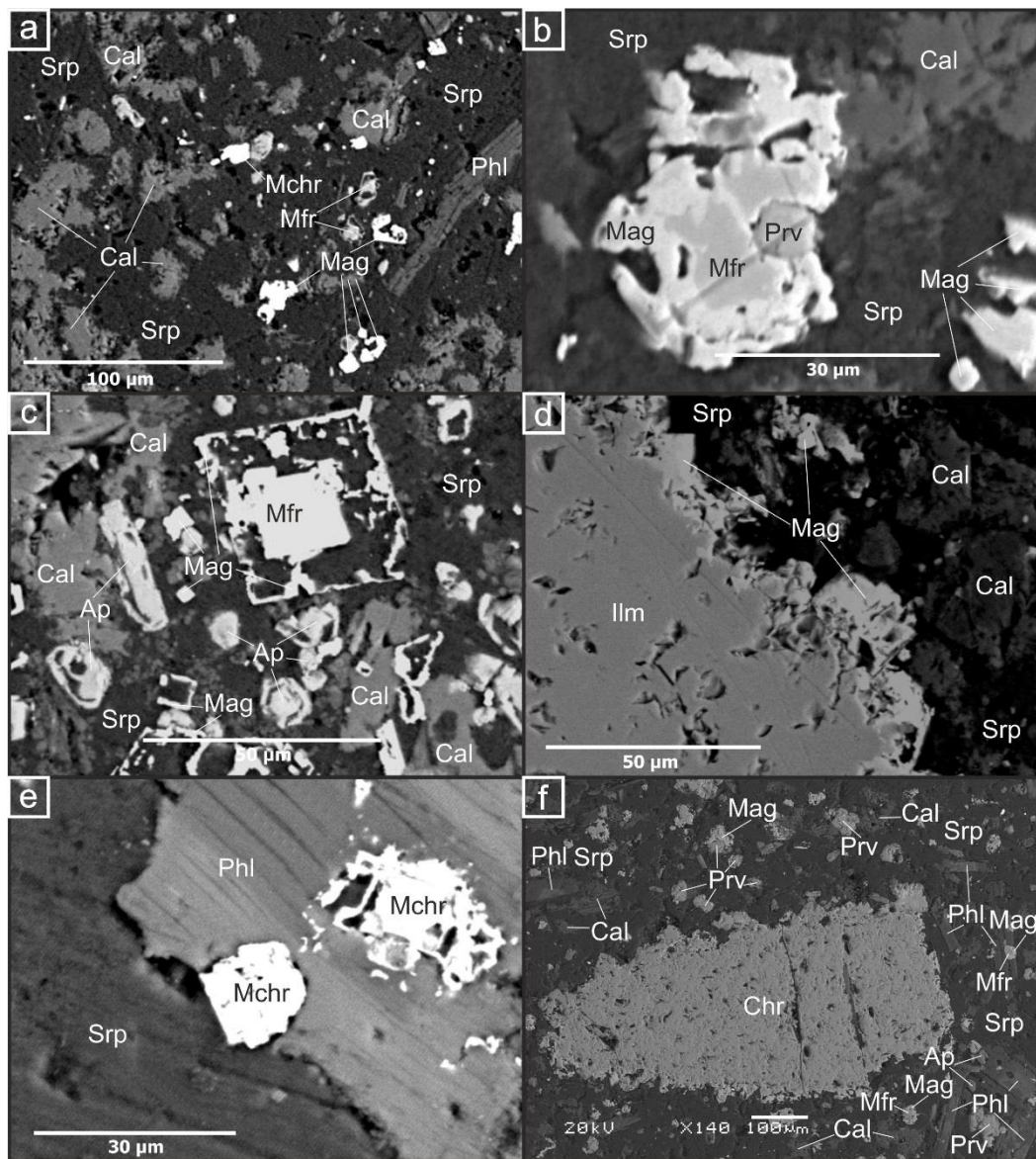


Рисунок 1 – Минералы группы шпинели основной массы кимберлитовых пород трубки им. А.П. Смелова: а – гомогенные зерна шпинелидов, глубина 119,3 м; б – резорбированный гетерогенный кристалл в сростке с перовскитом, глубина 77,2 м; в – атоллвидные агрегаты шпинелидов, глубина 184,2 м; д – реакционная кайма магнетита вокруг зерна ильменита 119,3 м; е – вростки магнезиохромита в пластинке флогопита; ф – макрокристалл хромита. BSE. *Обозначения минералов:* Cal – кальцит, Srp – серпентин, Mchr – магнезиохромит, Mfr – магнезиоферрит, Mag – магнетит, Prv – перовскит, Ap – апатит, Ilm – ильменит, Phl – флогопит.

В составе основной массы встречаются редкие резорбированные зерна пикроильменита размером до 300 мкм, мантированные *реакционными каймами* мощностью 20-30 мкм (Рисунок 1, d). По составу каймы шпинелидов вокруг ильменита из настоящего исследования по номенклатуре [2] соответствуют либо магнезиоферриту (TiO_2 до 16,53 %, Таблица 1), либо ульвошпинели (TiO_2 до 26,29 %, Таблица 1) или титансодержащему магнетиту (TiO_2 до 12,55 %, Таблица 1) (Рисунок 1, d). Границы между ядрами и каймами неровные, а сами каймы образуют гомогенные метакристалльные формы. Подобные каймы на ильмените были диагностированы А. Аберштейнером в силлах Бенфонтейн [8]. Появление такого шпинелевого набора в каймах ильменита, свидетельствует о химической неравновесности ранее образованных зерен пикроильменита по отношению к кимберлитовой матрице [7] на данном этапе кристаллизации.



Рисунок 2 – Модель формирования атоллной шпинели [8]

В отдельных пластинках флогопита наблюдаются *вростки магнезиохромита*, размер которых не превышает 30 мкм (Рисунок 1, e). Они встречаются как в виде гипидиоморфных зерен, так и атоллвидных агрегатов, определить состав ободка которых, в силу его очень малой толщины, не представляется возможным.

Кроме микрокристаллов шпинели в кимберлитовых породах, слагающих трубку им. А.П. Смелова также встречаются редкие *макрокристаллы* гипидиоморфной формы, размером 500-700 мкм. По составу они, как правило, соответствуют хромиту (Cr_2O_3 59,37 %) (Рисунок 1, ф).

Составы минералов группы шпинели представлены в Таблице 2 и на диаграммах в координатах $\text{Fe}^{3+}\text{-Al-Cr}$ и $\text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{3+}+\text{Al}+\text{Cr})$ vs $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})$ на основании работы [9], (Рисунок 3). На этих графиках видно, что для всего шпинелевого «ансамбля» кимберлитов трубки им. А.П. Смелова более близким является выделенный П. Роэдером и Д. Шульцем [9] Тренд 2, который авторы связывают с сокристаллизацией богатых магнием и алюминием силикатов, таких как, например, флогопит, который в большом количестве содержится в мезостазице пород трубки им. А.П. Смелова. Составы шпинелидов настоящего исследования частично перекрываются с выделенными полями составов минералов кимберлитов группы II, характеризующихся повышенным содержанием флогопита в основной массе.

Таблица 1 – Представительные составы минералов группы шпинели кимберлитовых пород трубки им. А.П. Смелова.

№	1	2	3	4	5	6	7				
Тип	Гомогенные	Зональные		Атолловые		Мантии вокруг ильменита		Включения в флогопите	Макрокристалл		
Зона	центр		край	ядро	кайма						
Разновидность	Mchr	Mag	Mfr	Mag	Mag	Mag	Mfr	Mag	Uspl	Mchr	Chr
Оксиды, %.											
SiO_2	0,14	2,55	0,14	0,42	0,64	2,18	1,01	3,72	0,13	0,08	0,00
TiO_2	1,75	0,74	11,72	1,67	0,24	9,19	16,53	12,55	26,29	2,66	2,38
Al_2O_3	7,54	0,00	5,19	1,88	0,00	3,38	2,51	1,51	1,40	2,44	2,94
Cr_2O_3	48,55	0,03	5,47	1,33	0,02	0,88	5,09	5,51	4,23	55,07	59,37
V_2O_5	0,33	0,00	0,09	0,12	0,00	0,18	0,15	0,41	0,43	0,39	0,00
Fe_2O_3	11,16	62,78	43,11	62,35	67,51	45,79	35,46	32,52	15,11	10,18	6,59
FeO	16,79	35,26	17,79	26,62	30,41	26,45	22,66	28,17	38,69	18,13	19,15
NiO	0,17	0,00	0,17	0,06	0,50	0,12	0,09	0,05	0,06	0,16	0,00
MnO	0,29	0,06	0,88	0,29	0,06	0,80	1,61	1,78	3,09	0,42	0,00
MgO	11,00	0,20	15,76	3,99	0,79	10,00	15,63	11,06	8,74	10,54	10,23
Total	97,72	101,62	100,32	98,73	100,17	98,97	100,74	97,28	98,17	100,07	100,00
Формульные единицы на 3 катиона и 4 атома кислорода, ф.е.											
Si	0,00	0,10	0,00	0,02	0,02	0,08	0,03	0,13	0,00	0,00	0,00
Ti	0,04	0,02	0,29	0,05	0,01	0,24	0,41	0,33	0,70	0,07	0,06
Al	0,30	0,00	0,20	0,08	0,00	0,14	0,10	0,06	0,06	0,10	0,12
Cr	1,30	0,00	0,14	0,04	0,00	0,02	0,13	0,15	0,12	1,49	1,59
V	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00
Fe^{3+}	0,29	1,77	1,07	1,75	1,94	1,20	0,88	0,85	0,40	0,26	0,17
Fe^{2+}	0,48	1,10	0,49	0,83	0,97	0,77	0,62	0,82	1,15	0,52	0,54
Ni	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mn	0,01	0,00	0,02	0,01	0,00	0,02	0,04	0,05	0,09	0,01	0,00
Mg	0,56	0,01	0,77	0,22	0,04	0,52	0,77	0,58	0,46	0,54	0,52

Аббревиатуры разновидностей: Mchr – магнезиохромит, Mag – магнетит, Mfr – магнезиоферрит, Uspl – ульвошпинель, Chr – хромит.

Фигуративные точки составов гомогенных зерен магнезиохромита (Cr_2O_3 до 48,91 %, Таблица 1), сингенетических включений этого минерала в пластинках флогопита (Cr_2O_3 до 55,07 %, Таблица 1) и макрокристаллов хромита (Cr_2O_3 до 59,37 %, Таблица 1) попадают в выделенное поле Chr [9], которое объединяет анализы первичной шпинели, кристаллизовавшейся непосредственно из кимберлитовой магмы [10]. На графиках (Рисунок 3) состав исследуемых минералов перманентно меняется от высокохромистого к более низкохромистому. После кристаллизации магнезиохромитов, забравших достаточное количество хрома из расплава, начинается кристаллизация хромсодержащих (Cr_2O_3 до 17 %) гомогенных магнезиоферритов. Отсутствие зональности в этих зернах может свидетельствовать об относительно медленной кристаллизации минерала на данном этапе при достаточно высоких температурах, способствующих формированию таких шпинелидов [9]. Вдоль линии эволюционного Тренда 2 ложатся точки составов реакционных кайм вокруг пикроильменита, которые соответствуют ульвошпинели, магнезиоферриту и титансодержащему магнетиту. Содержание оксида хрома в них составляет от 4,23 до 5,51 % (Таблица 1). Одновременно с шпинелидами реакционных кайм

началась кристаллизация магнезиоферритовых центральных зон гетерогенных зерен и ядер атоллоидных агрегатов, периферийные зоны и каймы которых представлены магнетитом (Рисунок 3). Такие различия в составе, предполагают резкие изменения условий кристаллизации с незначительным формированием гомогенного магнетита на поздних стадиях эволюции кимберлитового расплава [9]. Расплав к тому времени уже был истощен хромом, о чем свидетельствует локализация периферийных зон и кайм атоллоидных агрегатов в выделенной области Mag, представляющей собой поле чистого магнетита [9]. В это же время происходит кристаллизация магнетита в виде редких гомогенных зерен и ядер атоллоидных агрегатов. Последние образуют еще один тренд зональности (Рисунок 3), в целом, совпадающий с Трендом 6 от Mag до области MUM, в которую попадает точка состава каймы атоллоидной шпинели, представленной титансодержащим магнетитом (TiO_2 до 9,19 %, Таблица 1). По имеющимся данным [9] в шпинелидах, связанных с карбонатами, установлено большое количество минала магнезиоферрита, который в большом количестве содержится и в составе минерала основной массы кимберлитов трубки им. А.П. Смелова. Согласно [9] Тренд 6 может указывать на важность карбонатной активности самой поздней стадии кимберлитового процесса для поддержания повышенного содержания магнезиоферрита. Подобная тенденция кристаллизации шпинелидов была установлена Б. МакМахоном в кимберлитах среднего силла Бенфонтейн [11]. Это подтверждает сделанный нами ранее вывод о близости влияния карбонатной составляющей в расплаве силлов Бенфонтейн и трубок Хомпу-Майского поля [1].

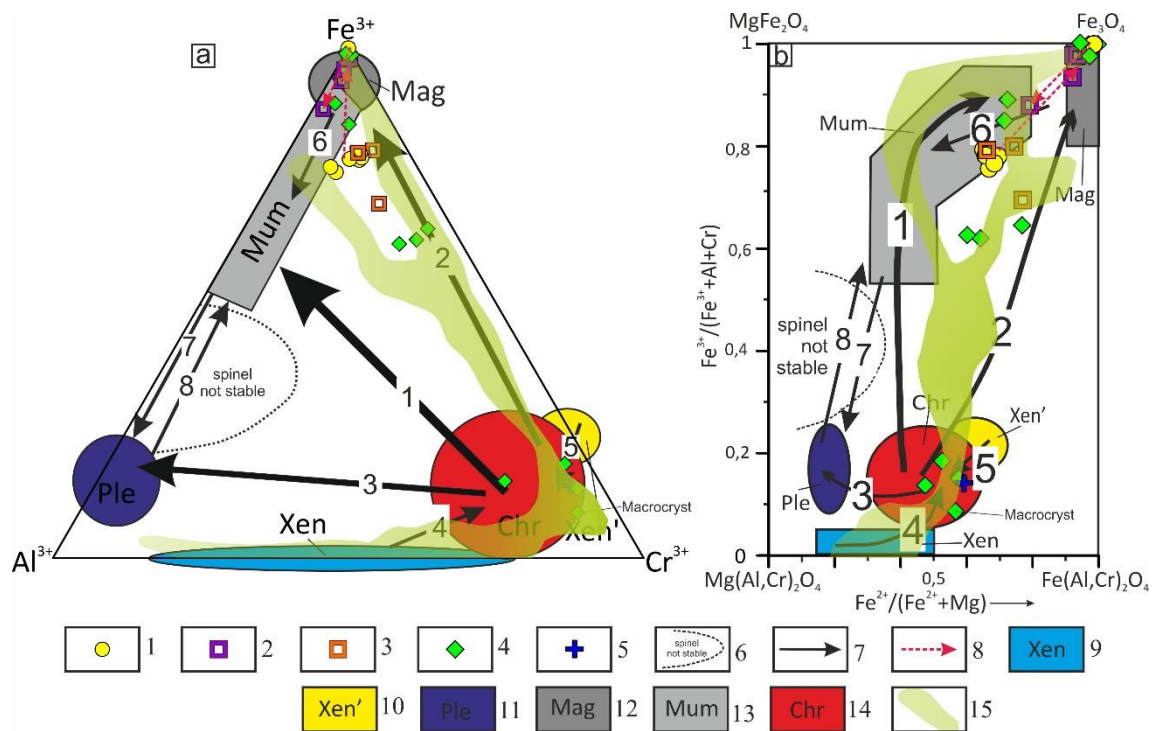


Рисунок 3 – Особенности состава минералов группы шпинели основной массы кимберлитов трубки им. А.П. Смелова в координатах: Fe^{3+} -Al-Cr (a) [9] и $\text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{3+}+\text{Al}+\text{Cr})$ vs $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})$ (b) [9]; точки составов шпинелидов из кимберлитов трубки им. А.П. Смелова: 1 – ядра гетерогенных зерен, 2 – каймы гетерогенных зерен, 3 – шпинелевые мантии вокруг ильменита, 4 – гомогенные зерна, 5 – включения и вроски в флогопите, 6 – область сольвуса шпинели по [9]; 7 – эволюционные тренды по [9], 8 – направления роста зональных шпинелей в данном исследовании, 9 – поле составов шпинелевых ксенокристов из перидотитов по [9], 10 – поле составов метасоматизированных шпинелевых ксенокристов из перидотитов по [9], 11 – поле составов плеонаста по [9], 12 – поле составов магнетита по [9], 13 – поле составов магнезиального ульвошпинель-магнетита по [9], 14 – поле составов хромитов по [9], 15 – область составов шпинелидов из кимберлитов группы II по [9].

3. Выводы

Проведенные исследования позволили установить широкий спектр составов шпинелидов и последовательность их кристаллизации: 1) образование первично магматических макрокристаллов хромита; 2) сокристаллизация зерен первичного магнезиохромита и пластинок флогопита; 3) кристаллизация гомогенных зерен магнезиоферрита; 4) формирование магнезиоферритовых центральных зон гетерогенных кристаллов и ядер атоллоидных агрегатов, а также реакционных кайм магнезиоферрита, ульвошпинели и титансодержащего магнетита вокруг зерен пикроильменита; 5) формирование гомогенных зерен магнетита, периферийных зон гетерогенных зерен и кайм атоллоидных агрегатов, которые также представлены магнетитом; 6) на поздней стадии эволюции кимберлитовой расплава происходит кристаллизация атоллоидных агрегатов магнетита, в которых ядра эволюционируют до титансодержащего магнетита под влиянием флюида, обогащенного CO₂. В целом, для всего шпинелевого «ансамбля» характерно наличие кристаллизационной тенденции, близкой к Тренду 2 [9], характерному для кимберлитов группы II ЮАР и обусловленному совместной кристаллизацией шпинелидов и флогопита. На начальной магматической стадии кристаллизация минералов группы шпинели проходила при относительно высоких температурах, о чем свидетельствует присутствие только гомогенных зерен [9] с высоким содержанием хрома. Затем на позднемагматической стадии условия менялись, в результате чего происходило формирование, как гетерогенных зональных зерен, реакционных кайм на пикроильмените и атоллоидных агрегатов, так и гомогенных незональных зерен магнетита.

4. Благодарности

Работа выполнена по государственному заданию ИГАБМ СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект FUFUG-2024-0007.

5. Литература:

- [1] Oparin, N.A., Oleinikov, O.B., Minerals of phlogopite-kinoshitalite series from groundmass of kimberlite rocks of pipes of the Khompu-May field (Central Yakutia) // Arctic and Subarctic Natural Resources, 2022, vol. 27, No. 4. pp. 486-498.
- [2] Bosi, F., Biagioni, C., Pasero, M. Nomenclature and classification of the spinel supergroup // European Journal of Mineralogy, 2019, vol. 31 (1), pp. 183-192.
- [3] Mitchell, R. H. Kimberlites. Mineralogy, Geochemistry, and Petrology. New York: Plenum Press, 1986, 442 p.
- [4] Abersteiner, A., Giuliani, A., Kamenetsky, V.S., Phillips D., Petrographic and melt-inclusion constraints on the petrogenesis of a magmaclast from the Venetia kimberlite cluster, South Africa. // Chemical Geology, 2017a, vol. 455, pp. 331-341.
- [5] Armstrong, K.A., Roederr, P.L., Helmstaedt, H.H. Composition of spinels in the C14 kimberlite, Kirkland Lake, Ontario // Russian Geology and Geophysics, 1997, vol. 38, pp. 454-466.
- [6] Mitchell, R.H., Clarke, D.B. Oxide and sulphide mineralogy of Peuyuk kimberlite, Somerset Island, N.W.T., Canada // Contributions to Mineralogy and Petrology, 1976, vol. 56, 157-172.
- [7] Garanin, V.K., Bovkun, A.V., Garanin, K.V., Rotman, A.Y., Serov I.V. Microcrystalline oxides from Russian kimberlites end related rocks. Moscow: GEOS, 2009, 498 p.
- [8] Abersteiner, A., Kamenetsky, V.S., Goemann, K., Giuliani, A., Howarth, G.H., Castillo-Oliver, M., Thompson, J., Kamenetsky, M., Cherry, A. Composition and emplacement of the Benfontein kimberlite sill complex (Kimberley, South Africa): Textural, petrographic and melt inclusion constraints // Lithos, 2019, vol. 324–325, pp. 297-314.
- [9] Roeder, P.L., Schulze, D.J. Crystallization of Groundmass Spinel in Kimberlite // Journal of Petrology, 2008, vol. 49, pp. 1473-1495.
- [10] Mitchell, R.H. Petrology of hypabyssal kimberlites // The Kimberlite Emplacement Workshop, 2006, abstract.
- [11] McMahan, B., Haggerty, S.E. The Benfontein kimberlite sills: magmatic reactions and high intrusion temperatures // American Journal of Science, 1984, vol. 284, pp. 893-941.

СЛОЖНОЕ МНОГОКРАТНОЕ ДВОЙНИКОВАНИЕ КРИСТАЛЛОВ КАК ПРИЧИНА АНОМАЛИЙ В РАЗВИТИИ УНИКАЛЬНЫХ ПО ФОРМЕ АЛМАЗОВ ИЗ КОЛЛЕКЦИИ «АЛРОСА»

Антон Павлушин^{1,2}, Константин Иванов³, Людмила Демидова³, Татьяна Антонова²

¹ ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

² Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО), 678174, Россия,
г. Мирный, ул. Ленина, 39

³ Единая сбытовая организация АК «АЛРОСА» (ПАО),
121170, Россия, г. Москва, ул. 1812 года, 14, стр. 3

COMPLEX MULTIPLE TWINNING OF CRYSTALS AS A CAUSE OF ANOMALIES IN THE DEVELOPMENT OF UNIQUELY SHAPED DIAMONDS FROM THE ALROSA COLLECTION

Anton Pavlushin^{1,2}, Konstantin Ivanov³, Lyudmila Demidova³, Tatyana Antonova²

¹ Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

² «Yakutniproalmaz» Institute PJSC «ALROSA», 39, Lenin str., Mirny, 678174, Russia

³ United Selling Organization PJSC «ALROSA», 14/3, 1812 Goda str., Moscow, 121170, Russia

Abstract. Multiple twinning of diamond crystals, combining polysynthetic and cyclic types of coalescence in accordance with the spinel law, leads to the appearance of rare forms of diamond, unusual in appearance and difficult for mineralogical analysis. Their interpretation is especially complicated by the significant dissolution of the crystal's faceting elements, which erases the usual morphological signs of the boundaries of twinning growth between the components of regular accretions. Observing the symmetry of the relief pattern of dissolution provides some assistance in establishing them. The article discusses examples of diamonds from the collection of rare forms of the ALROSA company associated with the origin of the twinning process.

1. Введение

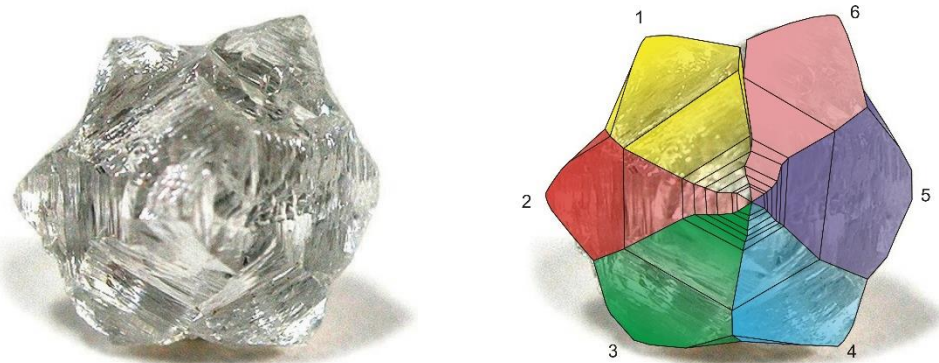
В докладе рассмотрены примеры аномального развития алмазов редких и уникальных форм, появление которых тесно связано с явлением двойникования кристаллов. Многократное двойникование кристаллов алмаза, сочетающее полисинтетические и циклические типы срастаний по шпинелевому закону, приводит к появлению неординарных по своему облику редких форм алмаза, иногда трудно поддающихся кристаллографическому анализу строения и определения генезиса.

2. Основные типы и примеры сложных двойниковых срастаний кристаллов алмаза

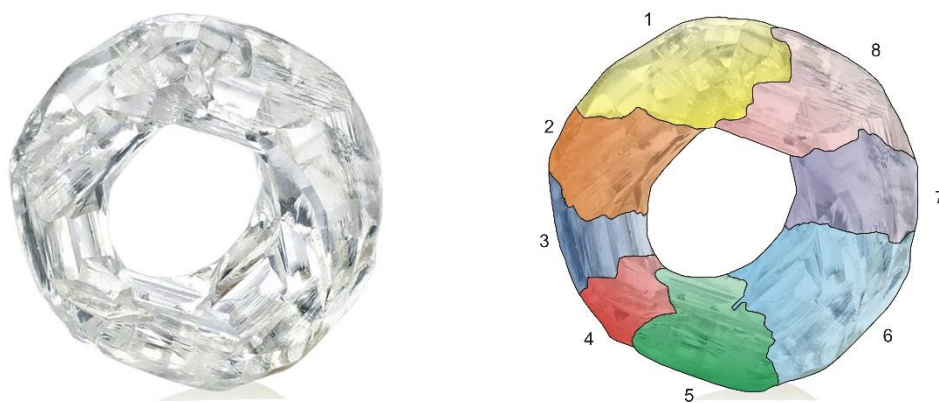
В коллекции редких форм алмаза компании «АЛРОСА» собраны уникальные по особенностям кристалломорфологии минералогические раритеты исключительно необычного, порой причудливого облика. Очевидно, их происхождение также тесно связано с уникальным сочетанием природных условий и последовательностью геологических событий. Поиск ответа о причинах возникновения каждого необычного алмаза для решения вопроса генезиса требует нетривиального подхода и индивидуального выбора методов исследования. Часть результатов исследований опубликованы в последние годы, а некоторые алмазы уже получили мировую известность.

Установлено, что многие редкие формы представленных коллекций алмазов образовались благодаря различным типам двойниковых срастаний кристаллов. Это возникший за счет

совместного роста контактных двойников алмаз «Матрешка» весом 0,62 карат, содержащий в своей полости свободно перемещающийся алмаз меньшего размера [1]. Изучен подобный по происхождению сросток конкурировавших во время роста контактных шпинелевых двойников из тр. Нюрбинская, послуживший моделью захвата алмаза за счет ускоренного роста более крупного алмаза в направлении границы двойникования. Доказано, что все подобные находки алмазов типа «матрешка», содержащие свободные включения алмаза, в том числе и последняя находка алмаза «Beating Heart» («Бьющееся сердце»), обнаруженная в апреле 2023 года компанией «VD Global», также являются шпинелевыми двойниками [1]. Подробно описан классический пример двойника прорастания кубических кристаллов, составляющих алмаз «Китайский фонарик» весом 1,95 карат, добытый на архангельском месторождении имени М.В.Ломоносова в 2019 году [2, 3]. Алмаз «Снежинка» весом 3 карата из кимберлитов Накынского поля также представляет собой весьма необычный по своему строению уплощенный двухкомпонентный двойник прорастания октаэдрических кристаллов (Alrosa_news).



Циклический двойник алмаза из Южной Африки



Алмаз «Бублик»

Рисунок 1 – Фото и схемы строения циклического двойника шести октаэдрических кристаллов алмаза из Южной Африки размером 8 мм, (автор фото Роб Лавинский, <https://www.mineralienatlas.de>) и алмаза «Бублик» из коллекции «АЛРОСА» из циклически sdвойникованных сегментов восьми растворенных кристаллов.

Одним из ярких представителей необычной формы, обязанной своим происхождением явлению многократного двойникования, является уникальный по своему облику алмаз «Бублик» из коллекции редких форм кристаллов алмаза компании «АЛРОСА» (рисунок 1). Находка, сделанная в 2021 году экспертом Единой сбытовой организации в алмазной продукции

«Севералмаз» из Архангельских месторождений, получила известность во время проведения выставок «Алмазный фонд АЛРОСА» в 2022 году (Мирный, Удачный, Якутск), в экспозиции выставки «Путь бриллианта. Чудо природы и рукотворный шедевр» представленной в Государственном историческом музее в 2023 году (г.Москва), опубликована статья в журнале «АЛРОСА» [4].

Алмаз «Бублик» представляет собой изящное, симметричное ограненное сплошное кольцо, напоминающее готовый кулон с широким отверстием посередине. В истории алмазодобычи отмечены лишь единичные находки таких курьёзов. Получили известность найденный в 2018 г футляровидный алмаз «Череп» весом 24.11 кар. с двумя отверстиями, напоминающими глазницы. Второй алмаз в форме плоского октаэдрического кулона с небольшим отверстием весом 5,5 кар обнаружен в 2023 г. Примечательно, что все три алмаза добыты АО «Севералмаз» на месторождении имени М.В.Ломоносова, и каждый из них имеет собственную, пока еще не раскрытую историю образования.

Происхождение замысловатого алмаза «Бублик», весом всего 0,73 карата ещё не получило своё объяснение. Интерпретация его строения особенно осложняется значительным растворением элементов кристаллографического огранения алмаза, уничтожившего стандартные морфологические признаки ростовых границ двойникования между компонентами закономерных сростков. Определенную помощь в их установлении оказали наблюдение симметрии рисунка рельефа растворения его поверхности и редкие входящие углы граней октаэдра между элементами двойников. С внешней и внутренней стороны кольцеобразного алмаза также сохранились реликты существенно растворенных граней октаэдра. С помощью сопоставления взаимно симметричного рисунка обнаруживаются признаки зеркальной симметрии в плоскости (111) и выделяются отдельные сдвойникованные компоненты. Плоскости двойникования расположены субперпендикулярно (радиально) к кольцу, разделяя его на коленчатые сегменты наподобие многогранной «гайки». Кроме того, в отдельных сегментах двойника обнаружены еще и плоскости двойникования, ориентированные параллельно окружности кольцеобразного алмаза. В итоге проведенного анализа можно констатировать, что необычный по форме алмаз самым неожиданным образом сочетает в себе несколько типов двойниковых сростаний по шпинелевому закону. Обнаружены морфологические признаки многократного параллельного (полисинтетического) и последовательного (циклического) сочетания двойниковых границ.

Определенно по взаимному кристаллографическому положению сегментов алмаз «Бублик» напоминает циклические двойники наподобие строения южноафриканского алмаза, изображенного на рисунке 1 и содержащего шесть последовательно сдвойникованных октаэдров. Но, в отличие от него, алмаз «Бублик» состоит, предположительно, уже из восьми компонентов. В кольце двойникового закономерного сростания между сегментами 1 и 8 обнаруживается дезориентированное положение кристаллических блоков, весьма характерное для циклических двойников. Поскольку в силу геометрии положения улов поворота плоскостей двойникования (111) невозможно замкнуть кольцо без нарушения его сплошности, возникает характерный зазор между плоскостями граней (111) крайних сегментов, составляющий в сростании из пяти кристаллов угол величиной $7^{\circ}20'$ (рисунок 2). Иногда этот зазор занимает шестой индивид. Подобный, ставший классическим, случай подробно описан А.Е.Ферсманом [5] на примере редкого циклического шестерника из Бразилии.

Все циклические двойники объединяет в морфологии наличие характерного воронкообразного двустороннего углубления, обычно покрытого штриховкой из ступенчатых выходов граней и ребер октаэдров. Очевидно, эта особенность и стала основной причиной появления сквозного отверстия в алмазе. Скорее всего, оно появилось не сразу, а благодаря позднему значительному объемному растворению, следы которого мы наблюдаем в виде кривогранных поверхностей близких по положению к додекаэдриду – форме, обычной у кристаллов из архангельского месторождения им. Ломоносова. Она характерна для кристаллов алмаза «уральского»/«бразильского» типа, переживших растворение в водосодержащих карбонатно-

силикатных расплавах [6]. Растворение затронуло всю поверхность алмаза, а особенно сильно увеличило воронкообразные углубления, расположенные с противоположных сторон алмаза, и постепенно они превратились в сквозное отверстие, пронзившие алмаз. В итоге мы видим совершенно необычное и замечательное по форме образование, подарившее науке еще один минералогический ребус, требующий более подробного кристалломорфологического исследования с применением гониометрических измерений.

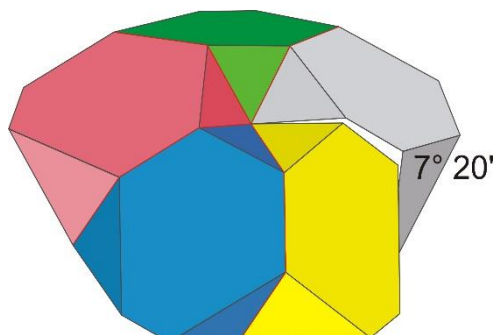


Рисунок 2 – Схема строения классического циклического двойника, состоящего из пяти октаэдрических кристаллов алмаза

3. Благодарности

Работа выполнена в рамках проектов НИР ИГАБМ СО РАН, Института «Якутнипроалмаз» и производственной деятельности ЕСО АК «АЛРОСА».

4. Литература:

- [1] Pavlushin A.D., Konogorova D.V. Crystallogenic Causes of the Unique Shape of the Matryoshka Diamond: The Effect of Capturing a Diamond Inclusion of Twin Diamond Crystals // *Geochemistry International*, 2023, vol. 61, №3, pp. 252–264.
- [2] Pavlushin A.D., Bardukhinov L.D., Konogorova D.V. Diamond rarities: A chinese flashlight // *Science First Hand*, 2021. № 3-4(92), pp. 44-53.
- [3] Pavlushin A., Bardukhinov L., Konogorova D., Sedykh E. The Sky Latern // *ALROSA*, 2022. № 1(15), pp. 32-35.
- [4] 12 Months // *ALROSA*, 2023. № 1(16), pp. 34-47.
- [5] Fersman A.E. *Crystallography of Diamond* / Izd. AN SSSR: Moscow, Russia, 1955, p. 566.
- [6] Khokhryakov, A.F., Pal'yanov, Y.N. The evolution of diamond morphology in the process of dissolution: Experimental data // *Am. Mineral.* 2007, 92, pp. 909-917.

ПЕРСПЕКТИВЫ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ ВЕНД-НИЖНЕКЕМБРИЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Павел Патрикеев¹, Александр Ахияров¹, Александр Погодаев²

1 ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт»,
Россия, 105118, г. Москва, шоссе Энтузиастов, 36

2 ФГБУН ФИЦ «ЯНЦ СО РАН» «Институт проблем нефти и газа СО РАН»,
677007, Россия, г. Якутск, ул. Автоторожная, 20

PERSPECTIVE FOR THE OIL AND GAS POTENTIAL OF THE VENDIAN-LOWER CAMBRIAN SEDIMENTS OF THE SIBERIAN PLATFORM

Pavel Patrikeev¹, Alexander Akhiyarov¹, Alexander Pogodaev²

1 All-Russian Research Geological Oil Institute, 36, shosse Entuziastov, Moscow, 105118, Russia

2 Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, 20, Avtodorozhnay str., Yakutsk, 677007, Russia

Abstract. The studied area is tectonically confined to the Syugger saddle. The named saddle, which includes an extensive area of articulation of the southern part of the Anabar anticline, the northeastern part of the Tunguska syncline, the western side of the Vilyui syncline and the northern slope of the Nepsko-Botuobinsk anticline, is one of the largest and least studied tectonic elements of northwestern Yakutia. The prospects for the oil and gas potential (NGN) of this territory still do not seem quite obvious. Previously performed estimates of projected hydrocarbon resources suggested that this section of the Siberian Platform has quite significant oil and gas potential. In order to clarify these forecasts, in 1983-1987, a program of comprehensive study of the sedimentary cover by seismic exploration and deep drilling was carried out within the Sugjera saddle. Despite these works, the geological study of the Sugdzherskaya saddle remains very low: to date, about 20 parametric and exploratory wells have been drilled within this vast region, and seismic studies have been concentrated on selected local sites. In the proposed work, a retrospective analysis of the geological results obtained (by scientific and industrial organizations) of previously performed works is carried out with the further purpose of identifying and delineating potentially possible oil and gas accumulation zones (ZNGS) in the sedimentary cover of the Sugdzherskaya saddle, which has a certain scientific and practical significance, since it allows to make an additional contribution to theoretical ideas about the prospects of oil and gas potential of northwestern Yakutia, This is a very important factor for the further development of the fuel and energy complex of the Republic of Sakha (Yakutia) and ensuring its demand for hydrocarbons.

1. Введение

Изучаемая территория, рассматриваемая через призму современных геологических представлений относительно регионального тектонического строения Сибирской платформы, находится на сопряжении пяти её надпорядковых структур: Непско-Ботуобинской и Анабарской антеклиз, Тунгусской и Вилюйской синеклиз и Сюгджерской седловины. На западе территории листа Р-50-II [1] небольшую площадь занимает северо-восточное окончание Сюльдюкарского выступа – структуры первого порядка названной антеклизы. Основная часть его протягивается по территории листов Р-50-I, Q-50-XXXI, XXXII [2]. Вилюйская синеклиза представлена северо-западным крылом её крупной структуры – Ыгыатинской впадины, наложенным на юго-восточную половину территории листа Р-50-II. К структуре Сюгджерской седловины отнесен Нижнеморкокинский прогиб, юго-западная центриклиналь которого занимает незначительную северную часть территории листа Р-50-II. В аспекте нефтегазо-геологического районирования, исследуемый ареал приурочен (с охватом сопредельной территории) к Сюгджерской НГО, которая соответствует одноименной седловине,

расположенной в зоне сочленения Анабарской и Непско-Ботуобинской антеклиз. Названная седловина разделяет Тунгусскую и Вилуйскую синеклизы, формируя осадочный чехол мощностью 2 - 3 км, сложенный породами венда, кембрия и ордовика. На востоке в разрезе появляются терригенные отложения венда, на западе, – силура, перми и триаса.

Ранее упомянутая Сюгджерская седловина, включающая обширную область сочленения южной части Анабарской синеклизы, северо-восточной части Тунгусской синеклизы, западного борта Вилуйской синеклизы и северного склона Непско-Ботуобинской антеклизы, является одним из наиболее крупных и наименее изученных тектонических элементов северо-западной Якутии. Глубокое бурение на территории Сюгджерской НГО началось в 1962 г., когда была пробурена Мархинская опорная скважина № 1. В 1965 г. закончено бурение структурно-поисковой скважины № 2, вскрывшее полный разрез кембрийских и вендских отложений общей толщиной около 2000 м. С 1983 года, на основе разработанной ПГО «Ленанефтегаз-геология» комплексной программы регионального изучения нефтегазоносности Сюгджерской НГО было пробурено более десятка параметрических скважин. Сейсморазведочные работы МОГТ 2Д проводились в 70 – 80-х г.г. минувшего века. Эти работы позволили установить ряд локальных поднятий. В 2011 – 2013 г.г. были выполнены региональные сейсморазведочные работы методом МОГТ-2Д объемом 1488 км к юго-востоку от Тюкянской полувпадины, (восточная часть изучаемой НГО). В 2012 – 2014 г.г. ОАО «Якутскгеофизика» выполнила комплексные геофизические работы (сейсморазведка, электроразведка, гравиметрия, геохимия, аэромагнитометрия) на Олгуйдахской площади, с целью изучения геологического строения зоны сочленения Непско-Ботуобинской, Катангской и Сюгджерской НГО и выявления перспективных на УВ-сырье участков, локализации и оценки прогнозных ресурсов УВ категории Д₁лок и подготовки геолого-геофизических материалов к лицензированию выявленных нефтегазоперспективных объектов. Всего на территории НГО было пробурено 36 глубоких скважин, из которых 27 вскрыли отложения верхнего протерозоя. По данным бурения и сейсморазведки выявлено отсутствие терригенных отложений венда на западе изучаемой территории, в восточной части терригенная часть разреза достигает толщины 376 м.

Перспективы нефтегазоносности (НГН) этой территории до настоящего времени представляются не вполне очевидными. Ранее выполненные оценки прогнозных ресурсов УВ предполагали, что этот участок Сибирской платформы имеет довольно значительные перспективы нефтегазоносности. С целью уточнения этих прогнозов, в 1983 - 1987 г.г. в пределах Сюгджерской седловины была осуществлена ранее упомянутая программа комплексного изучения осадочного чехла сейсморазведочными работами и глубоким бурением. В рамках этой программы, в процессе бурения глубоких скважин на поисковых площадях Сюгджерской седловины достаточно широко и комплексно были использованы методы геолого-технологических исследований (ГТИ) с применением информационно-измерительных систем (ИИС); работы осуществлялись силами Кысыл-Сырской партии ГТИ, входившей в состав ПГО "Ленанефтегазгеология" и оснащенной как передовыми отечественными ИИС типа СКУБ и СКУБ-М1, так и зарубежными, типа AND, (хотя и несколько устаревшими на время проведения исследований, но ещё вполне надёжными). На основании полученного при этом производственного опыта была создана методика комплексной обработки и анализа получаемой геолого-технологической информации, одним из разработчиков которой была написана фундаментальная обобщающая работа [3]. Названная методика [3] предлагает рациональную технологию сбора геологической информации и её обработки непосредственно в процессе проводки глубоких скважин. Она была разработана на основе обобщенного опыта работ по проведению ГТИ с применением различных типов ИИС. Применение данной методики позволило значительно увеличить объем получаемой геологической информации и повысить её достоверность, а также значительно снизить вероятность возникновения осложнений в процессе бурения и улучшить качество вскрытия перспективных горизонтов.

2. УВ-потенциал изучаемых отложений, осложнённых трапповыми интрузиями

Региональные закономерности размещения и перспективы открытия месторождений УВ в Сюгджерской НГО определяются пространственным взаимоотношением благоприятных зон генерации и аккумуляции УВ с континентальными рифтовыми зонами (авлакогенами); дополнительные перспективы этой территории связываются с горстовыми структурами, обусловленными контрастной разломно-блоковой тектоникой в рифейско-среднепалеозойских отложениях. Зональные и локальные закономерности связаны с наличием в венд-нижнекембрийском разрезе пористых терригенных и пористо-трещиноватых карбонатных пород с коллекторскими свойствами и непроницаемых покрышек, (прежде всего, – каменная соль), что создает возможность для формирования скоплений УВ [4]. В изучаемом районе могут быть ловушки УВ антиклинального типа, о чём свидетельствуют сейсморазведочные данные по изучению структурного плана венда и нижнего кембрия. Кроме того, в районе исследований, возможно, имеются литологически экранированные ловушки неантиклинального типа. В том и другом случаях, наиболее перспективной является верхняя часть курсовской свиты венда, – стратиграфический аналог ботуобинского горизонта, промышленно нефтегазоносного на Непско-Ботуобинской антеклизе (НБА). Перспективы связываются, прежде всего, с Сюльдюкарским выступом, и в особенности, – с Эмисской брахиоформенной структурой, выявленной сейсморазведкой по отражающему горизонту «КВ» [4]. Структура пересечена только двумя сейсмопрофилями, и поэтому параметры её могут быть даны только весьма ориентировочно: размеры 10 x 15 км, амплитуда около 100 м. Определенный интерес, как территория возможной локализации литологических залежей неантиклинального типа, а также тектонически экранированных ловушек неантиклинального типа, может представлять крыло Ыгыаттинской впадины. Так, Средне-Ыгыаттинская структура, на которой пробурена скважина 2630, представляет собой типичную горст-антиклиналь. Результат бурения отрицательный, что связано с ухудшением, (по сравнению с НБА), коллекторских свойств региональных продуктивных горизонтов. Тем не менее, по разрезу скв. 2630 установлены прямые признаки нефтегазоносности. Так, породы бюксской свиты на отдельных участках слабо битуминозны, иногда пропитаны нефтью. Примазки битума и нефти зафиксированы в успунской и кудулахской свитах. В породах нижней части юряхской свиты, являющихся региональными коллекторами УВ, только слабая битуминозность и примазки нефти. В осинском продуктивном горизонте, (нижняя часть билирской свиты), также отмечена слабая битуминозность и примазки нефти. Сейсморазведкой выделены также антиклинальные структуры Центральная и Попутная [4], но их небольшие размеры и амплитуда при данной точности структурных построений, не позволяет считать их выделение достаточно надёжными.

В монографии [5] перспективы НГН этой территории были оценены следующим образом: «При бурении отмечались нефтегазопроявления. Приведенные материалы указывают на целесообразность поисков нефти и газа в венде и кембрии Сюгджерской ПНГО. В её пределах сейсмическими работами подготовлены к бурению Мегеляхская, Альмджарская, Бюрюлехская и другие крупные локальные структуры. Открытых месторождений углеводородного сырья на территории ПНГО нет, средняя плотность начальных сырьевых ресурсов невысокая – 30-50 тыс. т УУВ/км². Большая половина прогнозируемых ресурсов может быть сосредоточена в верхневендско-нижнекембрийском комплексе».

По данным изучения геологического строения и нефтегазоносности территории Республики Саха (Якутия) по материалам ННГК «Саханефтегаз» и «Якутскгеофизика» был создан отраслевой банк данных по теме «Нефть и газ Республики Саха (Якутия) на 1998-1999 годы». На основе этих данных (схем зонального и регионального распространения коллекторов продуктивных горизонтов), на площади Сюгджерской НГО также ожидается наличие целого ряда продуктивных горизонтов. В работе [6], на основе детальной корреляции отложений, анализа их литологического состава и фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС), этими исследователями были выделены следующие потенциально нефтегазоносные резервуары УВ: Нижнепенский резервуар залегает в основании осадочного чехла на поверхности фундамента и включает в себя терригенные отложения бетинчинской, хоронохской, талахской, бесюряхской,

ынахской свит вендского возраста. Мощность этого резервуара на Олгуйдахской площади изменяется в широких пределах – от нескольких метров на западе до сотен метров на востоке. Максимальная мощность 368 метров (скв. Среднемархинская-2250) фиксируется в наиболее прогнутой восточной части площади. По восстанию терригенных пластов в западном направлении мощность резервуара уменьшается до нескольких метров (скв. Моркокинская-707 – 4 м). Общие представления о перспективах НГН нижненепского резервуара базируются на данных бурения скважин, которые располагаются внутри контура Олгуйдахской площади и вблизи её границ [6]. В разрезе скв. Среднемархинская-2250 выделены: аналог талахского горизонта (11 м) – водонасыщенный пласт песчаников с коэффициентом пористости по данным ГИС (Кп_по_ГИС) до 12%; аналог улаханского горизонта – водонасыщенный пласт песчаников мощностью 5 м, Кп_по_ГИС = 12 – 14%; аналог ботубинского горизонта – водонасыщенный пласт, залегает в нижней части бюкской подсвиты. Кп_по_ГИС = 7 – 13%. В скв. Садынская-3420 по данным ГИС выделены горизонты-коллекторы общей эффективной мощностью до 20 м и Кп_по_ГИС = 8 – 14%. В скв. Онхойдохская-2521 при опробовании в процессе бурения отмечались пленки нефти, а при опробовании пласта на кабеле было получено 2 л нефти. Коллекторы терригенных отложений венда разделены глинистыми экранами (покрышками) различной степени надежности. Общим экраном для нижненепского терригенного резервуара служит пачка ангидритизированных доломитов верхнебюкской подсвиты.

Верхнеданиловский резервуар включает в себя карбонатные отложения билирской, юряхской, кудулахской, успунской и бюкской свит венда и нижнего кембрия. Среди галогенно-карбонатных толщ венда нижнего кембрия выделяются два нефтегазоперспективных горизонта – осинский и юряхский. Осинский горизонт залегает в кровельной части билирской свиты. Его толщина изменяется от 30 до 100 м. Горизонт по своему строению неоднороден. В одних разрезах ведущую роль играют известняки, в других доломиты, в третьих, – имеет место более или менее равномерное их соотношение. Трещинная проницаемость в карбонатных породах варьирует от значений менее 0,01 мД до 3 – 5 мД, иногда достигая 100 мД. На территории Олгуйдахской площади осинский горизонт глубоким бурением мало изучен. Тем не менее, при опробовании скважины Садынская-3420 из осинского горизонта получен приток воды с проявлениями нефти. Юряхский горизонт приурочен к верхней части разреза одноименной свиты, залегает на 100 – 120 м ниже осинского горизонта и содержит два–три пласта. Мощность горизонта 41 – 46 м. Сложен в различной степени доломитизированными известняками и доломитами, пористыми, кавернозными и трещиноватыми. ФЕС пород-коллекторов не выдержаны, значения открытой пористости варьируют в широком интервале 3 – 10%. На Олгуйдахской площади, при опробовании юряхского горизонта в скважине Сюльдюкарская-1002, был получен приток минерализованной слабогазированной воды. Флюидоупорами для осинского и юряхского горизонтов служат плотные глинисто-карбонатные породы.

Менее оптимистично УВ-перспективы осинского горизонта оцениваются в работе [7]: «В северо-восточном направлении, в сторону Сюджерской ПНГО водородослевые постройки осинского продуктивного горизонта на 2/3 замещаются хемогенными карбонатными породами – зернистыми известняками, доломитами, в разной степени содержащими тонкодисперсный карбонат и глинистую примесь. С уменьшением мощности отложений и литофациальным замещением пород осинского продуктивного горизонта, породы-коллекторы теряют свои емкостные свойства».

Интрузивные образования в ареале изучаемой территории, (представленные базитами), формировались в средне-позднедевонскую и раннетриасовую эпохи (с преобладающим влиянием раннетриасовой трапповой формации) и относятся, соответственно, к вилюйско-мархинскому ($v\beta$ D2-3 vm) и катангскому (β T1 kt) комплексам долеритов и габбро-долеритов. В скв. Алымджахская-2671 две трапповые интрузии толщиной 24 и 86 метров, вскрыты в толбачанской свите. Выше по разрезу, в чарской свите вскрыты ещё два трапповых тела толщиной 60 и 140 метров. В скв. Моркокинская-707 вскрыт трапп, который залегает в самой

нижней части осадочного чехла – в вендских отложениях успунской свиты. Толщина траппа – 154 м. Выше в разрезе осадочного чехла в сыгдахской и чарской свитах нижнего кембрия вскрыты трапповые интрузии толщиной 68 и 73 м соответственно [6]. На юге Олгуйдахской площади, по данным глубокого бурения трапповые интрузии залегают только в верхней части осадочного чехла. Так, в скв. Западно-Сюльдюкарская-1001 в нижнекембрийских отложениях чарской свиты вскрыта трапповая интрузия толщиной 45 м. В скв. Восточно-Сюльдюкарская-1002, которая находится недалеко от скв. 1001, трапповых интрузий не обнаружено. На востоке Олгуйдахской площади трапповый магматизм проявлен менее интенсивно и затрагивает только верхнюю часть осадочного чехла. В скв. Садынская-3420 трапповая интрузия толщиной 50 м вскрыта в нижнекембрийских отложениях чарской свиты. В скв. Дюданская-2910, которая находится в северо-восточном углу Олгуйдахской площади, и в скв. Средне-Ыгыаттинская-2630 на юго-востоке, трапповых интрузий в разрезе осадочного чехла не обнаружено [6]. При оценке перспектив НГН, суммируя вышеизложенное, необходимо также отметить, что, в первую очередь, это касается восточной части исследуемой территории, где толщина терригенных отложений венда достигает 376 м (по результатам глубокого бурения) и более 500 м (по данным сейсморазведки) и при этом, – разрез очень слабо изучен глубоким бурением. В своих работах [8, 9, 10] специалисты ИНГТ СО РАН обосновывают перспективность венд-нижнекембрийских отложений восточной части Сюгджерской НГО через межзональную корреляцию с синхронными отложениями НБА (с доказанными запасами УВ), выделяя при этом следующие продуктивные горизонты: В12 – преображенский, В5 – ботуобинский, В6 – улаханский, В13 – талахский, В14 – вилючанский. Такое проградирование // → экстраполирование «от известного к неизвестному» (по методике «Basin_to_Basin») представляется нам вполне правомерным и научно обоснованным.

3. Выводы

В предлагаемой работе проведен ретроспективный обзор и анализ полученных за 40 лет (1983 - 2023 г.г.) научными и производственными организациями геологических результатов ранее выполненных ГРП с дальнейшей целью выявления и оконтуривания потенциально возможных зон нефтегазонакопления (ЗНГН) в осадочном чехле Сюгджерской седловины, что имеет определённое научное и практическое значение, поскольку позволяет внести дополнительный вклад в теоретические представления о перспективах нефтегазоносности северо-западной Якутии, что является весьма важным фактором для дальнейшего развития топливно-энергетического комплекса Республики Саха (Якутия) и обеспечения её потребности в УВ. По результатам изучения имеющихся данных о проявлениях траппового магматизма и его влияния на генерационный и аккумуляционный УВ-потенциал и перспективы нефтегазо-носности, установления закономерностей распространения интрузивных трапповых тел по площади и разрезу осадочного чехла Сюгджерской седловины [3], следует отметить, что наиболее интенсивно трапповым магматизмом осложнены центральная и южная части Сюгджерской седловины, где в разрезе осадочного чехла встречено до 6 трапповых тел, общая толщина которых достигает 0,58км [3]. В этих зонах трапповые интрузии играют значительную роль в формировании структуры осадочного чехла. Широкое распространение трапповых тел является одной из причин отсутствия надежных покрышек в названном ареале, экранирующие свойства которых значительно снижаются при внедрении в них трапповых интрузий, обладающих высокими фильтрационно-емкостными свойствами (ФЕС), обусловленными их сильной трещиноватостью;

- северная и юго-восточная части Сюгджерской седловины трапповым магматизмом затронуты незначительно, что повышает перспективы нефтегазоносности названных районов исследуемой территории. В терригенном комплексе нижнего протерозоя интрузивные тела отсутствуют и не оказывают влияния на структуру и ФЕС этой части разреза;

- наибольшее количество трапповых тел приурочено к отложениям тойонского и атдабанского ярусов нижнего кембрия; в отложениях венда трапповые интрузии встречаются крайне редко;

- трапповые интрузии Сюгджерской седловины, представленные долеритами и диабазами (реже, – габбро-диабазы) связаны, главным образом, с нижнемезозойским (раннетриасовым) этапом платформенного магматизма, (с преобладанием пластовых интрузий, – силлов). Средне-верхнедевонские интрузии представлены, в основном, дайками, ареал распространения которых локализован в пределах границ Вилуйско-Мархинской магмоподводящей зоны. Силл средне-позднедевонской эпохи прослеживается относительно узкой (35- 50 км) слабоизогнутой полосой с северо-востока на юго-запад, вдоль борта Ыгыаттинской впадины.

4. Литература:

- [1] Dukart Yu.A., Blazhkin D.V. State geological map of the Russian Federation scale 1 : 200 000. The Verkhneviluyskaya series. Sheet P-50-11. An explanatory note. - St. Petersburg: Ministry of natural resources of the Russian Federation, State Committee of the Republic of Yakutia for geology and subsoil use, JSC ALROSA. Botuobin expedition, 2001. -101 p.
- [2] Ivashina E.I., Dukart Yu.A., Urazov A.S. State geological map of the Russian Federation scale 1 : 200 000. The Verkhneviluyskaya series. Sheet Q-50-XXXXI, Q-50-XXXII. Explanatory note. - St. Petersburg,: Ministry of natural resources of the Russian Federation, State Committee of the Republic of Yakutia for geology and subsoil use, JSC ALROSA, Botuobinsk Expedition. 2001.
- [3] Kulagin A.N. Geological structure and assessment of oil and gas potential of northwestern Yakutia (Syugdzherskaya saddle) based on a comprehensive interpretation of geotechnological research data. // Dissertation of the candidate of geological and mineralogical sciences on the Higher Attestation Commission 04.00.17.-Moscow GANiN named after I.M.Gubkin, 1993.-163 p.
- [4] Kolga L.A., Nikonova A.V., Yagovkina L.L., Kushmar I.A., Gildin S.M. and others. "Comprehensive geophysical work to assess the prospects of oil and gas potential and the preparation of facilities for parametric drilling on the Ygyattinskaya square of the Republic of Yakutia." Report on the State Contract No. 09/18 - 06/26/2018 - Moscow: JSC "Rosgeo", 2020.
- [5] Bitner A.K., Pozdnyakov V.A., New technologies of geological exploration. Hydrocarbon sediment of the Siberian platform and adjacent territories. – Krasnoyarsk: SFU, 2017. – 322 p.
- [6] Beletsky V.P., Pospseev A.V., Pogodaev A.V., Klimentyev K.B., Sevostyanov S.Yu. and others. Report on the results of work performed on object 81-60 (70-125): "Complex geophysical work - seismic,electrical exploration,gravimetry,geochemistry, aeromagnetometry on Olguidakhskaya square of the Republic of Sakha (Yakutia)" for 2012-2014-Yakutsk: JSC Yakutskgeofizika, 2014.
- [7] Burova I.A. Carbonate reservoirs of the vendian-lower cambrian oil and gas complex of Eastern Siberia. - Oil and gas geology. Theory and practice. - 2010. -Volume 2. 1-18 p.
- [8] Fomin A.M., Moiseev S.A., Topeshko V.A. Prospects of oil and gas potential of the Eastern part of the Syugdzhersk oil and gas region. // Interexpo GEO-Siberia-2016. XII International Congress. April 18-22, 2016.-Novosibirsk: Ruin, 2016.-volume 1.-155-161 p.
- [9] Fomin A.M., Moiseev S.A., Topeshko V.A. Characteristics of oil and gas complexes and assessment of oil and gas potential of the Syugdzhersk oil and gas bearing region. Novosibirsk: Geology and mineral resources of Siberia No. 1 (29), 2017-43-53 p.
- [10] Moiseev S.A., Fomin A.M., Gordeeva A.O., Konstantinova L.N., Kuznetsova E.N. Prospects of oil and gas potential of the Central Tunguska oil and gas region. // Interexpo GEO-Siberia-2019. XV International scientific congress. April 24-26, 2019 - Novosibirsk: SGUGiT, 2019-volume 2. Part 1 - 95-101 p.

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ СПЕЦИАЛИЗАЦИЯ РУДОВМЕЩАЮЩИХ ТОЛЩ Au-Sb-Hg МЕСТОРОЖДЕНИЯ КЮЧУС

Лена Полуфунтикова, Валерий Фридовский, Максим Кудрин
ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

GEOCHEMICAL SPECIALIZATION OF ORE-BEARING STRATA Au-Sb-Hg OF THE KUCHUS DEPOSIT

Lena Polufuntikova, Valery Fridovsky, Maxim Kudrin
Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. The results of the geochemical analysis of near-ore metasomatites and ore zones of the Kuchus Au-Sb-Hg deposit are presented. The analysis of the concentration of the main (rock-forming) elements in near-ore metasomatites and the nature of their migration indicate a large-scale occurrence of low-temperature acid metasomatism in the studied strata. Rare elements are divided into 4 groups by the nature of migration in metasomatites and ore zones and presence of correlation relationship and formation of aureoles. The distribution of the elements of a productive association is laterally zonal.

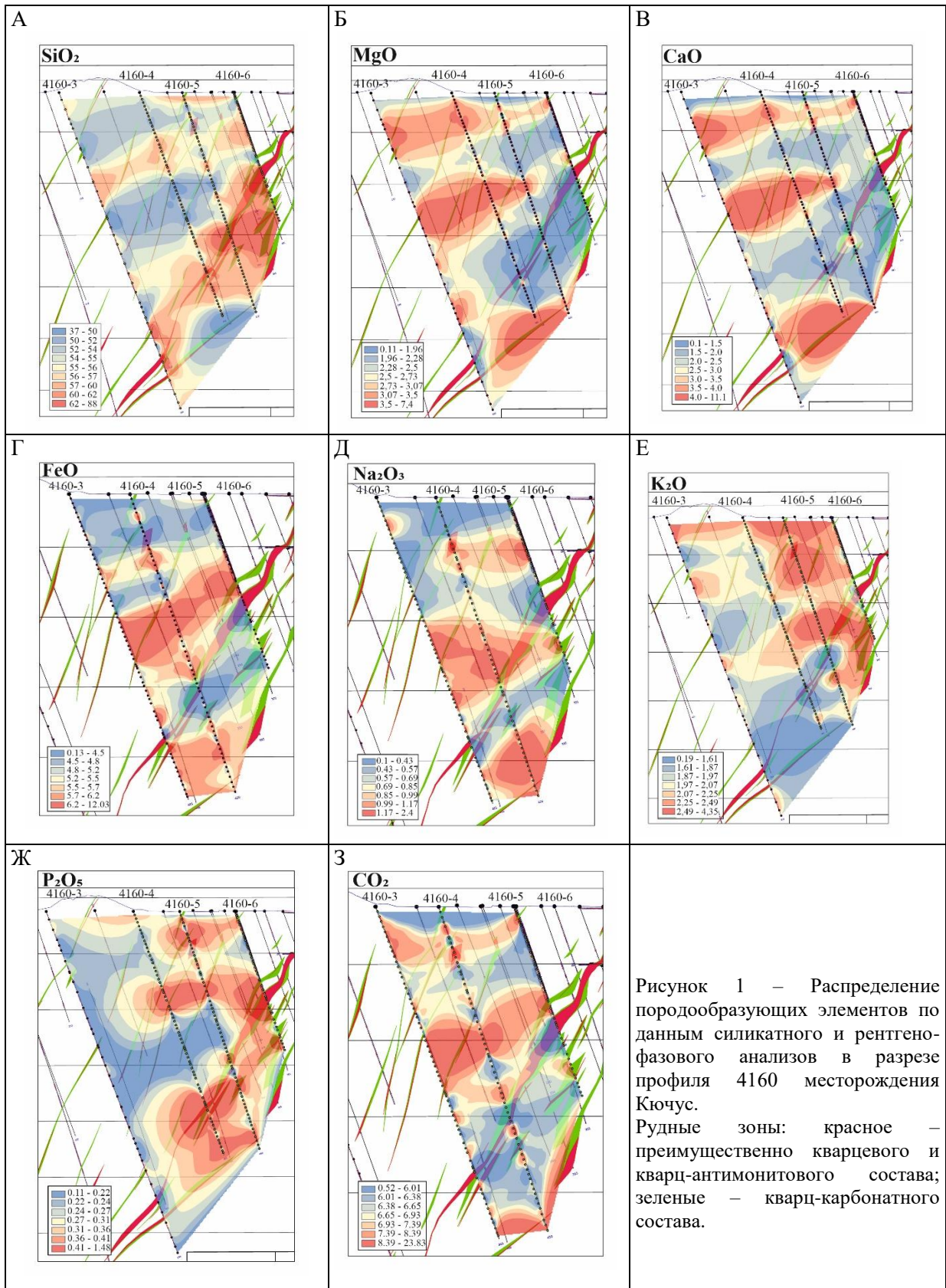
1. Введение

Изучение геохимической специализации рудовмещающих пород позволяет выявить естественные связи различных химических элементов, в том числе индикаторов рудоносности и уточнить условия формирования оруденения. Такие исследования выполнены на примере орогенных золоторудных месторождений Яно-Колымского пояса [1, 2]. Они показали, что в формировании метасоматитов и рудных зон важную роль играли процессы гидрослюдизации, карбонатизации, сульфидизации и окварцевания, обеспечившие разную подвижность макроэлементов, с преобладанием кислотного низкотемпературного углекислотно-кальциевого метасоматоза. В настоящей статье представлены первые результаты анализа содержаний, характера миграции и корреляционные связи породообразующих, редких и REE элементов в метасоматитах и рудных зонах крупного Au-Sb-Hg месторождения Кючус. Рудовмещающими толщами являются терригенные отложения верхнего триаса. Сравнительный анализ содержаний породообразующих элементов проведен относительно наименее измененных пород из береговых обнажений р. Яны на удалении от месторождения Кючус. Коэффициенты обогащения редких элементов представлены относительно кларковых содержаний в верхней коре, а REE нормированы к хондритам.

2. Результаты

Анализ состава породообразующих элементов показал, что содержание SiO_2 в породах изменяется от 30,6 до 79,5 мас. %, а в зонах развития интенсивного прожилкования может превышать 80 мас.% (Рисунок 1, А). Для алюминия в достаточных количествах проявляется как вынос, так и привнос. Ореолы развития повышенных содержаний магния (C_{MgO} до 10 мас. %), кальция (C_{CaO} до 20 мас. %) и железа (C_{FeO} до 12 мас. %) (рис. 1, Б, В, Г) пространственно сопряжены с зонами интенсивного карбонатного прожилкования. Концентрации натрия в метасоматитах и рудных зонах ($\text{C}_{\text{Na}_2\text{O}}=0,05-2,51$ мас.%) на порядок ниже его содержаний в малоизмененных породах региона (рисунок 1, Д). Для калия характерна незначительная устойчивая тенденция к выносу и медианное значение K_2O от 1,93 до 2.34 мас. % (Рисунок 1, Е). Сумма щелочей $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=0,14-6,27$ мас.%, содержание калия (за исключением единичных случаев) превышает содержание натрия ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}=0,04 - 0,98$). Породы обогащены фосфором, его содержания выше среднекларковых значений ($\text{C}_{\text{Pmax}}/\text{C}_{\text{k}}=6,7$) и часто на порядок превышает концентрации его в малоизмененных породах, а интервалы максимального

привноса элемента носят зональный характер (рисунок 1, Ж). Для проанализированных пород характерно повышенное содержание CO_2 . Около 80% анализов содержат CO_2 от 3.0 до 11 мас.% (рисунок 1, 3). Концентрация Сорг в безрудных интервалах составляет 2.44-3.58% (C_{Au} < 0.01 г/т), а в рудных зонах – 1.64-2.19% (C_{Au} от 0.01 до 25,9 г/т).



По характеру и степени корреляции можно выделить две устойчивые парагенетические ассоциации с высокими коэффициентами корреляции ($r > 0,7$): Al–Ti–K ($r = 0,7-0,94$) и Si–Mg–Ca–CO₂ ($r = 0,79-0,95$). Для FeO, MgO, CaO и CO₂ наблюдаются корреляционная связь с Au от умеренной до заметной силы, в частности, между Au и FeO наблюдается устойчивая отрицательная связь ($r = -0,57 \div -0,73$), что, возможно, отражает изоморфное замещение Au в сульфидах.

Вынос Si и привнос Mg, Ca и CO₂ связан с процессами карбонатизации цемента и развитием системы маломощных прожилков карбонатного состава. Разнонаправленный характер миграции Al отражает с одной стороны процесс разрушения алюмосиликатов, с другой, формирование глинистых минералов (монтмориллонита, каолинита). Процесс выноса Na связан с преобразованием монтмориллонит→гидрослюда, хлорит. Интенсивность миграции щелочей несколько повышается в рудных зонах, при этом на верхних горизонтах наблюдается небольшой вынос Na и привнос K, а на более глубоких горизонтах – привнос этих элементов. Концентрации CO₂ на порядок выше, чем в малоизмененных терригенных породах региона. Вынос CO₂ наблюдается в зонах интенсивного кварцевого прожилкования или в породах с повышенной пористостью.

Анализ концентраций и характера миграции редких элементов показал заметные вариации в содержании отдельных элементов как по латерали, так и на глубину. Нормирование содержаний редких элементов по отношению к средним значениям для верхней коры позволило разделить их на 4 группы (рисунок 2). Первая группа элементов: Au, Ag, As, Hg, Sb и S, коэффициенты обогащения которых варьируют от 10 до 1000. Эти элементы формируют отчетливые околорудные геохимические ореолы и между элементами сохраняются корреляционные связи от заметной до высокой степени ($r = 0,4-0,9$). Наиболее устойчивая геохимическая ассоциация As–Au–S. В разных пересечениях и на разных уровнях эта ассоциация может включать Ag, Sb или Hg.

Вторая группа элементов, содержание которых превышает среднекларковые: Co, Ni, Cu, Zn, Pb и Cr. Их коэффициенты обогащения составляют не более 2-3 и они формируют малококонтрастные ореолы на границе рудных тел. Эти элементы формируют устойчивую геохимическую ассоциацию Co–Ni–Cu–Zn с высокими коэффициентами корреляции $r = 0,7-0,95$. Наиболее сильные корреляционные связи наблюдается для пары Co–Ni, что свидетельствует о их синхронном участии в рудообразовании. Значения соотношения Co/Ni варьирует в пределах от 0,2 до 0,5, что характерно для метаморфогено-гидротермального флюида.

Третья группа элементов отличается инертным поведением в изученных породах, их содержания близки к среднекларковым. К таким элементам можно отнести Li, Mo, Sc.

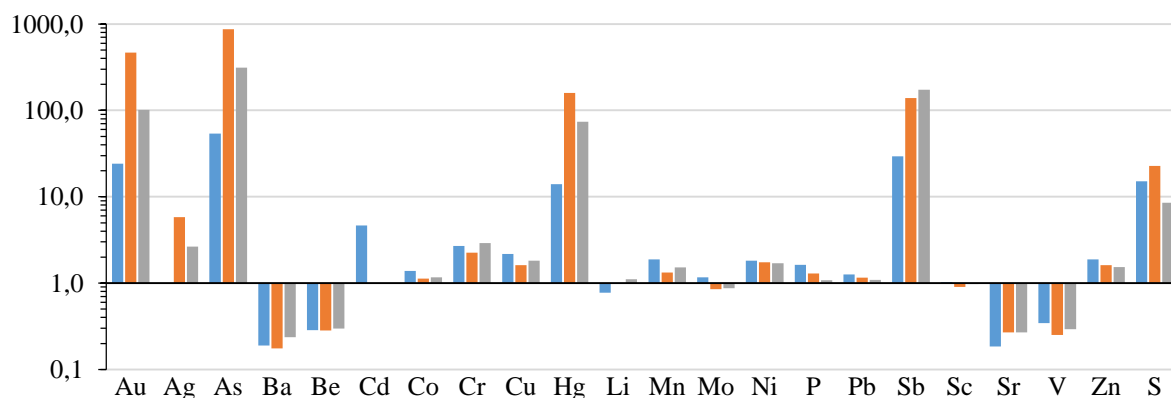


Рисунок 2 – Распределение элементов-примесей в метасоматитах месторождения Кючус. Средние значения: синий – юго-западный фланг; коричневый – центральная часть; серый – северо-восточный фланг. Содержания нормализованы по отношению к средним значениям для верхней коры [3].

Четвертая группа элементов для которых характерен интенсивный вынос – Ba, Be, Sr, V. Они часто группируются в единую геохимическую ассоциацию и отличаются отрицательной корреляцией с элементами продуктивной ассоциации. Они формируют ореолы отрицательных аномалий на границе рудных зон

Золото характеризуется весьма разнообразными корреляционными связями с многими редкими элементами. Помимо высокой корреляционной связи с As и S, что связано с изоморфным вхождением Au в состав пирита и арсенопирита, оно демонстрирует тесную связь с Hg, Sb, реже Cu, Sr, Pb, Ni, Li, Mo и V. В отдельных пересечениях Au проявляет инертное поведение.

Анализируя распределения элементов продуктивной ассоциации в направлении с юго-западного фланга месторождения на северо-восточный, необходимо отметить, что даже в пересечениях с максимальными содержаниями Au, $C_{Au} > 0,1$ ppm определяется в 25% анализов, а медианное содержание не превышает 0,2 ppm. Повышенные содержания Au ($C_{Au} > 10$ ppm) локализуются в маломощных интервалах (1-3 м). Для концентраций Hg и Sb отмечается волновой характер распределения с понижением к флангам месторождения. На ЮЗ фланге содержание Hg выше предела обнаружения фиксируется эпизодически, а для Sb характерны узкие интервалы обнаружения и низкие концентрации.

Поведение редких (рудных) элементов в зоне развития метасоматитов отличается неоднородностью. Продуктивная ассоциация элементов с повышенными концентрациями формирует контрастные ореолы в непосредственной близости от рудных тел. Отмечаются повышение концентрации элементов продуктивной ассоциации в центральной части месторождения и снижение их на ЮЗ фланге месторождения. Распределение Hg и Sb носит волновой (зональный) характер, что на минеральном уровне выражается в развитии антимонитовой и киноварной минерализаций. Учитывая весьма неравномерное и контрастное распределение Au предполагается наличие различных генераций и форм его присутствия в околорудных метасоматитах, при доминирующей – изоморфной примеси в пирите и арсенопирите.

Анализ изменчивости концентраций редкоземельных элементов (РЗЭ) показал, что коэффициент корреляции не превышает 30%. Тренды их распределения имеют похожую конфигурацию и представлены наклонными кривыми с различной степенью дифференциации (LREE/HREE от 8,58 до 16,2). Сумма РЗЭ в анализируемых породах варьирует в от 37,43 до 168,04 ppm, но прямой зависимости количества REE от глубины не наблюдается. Характерен достаточно узкий диапазон значений соотношения $[La/Yb]_n$ ($min=7,32$; $max=10,69$), но сами пограничные значения указывают на присутствие в бассейне осадконакопления продуктов разрушения пород как кислого $[(La/Yb)_n = 10,52-27,26]$, так и основного состава $[(La/Yb)_n = 6,22-8,96]$ [2]. Значение цериевой аномалии составляет $Ce/Ce^* = 1,02-1,10$ ($Ce/Ce^* = C_{Ce_n} / ((La_n + Pr_n) / 2)$), что типично для осадков, формирующихся в обстановке пассивной континентальной окраины. Величина Eu/Eu^* изменяется от 0,71 до 0,94, что указывает на поступление в бассейн осадконакопления различных продуктов размыва. Величины Eu/Eu^* (0,71-0,94) и Ce/Ce^* (1,02-1,10) аномалий указывают на слабо-восстановительные условия рудообразования. процессе фракционирования европия относительно других редких земель [4]. Спектры распределения содержаний РЗЭ в измененных породах сходны с распределением РЗЭ во вмещающих верхнетриасовых породах с некоторой тенденцией к уменьшению их суммы. В целом, наклон спектров РЗЭ при многостадийных метасоматических процессах выполаживается $(La/Yb)_n = 7,32-10,69$. Установлен преимущественно вынос редкоземельных элементов в процессе формирования метасоматитов. Содержание РЗЭ в метасоматитах и рудных зонах уменьшается в 4-5 раз, что связано с преобразованием терригенной составляющей пород и изменением минерального состава в зависимости от изменения кислотно-щелочных условия их образования. Изменения pH в гидротермальной системе существенно влияет на поведении РЗЭ: в кислой среде (березитизация) РЗЭ выносятся, а пропилизация происходит в условиях привноса тяжелых лантаноидов и небольшого выноса легких лантаноидов [5].

3. Выводы

Анализ концентрации главных (породообразующих) элементов в околорудных метасоматитах и характер их миграции свидетельствует о масштабном проявлении в изучаемых толщах низкотемпературного кислотного метасоматоза (беризитизация, аргиллизация). Высокий уровень и разнонаправленность миграции породообразующих элементов свидетельствует о стадийности и неравномерности гидротермально-метасоматического процесса, что отражается в повышенных коэффициентах вариации и асимметрии распределения их концентраций. В целом, в породах преобладает вынос вещества. Роль углерода определяется сорбционными свойствами его нерастворимой части, которая является геохимическим барьером при разгрузке гидротермального флюида.

По характеру миграции, силе корреляционных связей и формированию первичных геохимических ореолов выделены 4 группы элементов (продуктивная ассоциация, $K_c=10-1000$, группы метасоматической дифференциации с $K_c=2-3$ и $K_c=0,1$ и группа инертных элементов). Спектры распределения содержаний РЗЭ в метасоматитах и рудных зонах сходны с распределением РЗЭ во вмещающих верхнетриасовых породах с некоторой тенденцией к уменьшению их суммы.

4. Литература:

- [1] Polufuntikova L.I., Fridovsky V.Yu., Goryachev N.A. Geochemical features of ores and host rocks of the orogenic Malo-Taryn gold deposit (Verkhoyano-Kolyma folded region, North-East of Russia)//Pacific geology. 2020, volume 39, No. 5, pp. 41-55.
- [2] Volkov A.V., Sidorov A.A., Savva N.E., Prokofiev V.Yu., Kolova E.E., Savchuk Yu.S., Murashov K.Yu., Sidorova N.V., Zemskova M.I., Aristov V.V., Wolfson A.A. Gold-quartz deposits of the Yano-Kolyma folded belt: geochemical features of ores and fluids, ore formation conditions // Vestn. SVNTS FEB RAS. 2016. No. 3. pp. 3-21.
- [3] Taylor S.R., McLennan S.M. Continental crust: its composition and evolution. (Translated from English). Moscow: Mir, 1988. 384 p
- [4] Maslov A.V. Sedimentary rocks: methods of studying and interpreting the data obtained. Yekaterinburg. Publishing house of UGSU. 2005. 289 p.
- [5] Sazonov V.N., Vikentjeva O.V., Ogorodnikov V.N., Polenov Yu.A., Velikanov A.Ya. RZEv in propylitization, albititization, eisitization and berezitization columns-l

**ПРИЗНАКИ ПРИСУТСТВИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ВЫЯВЛЕНИЯ
ВЫСОКОАЛМАЗОНОСНЫХ КИМБЕРЛИТОВ СРЕДНЕПАЛЕОЗОЙСКОГО
ВОЗРАСТА НА ТЕРРИТОРИИ ОЛЕНЕКСКОГО ПОДНЯТИЯ И ЕГО
ОБРАМЛЕНИЯ**

Николай Похиленко^{1,2}, Валентин Афанасьев¹, Людмила Похиленко¹, Николай Тычков¹

1 ФГБУН «Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева»,

630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3

2 ФГАОУ ВО «Новосибирский государственный университет»,

630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

**SIGNS OF THE PRESENCE AND PROSPECTS FOR IDENTIFICATION OF HIGH
DIAMOND-BEARING KIMBERLITES OF MIDDLE PALEOZOIC AGE IN THE
TERRITORY OF THE OLENEK UPWAY AND ITS FRAMEWORK**

Nikolay Pokhilenko^{1,2}, Valentin Afanasyev¹, Lyudmila Pokhilenko¹, Nikolay Tychkov¹

1 Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3, Akademika Koptyuga ave.,

Novosibirsk, 630090, Russia

2 Novosibirsk State University, 2, Pirogova str., Novosibirsk, 630090, Russia

Abstract. The main perspectives of the primary sources of diamonds today are associated with the northeast of the Siberian Platform. Here there are reliable indications of Middle Paleozoic diamondiferous kimberlite bodies. These kimberlites are localized in the Anabar River basin, as well as in the area of the Kyutyungda graben and to the south in the upper reaches of the Daldyn and Molodo rivers, and in the Toluop-Daldyn watershed, including its northern slope.

1. Введение

С учетом существенного осложнения ситуации с сырьевой базой отечественной алмазодобывающей промышленности начиная уже с 2030 года, необходима постановка поисковых работ по выявлению новых объектов на территории Сибирской платформы, включая ее арктические районы. В частности, в верховьях правых притоков реки Анабар в районе Уджинского поднятия и его восточного обрамления, а также на территориях Оленекского поднятия и его южного обрамления установлены прямые признаки присутствия новых полей кимберлитов среднепалеозойского возраста, содержащих высокопродуктивные тела. Для их локализации необходимо проведение тематических работ прогнозно-поискового характера с использованием научно-методического и экспертного сопровождения специалистами Сибирского отделения РАН. В настоящей работе рассмотрены перспективы выявления новых полей алмазоносных кимберлитов среднепалеозойского возраста, а возможно и протерозойского, на территории Оленекского поднятия и его южного обрамления на основе анализа особенностей состава и морфологических характеристик ИМК из разновозрастных терригенных отложений этого региона.

2. Основные перспективы коренной алмазоносности арктических территорий Сибирской платформы

Программа освоения Арктической зоны РФ тесно связана с перспективами развития на этой территории добывающей промышленности. Анализ состояния и возможностей наращивания сырьевой базы полезных ископаемых арктических районов Центральной и Восточной Сибири показывает, что в ближайшие десятилетия для экономики континентальной части этой территории значительную, если не преобладающую, роль будет играть уровень развития

добывающей промышленности стратегически важных твердых полезных ископаемых [1–3]. В этой связи принципиально важным представляется проведение опережающих региональных и тематических геологических исследований, нацеленных на объективную оценку перспектив конкретных арктических территорий на выявление определенных видов полезных ископаемых, добыча которых будет оправдана и целесообразна в Арктике. К таким видам твердых полезных ископаемых в первую очередь, относятся алмазы, наряду с редкими, редкоземельными и благородными металлами.

Перспективы коренной алмазоносности Сибирской платформы (СП), включая ее арктические территории, связываются с проявлениями кимберлитового магматизма домезозойского возраста [4–7]. Их присутствие на северо-востоке платформы достоверно обосновывается: 1) наличием в регионе выявленных слабоалмазоносных кимберлитовых тел среднепалеозойского возраста; 2) наличием в регионе алмазоносных гравелитов среднепалеозойского возраста; 3) наличием в ряде россыпей региона доминирующих количеств алмазов, аналогичных по морфологическим характеристикам таковым из среднепалеозойских кимберлитов с промышленной алмазоносностью; 4) наличием в россыпях региона гранатов, имеющих признаки состава и морфологии, характерные для гранатов из алмазоносных кимберлитов среднепалеозойского возраста [4–6]. В частности, в районе Кютюндинского грабена в турнейских прибрежно-морских отложениях локализованы исключительно кимберлитовые алмазы, и по высоким содержаниям пиропов «алмазной ассоциации» на этой территории прогнозируются высокопродуктивные кимберлитовые тела. В последнее время повышенные содержания «алмазных» пиропов установлены в популяциях гранатов из русловых отложений средней части бассейна р. Куойка, восточнее Уджинского поднятия. Преобладающие количества алмазов, характерных для промышленных среднепалеозойских кимберлитов, помимо россыпей р. Молодо, установлены в ряде россыпей бассейна р. Анабар, а также обрамления Уджинского поднятия. Эти районы имеют хорошие перспективы выявления новых полей кимберлитов среднепалеозойского возраста, включающих тела с промышленной алмазоносностью.

Наиболее реальные перспективы промышленной алмазоносности России имеются на северо-востоке Сибирской платформы [4–7]. Именно там надежно обоснованы перспективы коренной алмазоносности двух площадей, на которых бесспорно имеются поля среднепалеозойских кимберлитов с промышленными содержаниями алмазов. Одна из них охватывает Анабаро-Уджинское междуречье, вторая – Приленский район (бассейн р. Кютюнгда и южнее – верховья рек Далдын и Молодо). Эти площади относятся к типу полихронного кимберлитового магматизма. На второй из них имеются преобладающие юрско-меловые кимберлиты (уже выявлены многие десятки тел), заведомо не алмазоносные, и среднепалеозойские, невыявленная часть которых относится с коренными источниками высококачественных алмазов россыпей р. Молодо и должна быть объектом поиска. Эта площадь важна в том плане, что позволит определить характер и количество коренных источников, обеспечивших формирование богатейших россыпей Среднего Молодо с высококачественными алмазами. Одной этой площадью не исчерпываются перспективы данного района. Среднепалеозойские кимберлиты прогнозируются нами также в бассейне р. Кютюнгда, где в нижнекарбонных гравелитах нами обнаружена древняя россыпь алмазов достоверно из среднепалеозойских кимберлитов [5]. Кимберлиты протерозойского возраста в пределах СП пока не выявлены, хотя имеются определенные предпосылки их присутствия, по крайней мере на ее северо-восточной части [7]. В полях домезозойского возраста арктической части СП – Чомурдахском, Западно-Укукитском, Восточно-Укукитском, Мерчимденском и Огонер-Юряхском кимберлиты с промышленными уровнями алмазоносности не установлены, несмотря на обилие выявленных тел. Тем не менее, для ряда площадей северо-востока СП выявлены надежные признаки присутствия еще не найденных высокоалмазоносных кимберлитов палеозойского возраста. К таким площадям относятся: 1) правобережная часть р. Анабар (бассейны рек Маят, Биллях, Уджа); 2) южное обрамление Оленекского поднятия (верховья бассейна р. Молодо, бассейны

правых притоков р. Кютюнгдэ) [5]. Помимо упомянутых, на северо-востоке СП имеются и другие перспективные участки. К примеру, в трех мелкообъемных пробах, взятых нами из нижней части разреза пермских отложений, несогласно залегающих на кембрийских карбонатных породах в бассейне реки Куойка, установлены зерна пиропов и пикроильменитов кимберлитового типа, что однозначно указывает на наличие в регионе кимберлитов допермского возраста. На этих площадях в разновозрастных терригенных породах обнаружены значительные количества алмазов кимберлитового типа и пиропов. Анализ особенностей состава этих пиропов указывает на большую мощность и низкие степени метасоматической проработки базитовыми агентами истощенных перидотитов литосферной мантии на глубинах, отвечающих области стабильности алмазов, под выносившими их кимберлитами. Таким образом, эти районы имеют хорошие перспективы выявления новых полей кимберлитов палеозойского возраста, включающих тела с промышленной алмазоносностью.

В период с 1976 по 2012 г. ИГиГ СО АН СССР, с 2006 г. – ИГМ СО РАН, совместно с Амакинской ГРЭ проводились работы по районированию северной части Якутской алмазоносной провинции (ЯАП) [5]. К первому, наиболее простому в поисковом отношении типу этой территории, относятся площади выхода на дневную поверхность кимберлитовмещающих карбонатных пород нижнего и среднего кембрия. Это практически все левобережье р. Оленек, верховья рек Хорбусуонка, Кютюнгде (включая бассейн р. Улахан-Юэттах), а также ряд площадей юго-западного обрамления Кютюнгдинского грабена. Во втором типе поисковых обстановок изученной территории потенциально кимберлитовмещающие нижнепалеозойские породы перекрыты более молодыми осадочными породами (каменноугольными турнейского яруса – в пределах Кютюнгдинского грабена, пермскими – на юго-западном фланге грабена, юрскими и меловыми – на востоке территории). В третьем типе поисковых обстановок на потенциально кимберлитовмещающих породах залегают покровы траппов. Такая ситуация характерна для западной части изученной территории. В четвертом, самом сложном типе поисковых обстановок, нижнепалеозойские породы перекрыты пермскими отложениями, а те, в свою очередь, перекрыты трапповыми покровами. Такие ситуации представлены в ряде участков юго-западного фланга Кютюнгдинского грабена; наиболее значительные площади, относящиеся к этой обстановке, находятся на Далдыно-Толуопском водоразделе.

За время работы проведено изучение особенностей состава минералов-спутников алмаза более чем из 70 конкретных объектов [5], располагающихся на территориях, ограниченных с севера реками Бур и Келимер, с востока – Леной, с юга – р. Молодо, с запада – верховьями р. Молодо (правобережье р. Оленек) и рекой Куойка (левобережье р. Оленек). Общая площадь изученной территории составила около 40 тыс. км². В итоге были изучены пробы минералов-спутников из русловых отложений бассейнов рек-притоков Лены: Эекит (Буур-Эекит, Тас-Эекит, Сололи), Элиэтибийе, Крестях, Молодо (Усунку, Тит-Юреге, Муогдан, Далдын, верховья р. Сюнгодэ); рек – притоков р. Оленек: Кютюнгде, Толуопка, Улахан-разбойник, Югюс-Юреге, Торкукуй, Бур, Келимер. Всего было изучено около 70 проб пиропов из современных аллювиальных отложений, а также древних (нижнекарбонатных) терригенных пород; общее количество изученных зерен пиропов составило около 11 тыс. Кроме того, были изучены 14 проб хромшпинелидов общим количеством около 1.2 тыс. знаков.

Полученные результаты позволяют достаточно высоко оценить перспективы россыпной и коренной алмазоносности для зоны северо-восточного простирания, секущей Кютюнгдинский прогиб, общей площадью около 6 тыс. км². Наиболее перспективными являются верховья р. Молодо и Далдыно-Толуопский водораздел, расположенные к юго-западу от прогиба, и правобережье р. Кютюнгде – к северо-востоку. Очевидна необходимость исследования минералов-спутников из всех левых притоков р. Кютюнгде, а также правых притоков в верхнем течении. Их результаты позволяют повысить объективность оценки перспектив алмазоносности характеризуемой территории.

3. Выводы и рекомендации

1. Анализ полученной информации позволяет провести первый этап минералогического картирования территории Кютюнгинского прогиба и прилегающих территорий. Наиболее перспективной на обнаружение коренных источников алмаза является территория северо-восточного простираения площадью около 6 тыс. км², ограниченная: на юге – верховьями рек Далдын и Молодо, на западе – водоразделом рек Толуопка и Улахан-Разбойник, на северо-западе – линией, соединяющей среднее течение р. Толуопка с верховьями р. Улахан-Юттэх, на северо-востоке – водоразделом рек Кютюнгде, на юго-востоке – линией, соединяющей устье р. Улахан-Юттэх с истоками р. Тит-Юреге, далее водоразделом, разделяющим бассейн р. Далдын и бассейны рек Тит-Юреге и Муогдан.

2. Самыми перспективными в пределах выделенной площади являются участки, захватывающие верховья р. Далдын, Молодо, Толуопско-Далдынский водораздел, включая его северный склон, а также северо-восточная часть выделенной зоны (на северо-восток от линии, соединяющей устье правого притока р. Кютюнгде, ручья Холомолох, с устьем р. Югюс-Юреге, вплоть до водораздела, разделяющего бассейны р. Кютюнгде и Хорбусуонка), С учетом данных по распространенности на последнем участке терригенных каменноугольных отложений имеются перспективы его россыпной (древние прибрежно-морские россыпи) алмазоносности. Для надежной оценки перспектив региона на коренную алмазоносность и выделения конкретных участков под детальные поиски необходимо проведение дополнительных прогнозно-поисковых работ, как в пределах выделенной площади, так и в ряде участков, примыкающих к ней.

4. Благодарности

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН (№ 122041400157-9).

5. Литература:

- [1] Dobretsov N.L., Pokhilenko N.P. Mineral resources of the Russian Arctic and problems of their development in modern conditions // *Geology and Geophysics*, 2010, 51, No. 1, pp. 126-141.
- [2] Pokhilenko N.P. Mineral resources of the Arctic zone of the Republic of Sakha (Yakutia) // *Economics of the East of Russia*. - 2015. - No. 2. - P.12-20. - ISSN 2412-1894.
- [3] Pokhilenko N.P. On the strategy for the development of the mineral resource base of the Russian Federation until 2030 // *Economics of the East of Russia*. - 2017. - No. 1. - P.16-19. - ISSN 2412-1894.
- [4] Pokhilenko N.P., Sobolev N.V., Safronov A.F., Lavrentiev Yu.G., Amshinsky A.N., Rodionov A.S. Magnesium garnets of kimberlites of the North of the Siberian Platform // *Composition and processes of deep zones of the continental lithosphere: Abstracts of the international symposium on May 30 - June 2, 1988, Novosibirsk, 1988*, pp. 75-76.
- [5] Pokhilenko N.P., Sobolev N.V. Mineralogical mapping of the North-East section of the Yakutian kimberlite province and its main results // *6th Int. Kimberlite Conf., Novosibirsk, Aug., 1995: Ext. Abstr., Novosibirsk, 1995*, P. 446-448.
- [6] Pokhilenko N.P., Sobolev N.V., Kuligin S.S., Shimizu N. Peculiarities of Distribution of Pyroxenite Paragenesis Garnets in Yakutian Kimberlites and Some Aspects of the Evolution of the Siberian Craton Lithospheric Mantle // *Proc. of the 7th Int. Kimberlite Conf., Vol. 2, Cape Town, 1999*, P. 689-698.
- [7] Afanasiev V.P., Pokhilenko N.P., Lobanov S.S. Placer diamond potential of the Siberian Craton: Possible sources and ages // *Geology of Ore Deposits*. 2011. V. 53. № 6. P. 474-477
- [8] Afanasiev V.P., Pokhilenko N.P. Approaches to the Diamond Potential of the Siberian Craton: A New Paradigm // *Ore Geology Reviews* Volume 147, August 2022, doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104980

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ МАЛОВЫСОТНОЙ БПЛА-ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ ОБЪЕКТИВИЗАЦИИ СРЕДНЕМАСШТАБНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ КАРТ

Валентин Савченко^{1,2}

1 Институт «Сибирская школа геонаук», ФГБОУ ВО «Иркутский национально-исследовательский технический университет», 664074, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 83

2 ФГБУН «Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН», 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1а

COMPLEX LOW-ALTITUDE UAV GEOPHYSICAL SURVEY APPLICATION FOR MEDIUM-SCALE GEOLOGICAL MAPS OBJECTIVIZATION

Valentin Savchenko^{1,2}

1 Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov str., Irkutsk, 664074, Russia

2 Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, 1a, Favorskogo str., Irkutsk, 664033, Russia

Abstract. The research subject is the assessment of the admissibility of using complex low-altitude unmanned aerial (UAV) geophysical survey data as minimum sufficient source for geological maps objectification. Project site is the gold prospect of Sukhoi Log (or black-shale) style in Bodaibo District, Irkutsk Region, Russia, which determines the conclusion validation. The chosen problem is quite widespread and involves incomplete level of detail and reliability of existing geological maps. So it was decided to clarify geological situation by UAV magnetic and gamma-ray survey. It is shown that as a result of interpretation of referred data, regional geology knowledge and rocks physical properties contrast it became possible to create a new geological map. It is concluded, that express and inexpensive methodic is useful for specifying the position of geological and prospective ore-bearing local structures of the studied site, as well as for similar licensed areas nearby and other parts of Bodaibo synclinorium.

1. Введение

Для территории России характерна достаточно хорошая региональная геологическая изученность, однако она находится в пределах масштабных уровней 1:200 000, в лучшем случае – 1:50 000. Для проектирования и проведения современных поисковых работ, которые обычно ведутся в масштабах 1:10 000 и крупнее, и тем более – горных работ, необходима информационно-картографическая основа соответствующего масштабного уровня. Поскольку в основном поисковые работы сейчас ведутся на сложнопроходимых участках, встает вопрос повышения скорости и снижения стоимости ранних стадий геологического изучения площадей, т.е. тех стадий, когда обоснованность значительных затрат на геологоразведочные работы (ГРР) еще не подтверждена.

Цель настоящей работы – обоснование возможности корректировки геологических карт предшественников, существенного уточнения границ геологических подразделений и структуры поискового участка, исключительно на основе данных дистанционных зондирований Земли методами маловысотной беспилотной (БПЛА) магнитной и гамма-съемки, без производства каких-либо наземных работ. Естественно, в общем случае такая задача не может быть решена, в данном случае оценка производится для геологических условий Бодайбинского синклинория, перспективного на обнаружение новых золоторудных объектов [1, 2 и мн.др.].

Гипотеза исследования заключается в том, что на изучаемом объекте и, шире, в рассматриваемом регионе, и без проведения геологосъемочных работ возможно использовать детальные, быстрые и дешёвые методы беспилотных геофизических съёмок для уточнения

геологических границ и положения перспективных на золотое оруденение подразделений и структур. В случае успешного доказательства такой возможности ранняя стадия ГРП может быть существенно оптимизирована, так как отдельные поисковые лицензии на золото в данном районе обычно имеют площадь 20-50 кв.км., и в связи с небольшими размерами без особенных проблем и с минимальными мобилизационными затратами могут быть исследованы с помощью БПЛА-методов.

2. Использованные методы и их применение

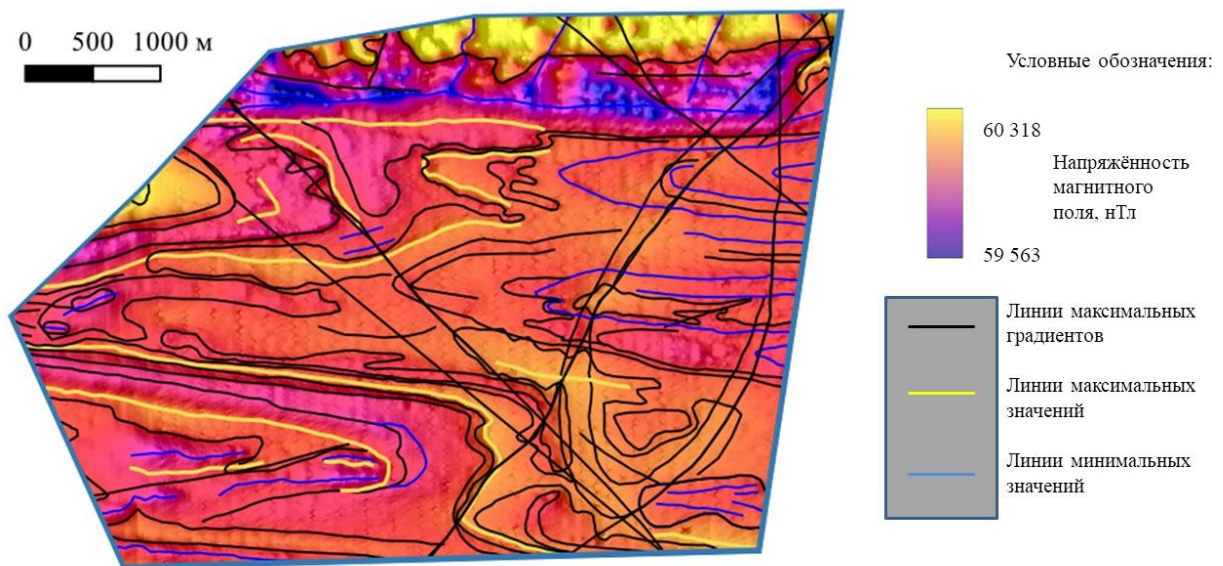
В рамках работы рассмотрен один из лицензионных участков в пределах Бодайбинского синклинория. На нём была проведена беспилотная аэрогеофизическая съёмка – магнитометрия и радиометрия, результаты которой были подвергнуты анализу и геолого-геофизической интерпретации.

Для выполнения маловысотных съёмок использовался комплекс SibGIS UAS – беспилотный летательный аппарат мультироторного типа с магнитометром семейства POS на подвесе и сцинтилляционным гамма-радиометром. Характеристики комплекса и методика съёмки описаны в литературе [3, 4], отметим три наиболее важных для данной работы аспекта – «абсолютный» характер измерения магнитометрического канала с чувствительностью в сотые нанотесла и отсутствием необходимости программных фильтраций каких-либо помех для достижения прецизионной точности измерений, и съёмка с точным обтеканием рельефа. Эти аспекты позволяют получить данные с точностью, необходимой для производства детальных карт трансформант поля. Высота съёмки – 40 м над землёй под датчиком магнетометра, частота измерений мощности дозы гамма-поля 0,5 Гц, модуля вектора магнитной напряжённости – 2 Гц.

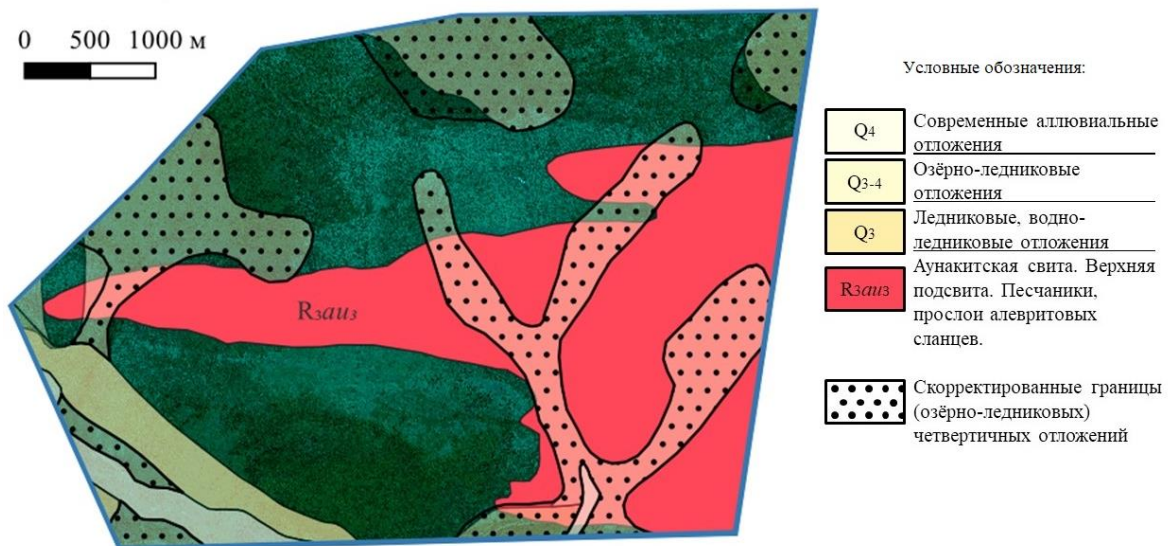
Для начала, результаты магнитометрии и радиометрии были очищены от выбросов и проинтерполированы. Затем построена цифровая модель распределения значений модуля напряжённости магнитного поля и выделены его линеаменты – как по локальным минимумам и максимумам, так и по наибольшим градиентам. После этого вкрест структур построен график напряжённости поля. Выходы магнитоконтрастных и монотонных пород выделены отдельно в плане и на графике, сопоставлены между собой и с геологической картой предшественников. Таким образом, области с определёнными диапазонами магнитных свойств были приведены в соответствие с конкретными породными разностями. И наконец, участок с наилучшей сходимостью магнитных и ранее закартированных геологических подразделений выбран за эталонный, новые геологические границы проведены на нём, и по наблюдаемым здесь признакам выделены далее на всей исследуемой площади.

Некоторые из выделенных линеаментов магнитного поля имеют значимый контраст, но секут все выделенные структуры без смещения их границ. Подобные линии, прослеживаемые особенно уверенно, приняты за разрывные нарушения без видимого смещения.

Карта радиометрической съёмки была сопоставлена с геологической картой предшественников, составленной по магнитным данным новой картой дочетвертичных образований, а также со спутниковым снимком лицензионной площади для определения и заверки определяемых в гамма-поле образований.



А



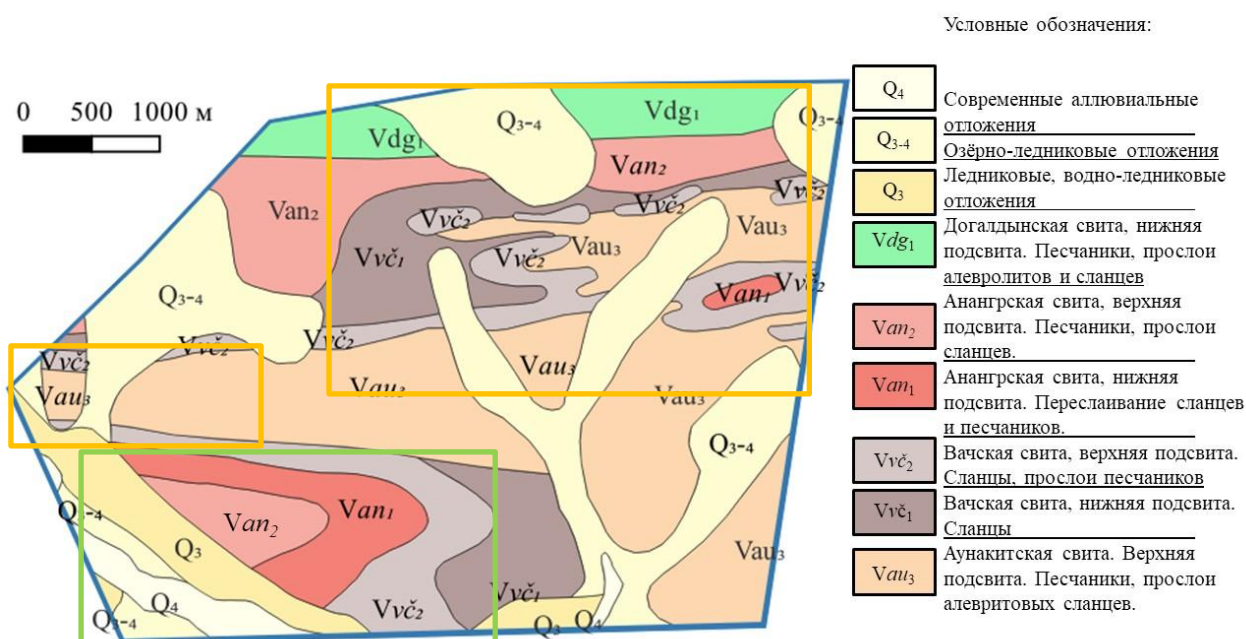
Б

Рисунок 1 – Карта напряжённости магнитного поля с магнитоконтрастными линеаменами (А) и карта радиоконтрастных подразделений (Б)

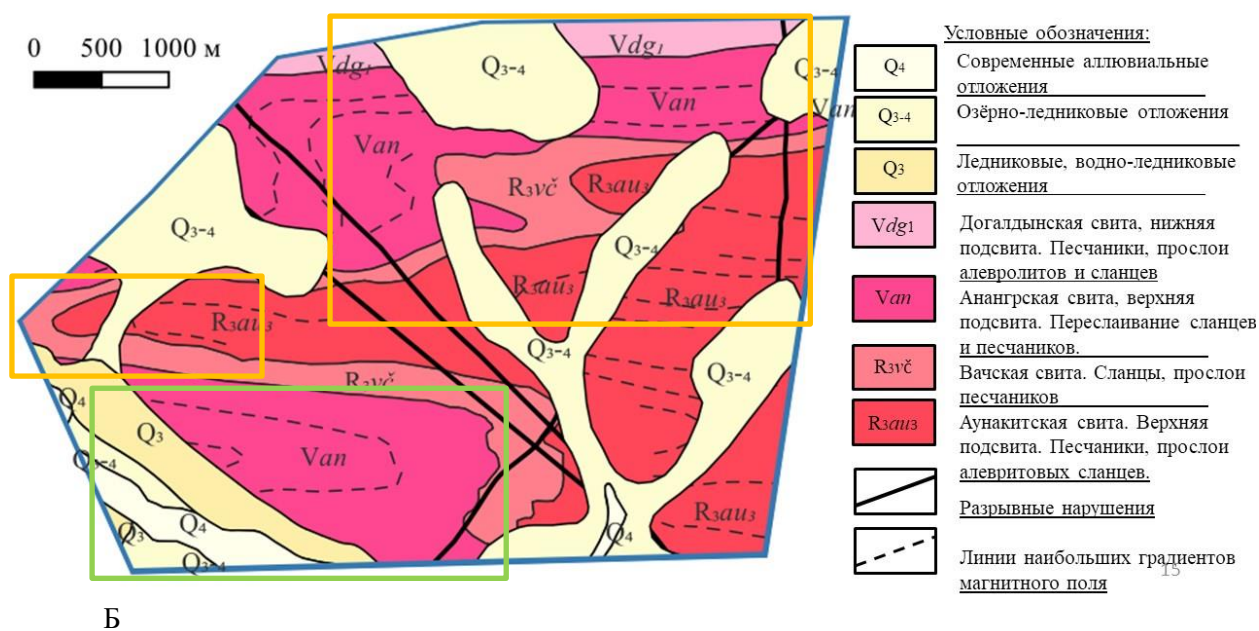
По результатам анализа в магнитном поле ярче всего выделяются породы догалдынской свиты - по максимальным значениям напряжённости магнитного поля, и анангрской свиты – по минимальным. Аунакитская и вачская свиты выделены по двум переходным диапазонам. Из дочетвертичных образований в гамма-поле выделяется перспективная на искомый тип оруденения аунакитская свита верхнего рифея, благодаря более высокой, чем у остальных подразделений, обнажённости, а главное – её породы наиболее богаты калийсодержащими слюдами, что определяет её повышенную радиоактивность за счёт изотопа ^{40}K , а также проявленность во вторичных литохимических ореолах. По минимальным же значениям определены поля распространения наиболее мощных четвертичных озёрно-ледниковых отложений, рыхлыми обводнёнными массами перекрывающих коренные породы и экранирующих излучение от них. Остальные свиты не контрастны в гамма-поле из-за перекрытия различными генетическими типами четвертичных отложений и меньших содержаний радиоактивных элементов. Также из-за съёмки на высоте происходит сильное

сглаживание локальных аномалий гамма-активности от выходов на поверхность очень тонких, мощностью от десятков до первых метров и менее, структур – осложнений складчатости множественных порядков, характерных для региональной геологической ситуации.

В результате проведённой геологической интерпретации построены карта дочетвертичных образований с предполагаемыми разломами и геологическая карта дневной поверхности (рис. 3). Новая геологическая модель лучше предшествующей согласуется с представлениями о структурной геологии района – исправлены взаимоотношения между геологическими границами пород согласного разреза и ширина выходов скорректирована с учётом максимальных мощностей наблюдаемых подразделений. Более того, внутри закартированных свит отмечены ещё более мелкие магнитоконтрастные структуры (пачки), что дает дополнительную информацию о внутреннем строении осадочных рудовмещающих толщ при переходе на следующую стадию геологоразведочных работ. Для искомого сухоложского типа золотого оруденения характерна приуроченность к контактам не только свит, но и их подсвит и отдельных пачек, так что геометризация этих, более мелких геологических тел существенно повышает эффективность детальных поисков и оценки.



А



Б
Рисунок 2 – Геологическая карта предшественников (А) и итоговая геологическая карта с линиями наибольших градиентов магнитного поля (Б), М 1:50 000.

На рисунке 2 дано сравнение геологической карты предшественников и скорректированной в рамках работы геологической карты. Зелёным прямоугольником выделен эталонный участок, на котором первоочерёдно сопоставлены линеаменты магнитного поля и границы геологических подразделений. Расхождения исходных и скорректированных границ здесь минимальны, в сравнении с остальной площадью – расстояния между ними составляют от 0 до 240 м, в среднем – 100 м. Оранжевыми прямоугольниками показаны участки, на которых новые границы оказались сдвинуты наиболее значительно – от 100 до 1400 м, в среднем – 300 м. Важность такой переоценки дополняется тем, что именно эти фрагменты карты отвечают сразу стратиграфическим и структурным поисковым критериям для искомого типа оруденения, и их расположение оказалось смещено на расстояние до 1 км, что критически много для проектирования дальнейших поисковых и оценочных работ.

3. Выводы

В итоге, применённые для изучения участка методы показали эффективность в выполнении ряда геологических задач – картирования дочетвертичных пород, разрывных нарушений, четвертичных отложений. Детальная беспилотная магнитная аэросъёмка позволяет скорректировать геологическую карту и положение перспективных структурно-вещественных комплексов, а БПЛА гамма-съёмка выделяет поля распространения наиболее мощных четвертичных отложений и границы выходов аунакитской свиты.

Таким образом, приведённые БПЛА геофизические методы позволяют быстро и недорого получить детальные объективные данные об участке, которые можно использовать для уточнения геологического строения площади, выделения перспективных зон и принятия решений о переходе на следующую стадию ГРП. Используемые для этого признаки универсальны для региональной геологической ситуации и применимы для других лицензионных площадей в пределах Бодайбинского синклинория.

4. Благодарности

Автор работы выражает благодарность научному руководителю Паршину А.В. и коллегам из департаментов геоинформатики и рудной геологии института Сибирская школа геонаук Иркутского национального исследовательского технического университета, а также сотрудникам Института геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук за оказанную помощь в проведении работы.

5. Литература:

- [1] Горячев Н.А., Будяк А.Е., Михалицына Т.И., Тарасова Ю.И., Горячев И.Н., Соцкая О.Т. Эволюция орогенного золотого оруденения в структурах южного и восточного обрамления Сибирского кратона. *Науки о Земле и недропользование*. 2023;46(4):374-389. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-374-389>. EDN: НХQZHE
- [2] Буряк В.А., Хмелевская Н.М. Сухой Лог – одно из крупнейших золоторудных месторождений мира. Владивосток: Дальнаука, 1997. 156 с.
- [3] A. Parshin, A. Budyak, A. Bulnaye, et al. Complex UAS-geophysical surveys at the first stages of geological prospecting: Case in the western sayan (Russia) // 1st EAGE Workshop on Unmanned Aerial Vehicles : 1, Toulouse, 02–04 декабря 2019 года. – Toulouse, 2019. – EDN SKLESO.
- [4] Снегирёв Н.В., Гаченко С.В., Паршин А.В. Сравнительный анализ информативности маловысотной магниторазведки с применением беспилотных летательных аппаратов и наземной магниторазведки // *Науки о Земле и недропользование*. 2023. Т. 46. № 2. С. 182–189. <https://elibrary.ru/clamag>, <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-182-189>.

УДК

МЕДНОЕ ОРУДЕНЕНИЕ ЖЕЗКАЗГАНСКОГО РЕГИОНА, ЦЕНТРАЛЬНОГО КАЗАХСТАНА: ВЗГЛЯД НА РУДОГЕНЕЗ И СТРУКТУРНО КОНТРОЛИРУЕМУЮ МИНЕРАЛИЗАЦИОННУЮ СИСТЕМУ

Азам Солтани-Дехнави, Августин Лодиз, Рустам Жанабаев, Ферештех Шабани-Сефиддашти
Школа горного дела и наук о Земле, Назарбаев Университет, 010000, Казахстан, г. Астана, пр-т
Кабанбай батыра, 53, 6 блок

COPPER MINERALIZATION IN ZHEZKAZGHAN ORE FIELD, CENTRAL KAZAKHSTAN: INSIGHTS INTO ORE-GENESIS AND STRUCTURALLY CONTROLLED MINERALIZATION SYSTEM

Azam Soltani-Dehnavi, Augustine Lodise, Rustam Zhanabayev, Fereshteh Shabani-Sefiddashti
School of Mining and Geosciences, Nazarbayev University, 6 block, 53 Kabanbay batyr Ave, Astana,
010000, Kazakhstan

Abstract. The world-class Zhezkazghan Ore Field is a prominent Sedimentary-Hosted Stratabound Copper (SSC-type) mineralization system located in the northern Chu Sarysu basin (Central Kazakhstan). These copper deposits occur within an Upper Carboniferous (Pennsylvanian) fluvial clastic red bed sequence. The mineralization system shows two significant zones of chalcopyrite-dominated and bornite-dominated assemblages with minor chalcocite, digenite, covellite, and djurleite. Pyrite in both assemblages occurs in the form of framboidal pyrite and relict pyrite, showing the early stage of mineralization and being replaced by bornite in the late stage of mineralization. The petrographic evidence at the Zhezkazghan deposits includes the presence of copper sulfides as intergranular cement. Saryoba East deposit, part of Zhilandy Group deposits in the northern Zhezkazghan deposit, shows the occurrence of sulfides as clasts and within/along the calcite veins in addition to sulfide replacement. Known mineralization at deposit sites in the Zhezkazghan Ore Field is structurally controlled at the intersection of syn-depositional folding F1 anticlines (E-NE-trending) crossed by F2 anticlines (N-NW-trending). The structure can be likened to the egg-carton model, facilitating the movement of dense ore brines through the petroleum-bearing anticlines. This interaction leads to the formation of copper sulfides at the points where these fluids are mixed.

1. Введение

Стратиформные медные месторождения осадочного происхождения (SSC-тип) содержат значительные запасы меди (15% мирового производства; [1]), кобальта (80% мирового производства; [2]) и серебра (12,4% мирового производства, [3]). Всемирно известные месторождения, такие как пермское Купфершифер (Германия и Польша), палеопротерозойское месторождение Удокан (Сибирь), неопротерозойский Центрально-Африканский меденосный пояс (Замбия, Демократическая Республика Конго) и Калахарский медный пояс (Намибия и Ботсвана), а также рудное поле Жезказган (Казахстан) являются крупными производителями Cu, Co, Ag и Re.

Среди пятнадцати осадочных бассейнов Казахстана, известных своими запасами нефти и газа, шесть бассейнов перспективны на обнаружение медных, урановых и фосфатных руд. Среди этих бассейнов Чу-Сарысувский бассейн первого уровня является третьим по величине бассейном с медными месторождениями осадочного происхождения в мире. Кроме того, в Тенизском бассейне, расположенном в северной части Чу-Сарысувского бассейна, недавно были выявлены перспективы на медь [4]. Чу-Сарысувский и Тенизский бассейны разделены поднятием, но имеют схожие литологию, структуру и стиль минерализации, связанные с верхнекаменноугольными (пенсильванскими) и пермскими аллювиальными красноцветными

толщами (формации Таскудук и Жезказган Чу-Сарысуйского бассейна, эквивалентные свите Владимирова в Тенизском бассейне, вмещающей медные руды) [4, 5] (Рисунок 1). Тенизский и Чу-Сарысуйский бассейны образовались в результате развития Алтайского складчатого пояса (Центрально-Азиатского складчатого пояса) [6]. Для Чу-Сарысуйского и Тенизского бассейнов характерен континентально-морской-континентальный цикл осадконакопления от девона до перми. Основание бассейнов сложено раннедевонскими-среднедевонскими промежуточными вулканическими и вулканокластическими породами, переходящими в позднедевонские красноцветные отложения [4, 5]. Ранний карбон отмечен отложением лагунных и окраинно-морских соленосных толщ, которые перекрыты позднекаменноугольными-пермскими аллювиально-озерными красноцветными отложениями и толщей сланцев и известняков (Рисунок 2).

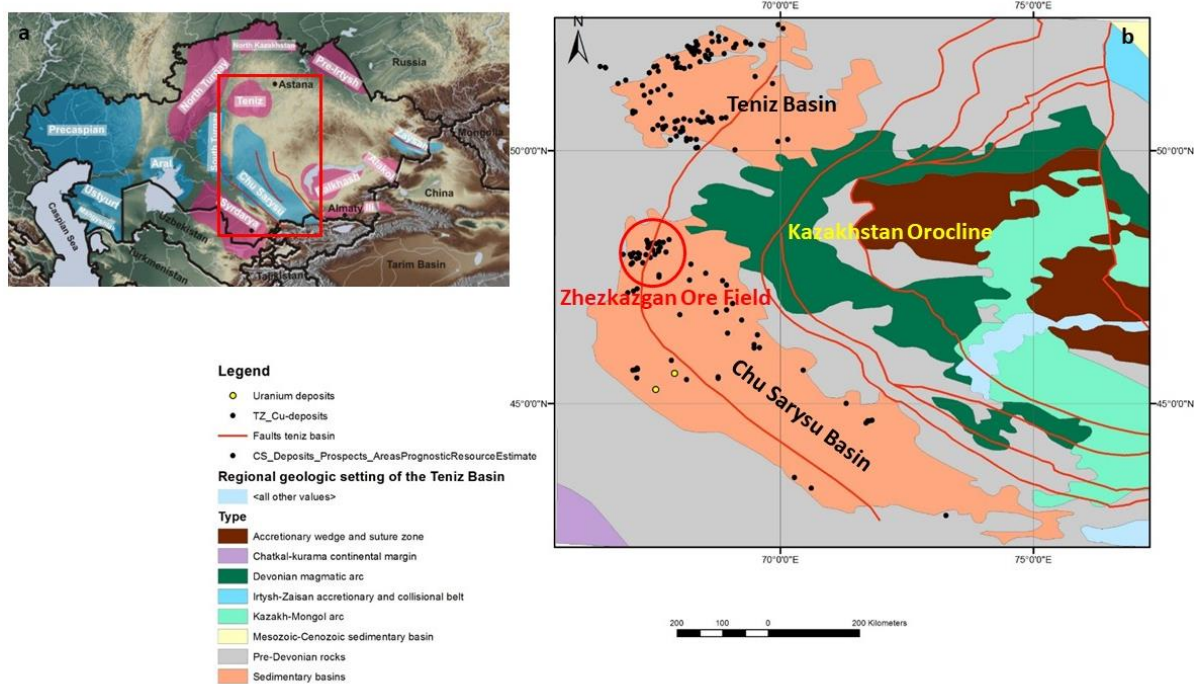


Рисунок 1 – а) Расположение осадочных бассейнов Казахстана и район исследования текущей работы. б) Общая геологическая карта Чу-Сарысуйского и Тенизского бассейнов в центральном Казахстане.

В исследовании используются спутниковые снимки для определения структурных элементов, таких как разломы и складки, в пределах бассейнов. Также применяются микроскопические исследования для изучения вмещающих пород и петрографии сульфидных руд на месторождениях Сарыюба Восточное (из группы месторождений Жиланды) и Жезказган.

2. Минералогические и текстурные исследования

Петрографические исследования проводились на сульфидах в сульфидсодержащих образцах, таких как серые песчаники, карбонизированные песчаники, а также кальцитовые жилы и прожилки вмещающих пород с месторождения Сарыюба Восточная и представительных образцов с Жезказгана. Согласно сосуществующим сульфидным ассоциациям и текстурным вариациям, выделяются две основные сульфидные ассоциации, включающие: первая - халькопирит + пирит + тетраэдрит-теннантит и незначительное присутствие борнита, а вторая сульфидная ассоциация доминирует борнит с заметным присутствием джурлеита, халькозина, пирита и спорадическим присутствием дигенита и ковеллина. Эти две сульфидные ассоциации могут быть связаны с четырьмя основными стадиями минерализации следующим образом:

а) *предрудная стадия*

Наиболее яркие свидетельства синседиментационного появления сульфидов наблюдаются в форме фрамбоидального пирита, некоторые из которых хорошо сохранились, а большинство присутствуют в виде остаточных, частично замещенных медными сульфидами, такими как борнит и халькозин, образующими островки этих сульфидов в вмещающих породах (Рисунок 3а). Размер отдельных фрамбоидов пирита достигает 25 мкм в диаметре, они образуют тонкие полосы вдоль плоскостей напластования или располагаются в межзерновом пространстве.

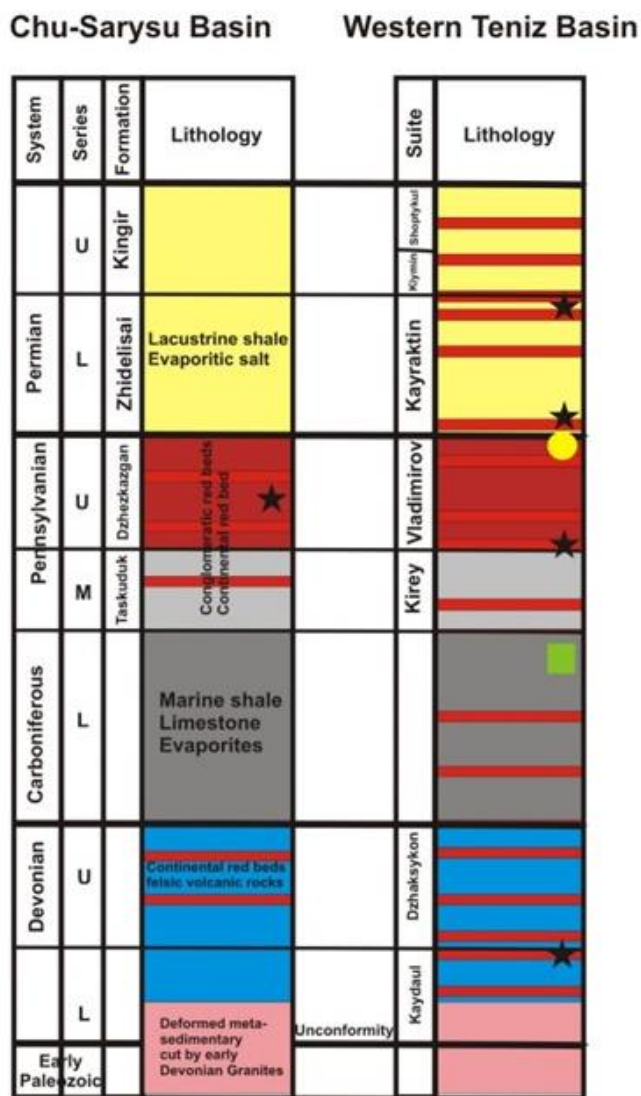


Рисунок 2 – Палеозойский стратиграфический разрез Чу-Сарысу́йского и Западно-Тенизского бассейнов (видоизменено по [5]). Известные месторождения медистых песчаников отмечены звездочками.

b) рудная стадия

Основная стадия минерализации на месторождении Сарыоба Восточная отмечена присутствием сульфидов в нескольких формах, таких как рассеянных во вмещающих породах, внутри и вдоль кальцитовых жил, а также в виде обломков. Наблюдаются обе упомянутые выше сульфидные ассоциации. При рассеянном типе сульфиды с переменными пропорциями (до 10 объемных % локально) присутствуют либо в виде отдельных ксеноморфных зерен, либо скоплений зерен (островная форма), случайно рассредоточенных во вмещающей породе (Рисунок 3б). Кальцитовые жилы/прожилки варьируются по толщине от волосяных размеров до нескольких сантиметров, а также присутствуют массивные кальцитовые тела и проявляют случайную ориентацию по отношению к напластованию вмещающих пород. Сульфиды типично встречаются внутри или вдоль кальцитовых жил. Доминирующая ассоциация, связанная с кальцитовыми жилами - борнит-халькозин в виде отдельных или агрегированных

выделений (Рисунок 3с). Встречаются сульфидные обломки различных размеров, обладающие двумя основными сульфидными ассоциациями (Рисунок 3d, e). В образцах из высокосортной руды Жезказгана борнит доминирует в форме цементирующего порового или межзернового выполнения в песчаниках (Рисунок 3f).

с) сульфидные минералы послерудной стадии (дигенит, ковеллит)

Гипергенные процессы вызывают образование некоторых сульфидов, таких как дигенит и ковеллит, в трещинах вмещающих пород.

d) оксидные минералы после рудной стадии

На самом верхнем участке месторождения Сарыоба-Восток (около 30 метров) наблюдается гипергенная изменчивость, состоящая из вторичных минералов меди, таких как малахит, азурит, окси-гидроксиды железа (например, лимонит) и оксид железа (гематит), а также наблюдаемая самородная медь, различающаяся по цвету (Рисунок 4).

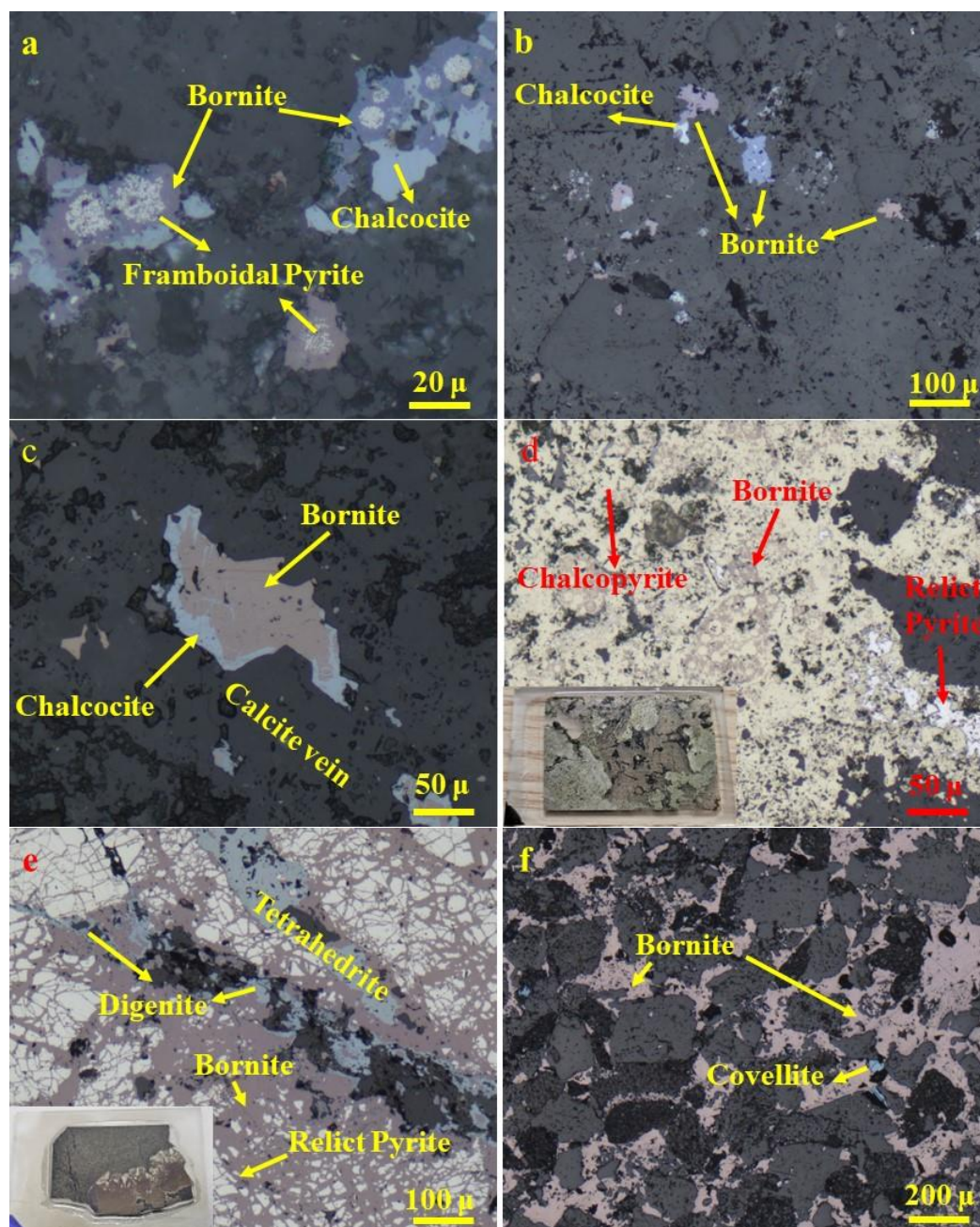


Рисунок 3 – Микрофотографии в отраженном свете руд месторождений Сарыоба Восток и Жезказган из Жезказганского рудного поля.

a) фрамбоидальный пирит, замещенный борнитом и халькоцитом, образец ES 122 из месторождения Сарыоба Восточная; b) вкрапленный борнит и халькоцит, обр. ES 122 месторождения Сарыба Восточное; c) срastания борнита и халькоцита в кальцитовой жиле, обр. ES 153 месторождения Сарыба Восточное; d) массивные срastания халькопирита и борнита и реликтовый пирит, обр. ES 102 месторождения Сарыоба Восточное; e) массивная ассоциация борнита, дигенита, тетраэдрита и реликтового пирита, обр. ES 153 месторождения Сарыба Восточное; f) проявления борнита и незначительного ковеллита демонстрируют заполнение пространственных пор или межзернового цемента, образец Z4 Жезказганского месторождения.

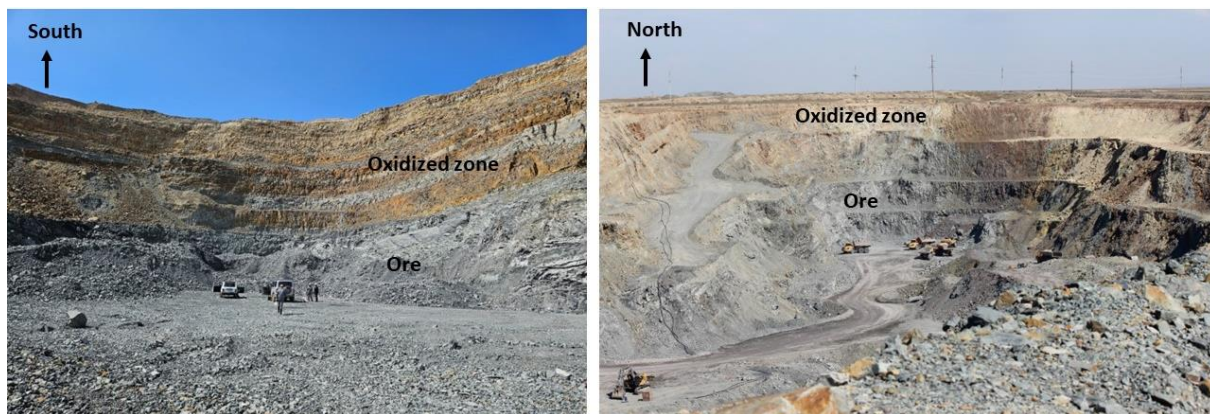


Рисунок 4 – Открытый карьер восточного месторождения Сарыоба с верхней частью окисленной зоны.

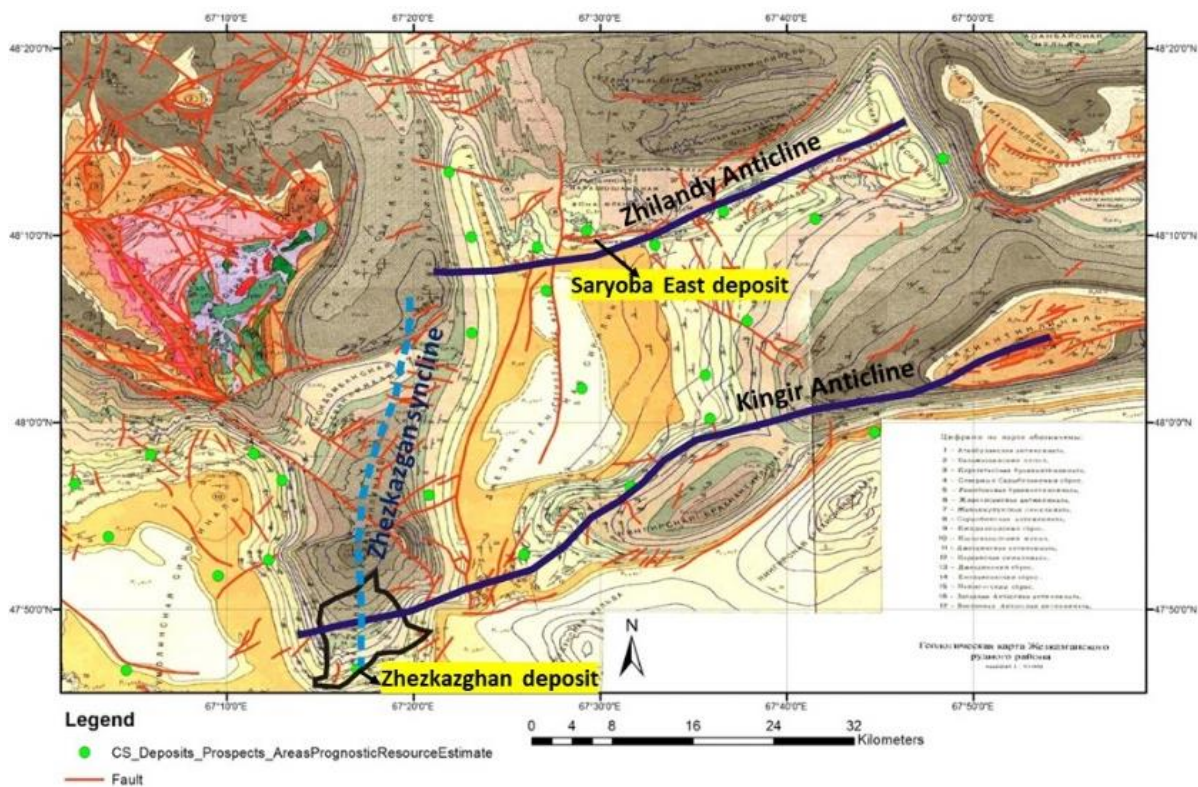


Рисунок 5 – Геологическая карта Жезказганского рудного поля показывает разломы и складки. Участки месторождений определены зеленым кружком.

3. Структурно контролируемая минерализация на Жезказганском рудном месторождении

Оба бассейна Чу-Сарысу и Тенизский испытали складчатость пород в пермском периоде, образовав куполовидно-бассейновые формы. Оба бассейна отмечены параллельными сбросо-сдвиговыми линеаментами, вероятно связанными с пермским орогенным изгибом Казахстана,

что привело к развитию задугового/рифтового грабена. Локализация большинства медных месторождений в Чу-Сарысуйском бассейне прилегает к пересечению двух почти ортогональных систем вертикальных складок. Месторождение Жезказган расположено вдоль синседиментационных антиклиналей F1 (с простиранием на В-СВ), пересекаемых антиклиналями F2 (с простиранием на С-СЗ) в зонах обесцвечивания песчаников [5]. Антиклинали F1 локально концентрировали залежи нефтяных флюидов. Эти структуры являлись путями движения плотных рудных рассолов через нефтеносные антиклинали, что приводило к осаждению рудных сульфидов при смешении двух флюидов [5, 7]. Те же структуры наблюдаются на месторождениях Жиланды (расположенном к северу от Жезказганского месторождения) и Жаман-Айбат (к юго-востоку от Жезказганского месторождения) (Рисунок 5).

4. Выводы

Согласно предыдущим исследованиям и текущему изучению, образование медной минерализации Жезказгана связано с красноцветными песчаниками и их восстановлением в окислительной среде. Также на основе описанных минералогических ассоциаций и текстур выявлено несколько стадий минерализации. Синседиментационное до раннедиагенетического осаждение, отраженное в фрамбоидальном пирите, возможно, обусловлено бактериогенными процессами. Главная стадия минерализации сформировалась после литификации вмещающих пород на поздней стадии диагенеза. Наложенные гипергенные изменения модифицировали верхнюю часть месторождений, приводя к образованию вторичных медных минералов. Структуры играют решающую роль в формировании этих месторождений, связанную с переносом металлоносных флюидов и местом их осаждения, которое приурочено к пересечению синклинальных и антиклинальных структур. Такой структурный рисунок наблюдается в различных участках и может быть полезным при планировании будущих поисково-разведочных работ. Данный предварительный обзор планируется дополнить геохимическим анализом для выяснения присутствия критических металлов в Жезказганском рудном поле, а также при региональных поисково-разведочных работах в будущем.

5. Благодарности

Данный проект является частью конкурсной программы грантов на научно-исследовательские работы для развития преподавательского состава (№ SMG2023002) Назарбаев Университета (Казахстан, Астана). Я благодарна моим научным ассистентам, которые внесли большой вклад в полевые и лабораторные работы. А также координатору лаборатории электронной микроскопии д-ру Александру Арбузу и его команде из Офиса коллективного пользования Назарбаев Университета за использование микроскопического оборудования. Наконец, я хотела бы поблагодарить д-ра М.В. Кудрина (ИГАБМ СО РАН) за помощь в подготовке моего тезиса для этой конференции.

6. Литература:

- [1] Sillitoe, R.H., 2012, Copper provinces: Society of Economic Geologists, Special Publication 16, 1–18.
- [2] Brown, A. C., 1997, World-class sediment-hosted stratiform copper deposits: Characteristics, genetic concepts and metallogenesis, Australian Journal of Earth Sciences, 44:3, 317-328.
- [3] Singer, D.A., 1995. World class base and precious metal deposits; a quantitative analysis. Economic Geology, 90, 88–104.
- [4] Cossette, P.M., Bookstrom, A.A., Hayes, T.S., Robinson, G.R., Jr., Wallis, J.C., and Zientek, M.L., 2014, Sandstone copper assessment of the Teniz Basin, Kazakhstan: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5090–R, 42 p.

- [5] Box, S. E., Syusyura, B., Seltmann, R., Creaser, R. A., Dolgoplova, A., & Zientek, M. L., 2012, Dzhezkazgan and associated sandstone copper deposits of the Chu-Sarysu Basin, Central Kazakhstan. *Economic Geology Special Publication*, 16, 303-328.
- [6] Wilhem, Caroline, Windley, B.F., and Stampfli, G.M., 2012, The Altaids of Central Asia—A tectonic and evolutionary innovative review: *Earth-Science Reviews*, 113, 303– 341.
- [7] Gablina, I.F., 1981, New data on formation conditions of the Dzhezkazgan copper deposit: *International Geology Review*, 23, 1303–1311.

Посвящается 70-летию открытия первой кимберлитовой трубки - Зарница
УДК 549.211:548.4

ДВА АЛМАЗОНОСНЫХ ЭКЛОГИТА ИЗ КИМБЕРЛИТОВОЙ ТРУБКИ ЗАРНИЦА

Здислав Специус¹, Александр Иванов², Виллиам Гриффин³, Сюзанна О'Рейли³,
Екатерина Рубанова³

1 ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

2 ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», 199106, Россия, г. Санкт-
Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2

3 GEMOC центр, Университет Маквори, Сидней, Австралия

TWO DIAMOND-BEARING ECLOGITES FROM THE ZARNITSA KIMBERLITE PIPE

Zdislav Spetsius¹, Alexander Ivanov², William Griffin³, Suzanne O'Reilly³, Ekaterina Rubanova³

1 Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

2 Saint-Petersburg Mining University, 2, 21st Line, Vasilievsky island, St. Petersburg, 199106, Russia

3 GEMOC Centre, Macquarie University, Sydney, Australia

Abstract. The mineral composition of diamond-bearing mantle xenolith, represented by two eclogites, from the kimberlite pipe Zarnitsa have been studied. The analysis of the oxygen isotope composition of garnets in eclogite from the Zarnitsa pipe indicates that diamond-bearing eclogites, or at least part of them, were formed during the subduction of the crustal protolith. A cathodoluminescence image of a diamond plate and precision determinations of $\delta^{13}\text{C}$ values from linear profiles clearly demonstrate the zonal two-stage growth of diamond in eclogite from the Zarnitsa pipe and indicate multi-stage growth of diamonds in this segment of the lithospheric mantle.

1. Введение

Несомненно, что мантийные алмазосодержащие ксенолиты важны для понимания условий алмазообразования, но и для расшифровки петрологических закономерностей протекания процессов в верхней мантии, в том числе мантийного метасоматоза с которым несомненно связано образование алмазов [1-4]. Парагенные ассоциации с алмазом в кимберлитах могут быть подразделены на три основных типа: а) ассоциация различных минералов, содержащихся в виде включений в кристаллах алмазов, б) минералы-сростки с алмазом, в) ксенолиты алмазосодержащих мантийных пород. Выделенные типы, в том или ином количестве обнаружены во всех кимберлитовых трубках с промышленным содержанием алмазов различных алмазоносных провинций. Эти образования всегда привлекали пристальное внимание исследователей, поскольку они содержат наиболее достоверные сведения об условиях формирования алмазов в природе и информацию об особенностях состава среды алмазообразования, т.е. петрологических особенностях верхней мантии данного района. С этой точки зрения, исследование минерального состава эклогитов с алмазами из трубки Зарница имеет первостепенное значение для понимания мантийных процессов. Это тем более важно учитывая то, что алмазосодержащие ксенолиты крайне редки. В частности, в кимберлитовой трубке Зарница, до настоящего времени не встречены образцы этого рода ксенолитов и вообще мантийные ксенолиты крайне редки и интенсивно изменены вторичными процессами [3]. В тоже время, как показано в работах [2-4], практически во всех промышленно обрабатываемых месторождениях Якутской алмазоносной провинции встречены мантийные ксенолиты с алмазами. Это трубки Мир, Интернациональная, Айхал, Комсомольская, Юбилейная, Удачная, Сытыканская, Нюрбинская и Ботуобинская. Представляемая публикация базируется на

результатах детальных исследований минералов в двух ксенолитах уникальных алмазоносных эклогитов из кимберлитовой трубки Зарница (обр. Ж-20 и Ж-39).

2. Геологическая характеристика, образцы и методы исследования

Первая открытая геологами кимберлитовая трубка в Западной Якутии – Зарница расположена в 14 км на восток от г. Удачного, на правом берегу р. Далдын. Трубка была обнаружена в 1954 г. геологами тематической партии № 26 Центральной экспедиции Л.А. Попугаевой, Н.Н. Сарсадских и рабочим Ф.А. Беликовым. Первоначально трубка считалась низкоалмазоносной, но после переопробования было принято решение о ее разработке. К промышленному освоению месторождения приступили в 2000 году. Отработку месторождения открытым способом планируется производить в течение 30 лет. По размерам (554x534 м) она занимает второе место после самой крупной в Якутской алмазоносной провинции трубки Юбилейная. Горизонтальные сечения трубки Зарница имеют почти правильную овально-округлую, близкую к изометричной форму. Ее площадь закономерно убывает с глубиной на 12-19 % через каждые 100 м. Форма вертикального сечения – коническая [3]. В связи с исключительно интенсивным постмагматическим изменением мантийных ксенолитов нам представляется целесообразным рассмотреть распространенность различных мантийных ассоциаций в кимберлитах этой трубки на основании присутствия в концентрате кимберлита гранатов различного состава, соответствующих различным мантийным парагенезисам, что проиллюстрировано на приведенной ниже диаграмме (Рисунок 1). На диаграмме также показано распределение гранатов согласно их составам, пересчитанным на кластерные группы (КГ) по классификации Даусона и Стефенсона [5]. Из выполненных построений очевидно преобладание пироксенит-перидотитовых ассоциаций, соответственно, ультраосновных КГ при достаточно высоком содержании (около 30 %) эклогитового субстрата.

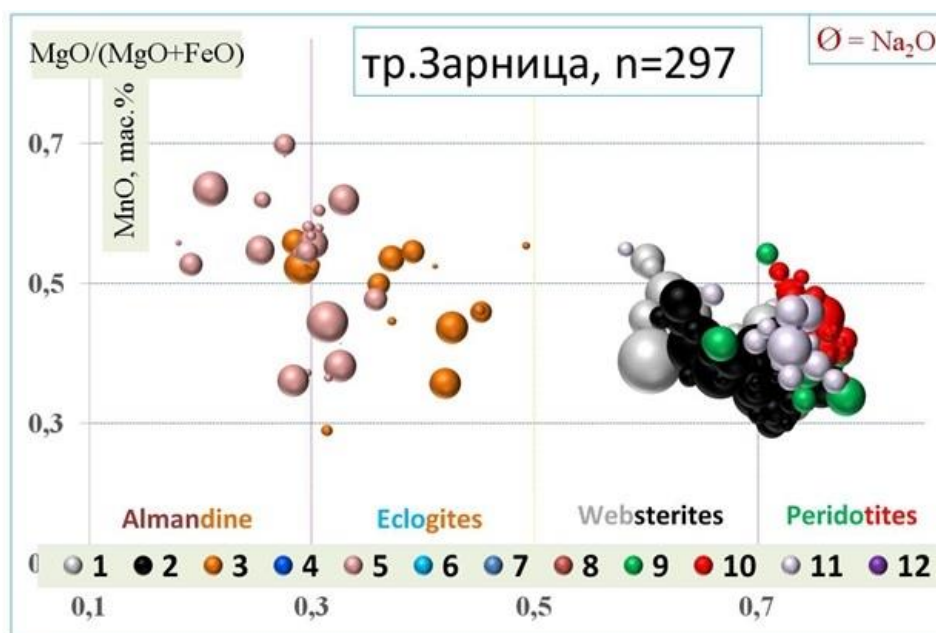


Рисунок 1 – Диаграмма распространенности различных мантийных ассоциаций и кластерных групп гранатов по [5] в кимберлитах трубки Зарница.

Обогащение кимберлитов и добыча алмазов из руды трубки Зарница осуществляется периодически на фабрике № 12, одновременно с кимберлитовой рудой трубки Удачная. В 2009 г. в ЦОДе фабрики № 12 был осуществлен специализированный отбор ксенолитов с алмазами в количестве 30 образцов ксенолитов округлой или овальной формы с визуально видимыми кристаллами алмаза с целью исследования минерального состава ксенолитов и физических свойств содержащихся в них алмазов. При детальном изучении петрографических

особенностей отобранной коллекции ксенолитов, среди них были обнаружены два образца эклогитов, которые по небольшим примазкам кимберлита и характеру вторичных изменений клинопироксена с уверенностью были отнесены к ксенолитам из кимберлитовой руды трубки Зарница (Рисунок 2, 3). Для сравнения ниже приведены фотоснимки двух образцов алмазосодержащих эклогитов из трубки Удачная (Рисунок 4), которые имеют другой облик и демонстрируют меньшую степень изменения не только гранатов, но и клинопироксенов.

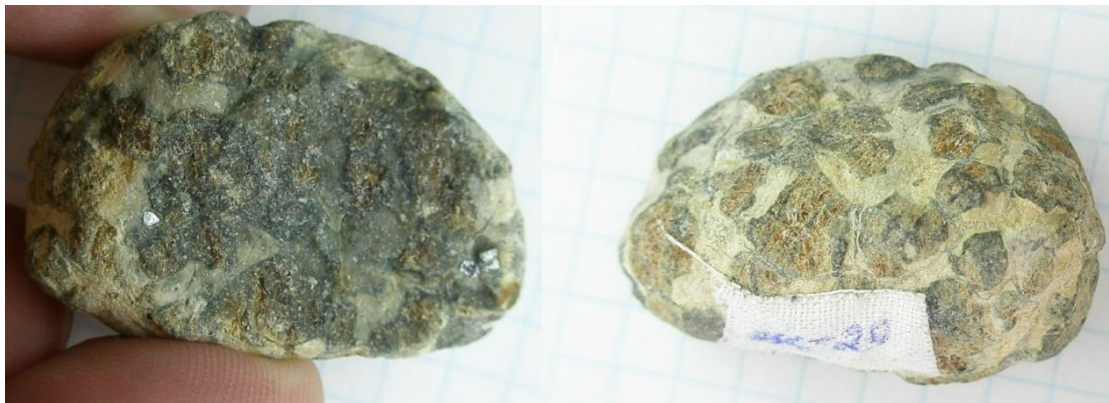


Рисунок 2 – Фотография ксенолита эклогита из трубки Зарница в двух ракурсах (обр. Ж-20).
На сколотой поверхности ксенолита (левый снимок) четко видны три кристалла алмазов.

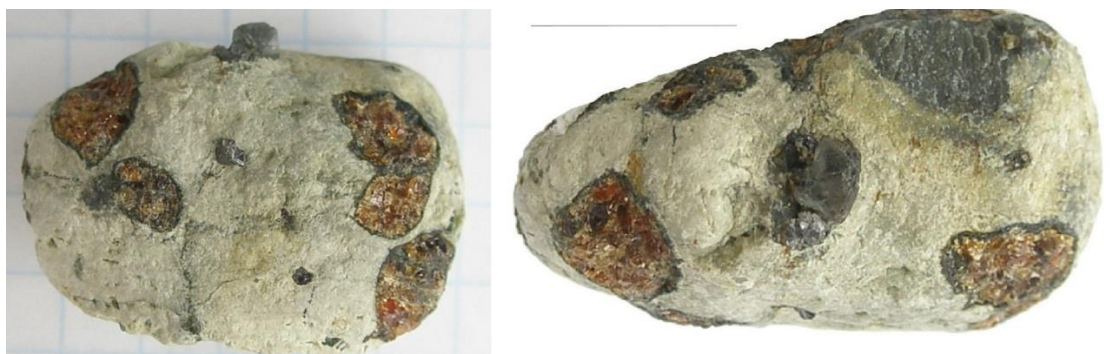


Рисунок 3 – Фотография ксенолита эклогита из трубки Зарница в двух ракурсах (обр. Ж-39).
На поверхностях ксенолита видно по два кристалла алмазов.



Рисунок 4 – Фотография двух эклогитов из трубки Удачная (обр. Уж-30 и Уж-5).
На поверхностях ксенолитов присутствует по два алмаза

Изученные ксенолиты эклогитов из трубки Зарница представлены крупнозернистыми породами, состоящими преимущественно из граната и интенсивно изменённого клинопироксена (см. Рисунок 2, 3). В качестве аксессуаров, в обоих образцах отмечены мелкие зернышки сульфидов и единичные зерна рутила. Образец Ж-20 размером 35x25x20 мм был представлен биминеральным эклогитом овальной формы, состоящим из оранжевого граната (размер зерен 3-5 мм) округлой формы – 55 об. %, и почти полностью измененного клинопироксена – 45%. Образец Ж-39 размером 30x20x10мм был представлен эклогитом удлиненной овальной формы, состоящим из оранжевого граната (размер зерен 3-6 мм) округлой формы – 35 об. % и измененного светло-зеленого клинопироксена – 65%, с его реликтами около 15%. Из образца Ж-20 было извлечено 15 кристаллов, из них 6 алмазов размером более 1мм, а из образца Ж-39 три алмаза, при этом один кристалл размерностью 2 грейнера. Не останавливаясь подробно на характеристике алмазов присутствующих в эклогитах, отметим только то, что в обоих образцах они были представлены полупрозрачными кристаллами серого цвета октаэдрического габитуса (см. Рисунок 2, 3).

Определение состава минералов ксенолитов осуществлялось с использованием микросонда JXA-8230 в стандартных условиях в НИГП АК «АЛРОСА», г. Мирный. При этом разрешающая способность составляла 133 eV, ускоряющее напряжение – 20 kV, ток зонда – 10 nA, диаметр пучка 1-2 мкм. В качестве стандартов использовались сертифицированные в ИГИГ СО РАН (г. Новосибирск) природные минералы. Редкие и примесные элементы в гранатах и клинопироксенах были определены в GEMOC центре Университета Маквори, Сидней, Австралия. Для определения изотопного состава кислорода граната использовалась масс-спектрометрия вторичных ионов (СИМС). Изотопный состав кислорода гранатов и углерода алмазов определялся на ионном микросонде 1270 (CAMECA) в Центре микроскопии и анализа, Университета Западной Австралии, г. Перт. Детальные процедуры выполнения анализов, установленные для CAMECA ims-4f, приведены в работах [4, 6].

3. Результаты исследований и обсуждение

Составы гранатов и клинопироксенов в ксенолитах эклогитов из трубки Зарница приведены в Таблице 1. Из представленных данных очевидно, что гранаты этих образцов существенно различаются по содержанию окислов Mg, Ca и Fe. Гранат из образца Ж-20 является пиропальмандином с высоким содержанием гроссулярового минала и согласно этим данным, эклогит Ж-20 отвечает высококальциевым эклогитам группы С. Для него характерно повышенное содержание окислов титана, хрома и натрия. Гранат из образца Ж-39 является альмандинпиропом с низким содержанием гроссулярового минала и согласно этим данным, эклогит Ж-39 отвечает магнезиально-железистым эклогитам группы В. Для него характерны низкие содержания окислов титана и хрома. Клинопироксены обоих образцов сходны по составу основных окислов, характеризуются высоким содержанием Na₂O (более 7 масс. %) и соответствуют типичным омфацитам. Для них характерны повышенные содержания окислов титана и калия.

Таблица 1 – Составы гранатов и клинопироксенов в ксенолитах эклогитов из трубки Зарница, масс. %

Sample	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	FeO	Total
G20-Gt	0,21	8,79	21,83	40,11	0,02	17,55	0,53	0,13	0,21	10,61	99,97
G39-Gt	0,19	12,90	21,73	40,45	0,01	6,15	0,33	0,02	0,31	17,96	100,05
G20-Cpx	7,44	6,04	15,88	55,72	0,18	9,86	0,32	0,11	0,01	1,93	97,49
G39-Cpx	7,02	8,57	11,66	56,39	0,25	11,37	0,44	0,06	0,05	3,97	99,77

Ниже, на рисунке (Рисунок 5), представлен снимок полированного шлифа фрагмента эклогита Ж-20 с зернами гранатов и профиль полученных анализов изотопного состава кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) через зерно частично измененного метасоматизированного граната и значений $\delta^{18}\text{O}$ в ряде

точек по отдельным зернам гранатов. Установленная достаточно широкая вариабельность значений $\delta^{18}\text{O}$ от 4,5 до 5,1‰ свидетельствует о возможности изменения изотопного состава кислорода гранатов в процессе мантийного метасоматоза. В целом низкие значения изотопного состава кислорода гранатов (ниже мантийных значений 5,1-6,0‰) в эклогите из трубки Зарница указывает на то, что алмазоносные эклогиты или по крайней мере часть из них сформированы в процессе субдукции корового субстрата.

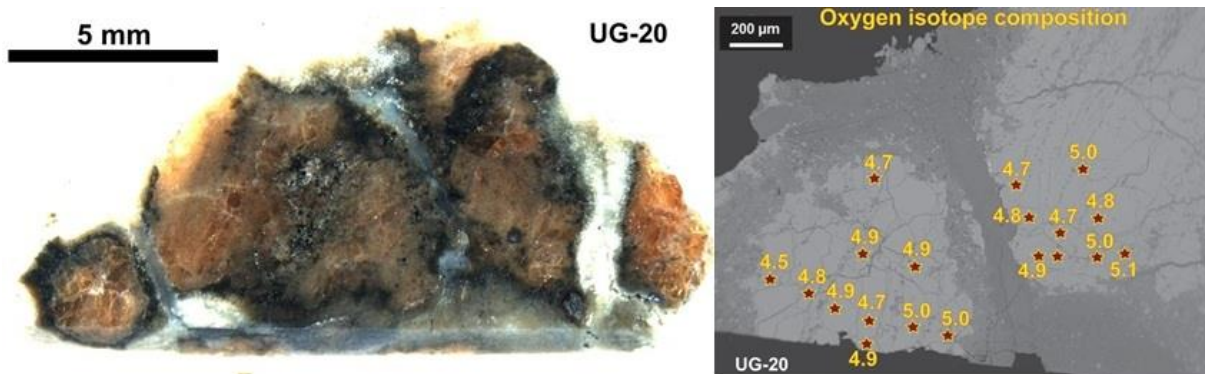


Рисунок 5 – Снимок полированного шлифа фрагмента эклогита Ж-20 с зернами гранатов и данные анализов $\delta^{18}\text{O}$ по профилю и отдельным зернам гранатов.

Помимо этого нами выполнен анализ изотопного состава углерода алмазной пластинки и получены линейные профили $\delta^{13}\text{C}$, демонстрирующие ярко выраженный двухэтапный рост зонального кристалла алмаза (Рисунок 6). При этом четко просматривается прерывистый рост кристалла, что подчеркивается растворением и корродированностью центрального ядра алмаза. Эти данные убедительно свидетельствуют о многостадийном росте алмазов в эклогитовом субстрате этого сегмента литосферной мантии.

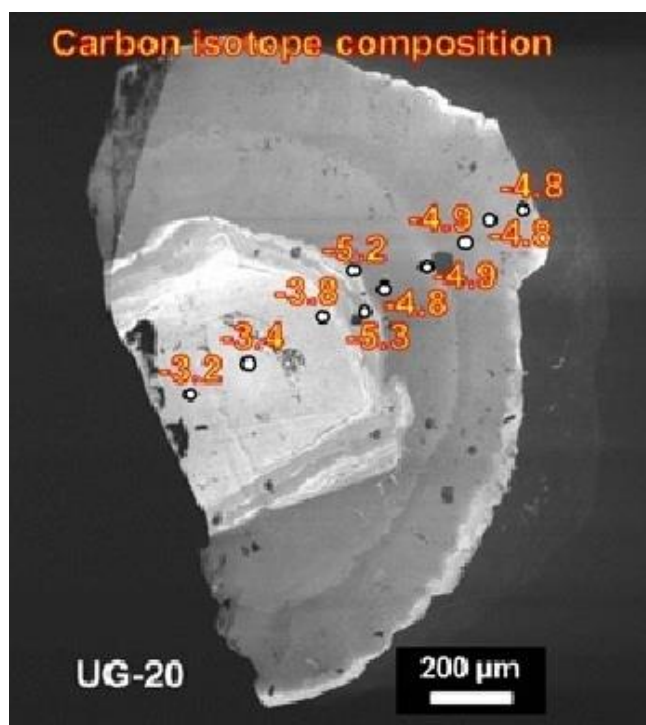


Рисунок 6 – Катодолуминесцентный снимок алмазной пластинки и линейные профили $\delta^{13}\text{C}$, демонстрирующие зональный рост алмаза (обр. Ж-20).

4. Заключение и выводы

* Полученные за последние годы сведения по включениям в алмазах однозначно свидетельствуют об образовании алмазов в различных мантийных средах, охватывающих, по меньшей мере, три типа пород, представленных ультраосновной, эклогитовой и пироксенитовой ассоциациями верхней мантии [1-4]. Менее определены и пока противоречивы данные о присутствия в кимберлитах алмазов из более глубоких зон Земли, представленных низами верхней мантии или, возможно, даже представителями нижней мантии [7].

* Приводимые результаты посвящены специфике алмазов и содержащих их мантийных ксенолитов эклогитового состава и подтверждают, что алмазосодержащие мантийные ксенолиты присутствуют во всех разрабатываемых коренных месторождениях алмазов Якутской кимберлитовой провинции. Это, в свою очередь, еще раз свидетельствует о ксеногенном характере алмазов в кимберлитах.

* Выполненный анализ изотопного состава кислорода гранатов в эклогите из трубки Зарница указывает на то, что алмазоносные эклогиты или по крайней мере часть из них сформированы в процессе субдукции корового протолита.

* Катодолюминесцентный снимок алмазной пластинки и прецизионные определения значений $\delta^{13}\text{C}$ по линейным профилям, однозначно демонстрируют зональный двухэтапный рост алмаза в эклогите из трубки Зарница и указывают на многостадийный рост алмазов в данном сегменте литосферной мантии.

5. Литература:

- [1] Thomassot, E., Cartigny, P., Harris, J.W., Lorand, J.P., Rollion-Bard, C., Chaussidon, M. Metasomatic diamond growth: A multi-isotope study ^{13}C , ^{15}N , ^{33}S , ^{34}S of sulphide inclusions and their host diamonds from Jwaneng (Botswana) // *Earth Planet Sci Lett*, 2009, vol. 282, p.79–90.
- [2] Spetsius, Z.V., Taylor, L.A. *Diamonds of Yakutia: Photographic Evidence for their Origin*. Tranquility Base Press, Lenoir City, Tennessee, USA, 2008, 278p.
- [3] Kostrovitsky, S.I., Spetsius, Z.V., Yakovlev, D.A., Fon-der-Flaas, G.S., Suvorova, L.F., Bogush, I.N. Atlas of primary diamond deposits of Yakutian kimberlite province. Edited by N.P. Pokhilenko. 2015, Mirny, MGT, 480p. (in Russian).
- [4] Spetsius, Z.V., Cliff, J., Griffin, W.L., O'Reilly, S.Y. Carbon isotopes of eclogite-hosted diamonds from the Nyurbinskaya kimberlite pipe, Yakutia: The metasomatic origin of diamonds // *Chem. Geol.*, 2016, vol. 455, p. 131-147.
- [5] Dawson, J.B. and Stephens, W.E. Statistical analysis of garnets from kimberlites and associated xenoliths // *J. Geol.*, 1975, vol. 83, p. 589-607.
- [6] Fitzsimons, I.C.W., Harte, B., Clark, R.M. SIMS stable isotope measurement: counting statistics and analytical precision // *Mineral. Mag.*, 2000, vol. 64 (1), p. 59–83.
- [7] Stachel, T., Aulbach, S., Harris, J.W. Mineral inclusions in lithospheric diamonds // *Rev. Mineral. Geochem.*, 2022, vol. 88, p. 307–392.

НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА ГЕОЛОГИЮ, ТЕХНОЛОГИЮ И ЭКОНОМИКУ НИОБИЙ-ИТТРИЙ-СКАНДИЕВЫХ РУД ТОМТОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Александр Толстов¹, Александр Лапин², Владимир Кузьмин³

¹ ФГБУН «Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева»,
630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3

² ФГБУ «Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов»,
121357, Россия, г. Москва, ул. Вересаева, 15

³ ФГБНУ «Институт химии и химической технологии СО РАН»,
660036, Россия, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50/24

A NEW LOOK AT THE GEOLOGY, TECHNOLOGY AND ECONOMICS OF NIOBIUM-YTTRIUM-SCANDIUM ORES OF THE TOMTOR DEPOSIT

Aleksandr Tolstov¹, Aleksandr Lapin², Vladimir Kuzmin³

1 Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3, Akademika Koptyuga ave.,
Novosibirsk, 630090, Russia

2 Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystallochemistry of Rare Elements,
15, Veresaeva str., Moscow, 121357, Russia

3 Institute of Chemistry and Chemical Technology,
50/24, Akademgorodok str., Krasnoyarsk, 660036, Russia

Abstract. Unique niobium-yttrium-scandium formations in epigenetically altered carbonatite weathering crusts are a new type of ores of niobium and rare earth elements (REE), identified in the Tomtor ore field in 1986, characterized by complexity and high concentrations of useful components. The ores form stratified deposits with an average thickness of about 10 m, lying under Jurassic and Permian deposits in the roof of a hypergenic complex, mainly at depths of 100 m. Minerals of the crandallite group (florencite, gojaccite, gorseisksite), monazite, pyrochlore, as well as minerals Ti and V. prevail in the composition of ores. The uniqueness lies in the fact that the useful components in them make up to 75% of the ore volume. The technology of hydrometallurgical ore processing has been developed, providing for the production of 10 final commercial products, including pyrochlore concentrate and REE carbonates. The task of improving the technology of ore conversion is urgent. There is a possibility of organizing a primary ore processing enterprise in Western Yakutia, which will have a positive impact on the economy of the entire Republic Sakha (Yakutia).

1. Введение

Массив ультраосновных щелочных пород и карбонатитов (УЩК) Томтор находится в центральной части Уджинского сводового поднятия. Комплексное Nb-REE оруденение, локализованное в рудоносных карбонатитах массива и их корах выветривания [1], выявлено геологами НИИГА в 1977 г. Первая информация о высоких концентрациях Nb и REE, приуроченных к массиву Томтор и сопредельной с ним с юга рудной зоне Чимаара, получена учеными ВНИИ Океангеология (НПО Севморгео) при проведении поисковых работ на алмазы, бокситы, фосфор и редкие металлы. В ряде поисково-картировочных скважин и горных выработок в пробах отмечались повышенные концентрации Nb₂O₅ и REE, локально достигавшие 1-3% [1, 2]. В ходе поисково-оценочных работ на ниобий, фосфор, редкие земли и алюминиевое сырье, выполненных в 1985–91 гг. ПГО Якутскгеология в центральной части массива Томтор, под перекрывающими юрскими морскими и пермскими терригенно-осадочными отложениями в образованиях гипергенного комплекса – латеритных корах выветривания карбонатитов – были подтверждены высокие концентрации Nb₂O₅ и REE, достигавшие 3-5% [1, 2].

Кроме того, в 1986 г в подошве пермских отложений были установлены уникальные ниобий-иттрий-скандиевые руды с ураганскими концентрациями Nb_2O_5 и REE, не имевшие мировых аналогов [2]. Впоследствии они были интерпретированы как переотложенные (эпигенетически измененные) коры выветривания карбонатитов, сформировавшиеся при переотложении и последовательном наложении окислительного и восстановительного процессов [3]. Дальнейшее опосредованное и оценка центральной части массива Томтор позволили очертить локальное проявление подобных руд, сосредоточенных в пределах Буранного участка, вовлеченного в разведку, увенчавшуюся постановкой в 1999 г запасов и ресурсов этих руд на Государственный баланс РФ [4]. Главной проблемой оценки руд нового типа является уникальная комплексность, вследствие которой оказалась невозможность извлечения отдельных полезных компонентов традиционными методами обогащения (гравитация, флотация). Это обусловило принятие за основу гидрометаллургической технологии переработки исходных руд [4, 5].

Таким образом, уникальные руды потребовали нового подхода к их оценке, разведке, технологическому переделу и, в конечном итоге, к освоению месторождения. Ранее этому были посвящены подробные исследования, результатом которых явились рекомендации по поэтапному вовлечению участка первоочередной отработки на участке Буранный [6]. Однако эта проблема по ряду причин оказалась актуальной и по сей день.

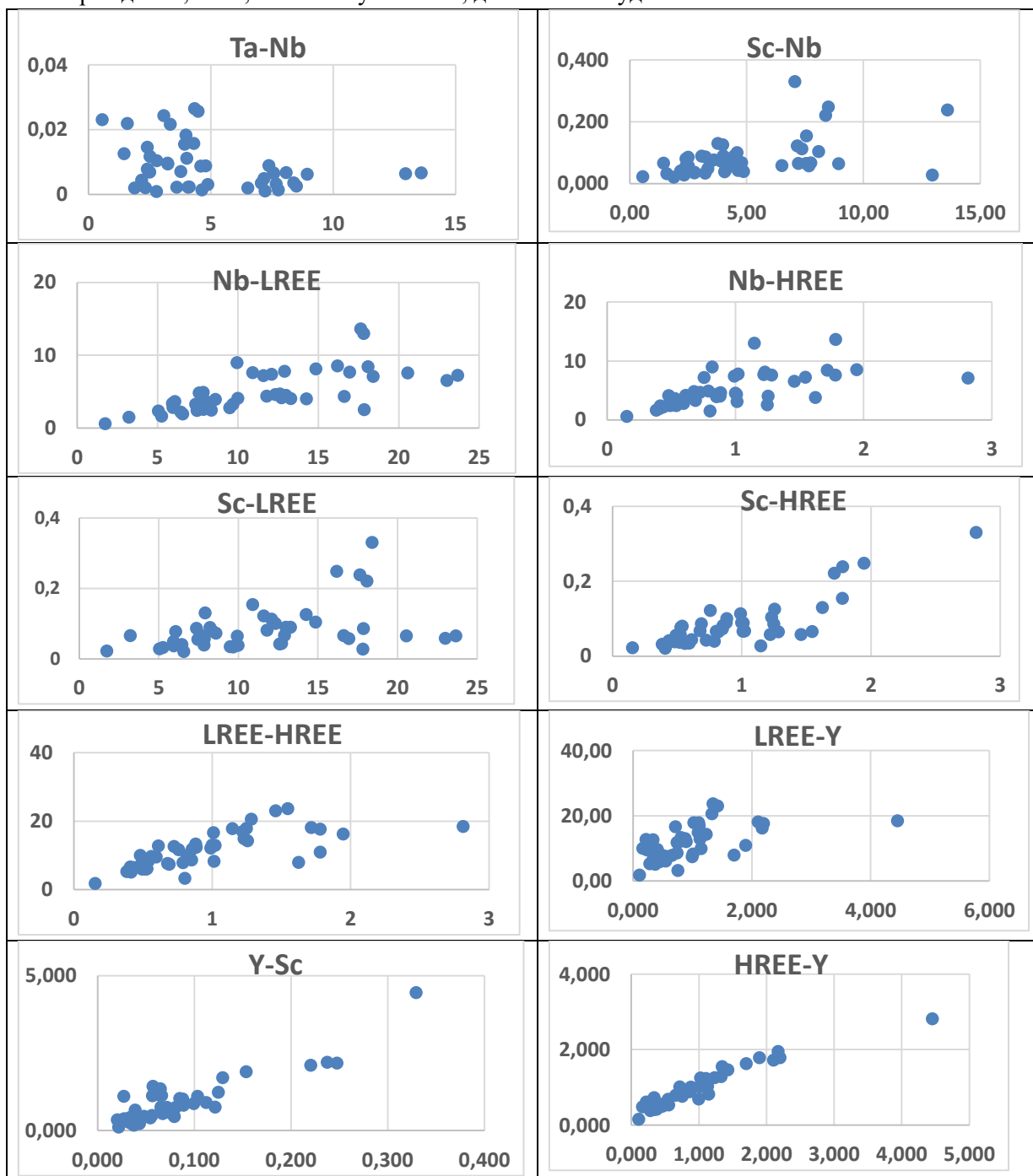
2. Уникально богатые Nb-Y-Sc руды – новый взгляд на геологию, технологию и экономику

Первые достоверные аналитические данные, свидетельствующие об аномальных концентрациях комплекса REE в пределах Томторского месторождения, были получены по пробе 5г, характеризующей 5-метровый интервал керна. Проба была отобрана из осветленного глинистого интервала на границе подошвы нижнепермских отложений и кровли латеритной коры выветривания в скважине №5649, пробуренной в марте 1986 г в центральной части массива Томтор. По результатам химического анализа, выполненного в ЦАЛ ПГО «Якутскгеология» химиком-аналитиком Т.Р. Забуга, были получены содержания Nb_2O_5 7,62%, а концентрация TR_2O_3 , определенная в Бронницкой экспедиции ИМГРЭ (г. Москва), превысила 39%. Эти руды геологически были задокументированы нами изначально как переотложенные эпигенетически измененные коры выветривания [2, 3]. Позднее, в пределах Томторского рудного поля были очерчены, помимо Буранного, еще два участка развития подобных эпигенетических руд с комплексным Nb-REE оруденением: Северный и Южный, на которых также выполнены поисково-оценочные работы (2015-18 гг, АО «Якутскгеология»). Актуальность оценки рудного поля на Nb_2O_5 и REE обусловлена продолжающимся дефицитом РЗМ в России ввиду отсутствия подготовленной минерально-сырьевой базы с эффективной технологией переработки руд.

После разведки Буранного участка в ИХХТ СО РАН (г. Красноярск) при участии ВИМС (г. Москва) были разработаны гидрометаллургическая технология переработки руды и технологический регламент; определены транспортно-логистические цепочки проектируемого предприятия с отработкой карьером участка первой очереди [4, 5], доставкой руды в контейнерах по зимнику до пристани Юрюнг Хая в устье р. Анабар и далее – водным транспортом по р. Енисей в г. Железногорск (Красноярск-26), где предусматривалась переработка исходной руды. Туда же была направлена заводская технологическая проба пироклор-монгацит-крандаллитовой руды весом 260 т, которая до сих пор по различным причинам так и осталась не обработанной. ТЭО кондиций разработано АО Сибцветниипроект (г. Красноярск) [6].

Однако за последние годы изменился подход к освоению месторождения. Владелец лицензии (ООО «Востокинжиниринг») после доразведки Буранного участка, поставил на баланс дополнительные объемы руд, существенно увеличив их общие запасы. Однако главная проблема – эффективная технология переработки руды и получения конечных продуктов до

сих пор не решена, как не решены и транспортно-логистические вопросы, поскольку предложенные варианты вызывают сомнения. Актуализации вопросов геологии, технологии и экономики уникальных руд Томторского месторождения посвящены настоящие исследования. При завершении разведки Буранного участка на его западном фланге были обнаружены руды со следующими параметрами: Sc_2O_3 до 0,3% и Y_2O_3 до 4%, при весьма высоких концентрациях Ta_2O_5 (на уровне 10-15%) и Nb_2O_5 (8-10%). Эти руды (Рисунок 1), вскрытые ранее тремя скважинами (5655, 5755 и 5855), пройденными через 100 м, вскрывшие выдержанный пласт мощностью 10 м на глубине 25-30 м, образуют отдельный блок руды объемом не менее 1 млн т. Именно они, вследствие уникальных параметров рудоносности, могли бы стать первоочередным объектом опытно-промышленной отработки на первом этапе освоения месторождения, и им, по нашему мнению, должно быть уделено особое внимание.



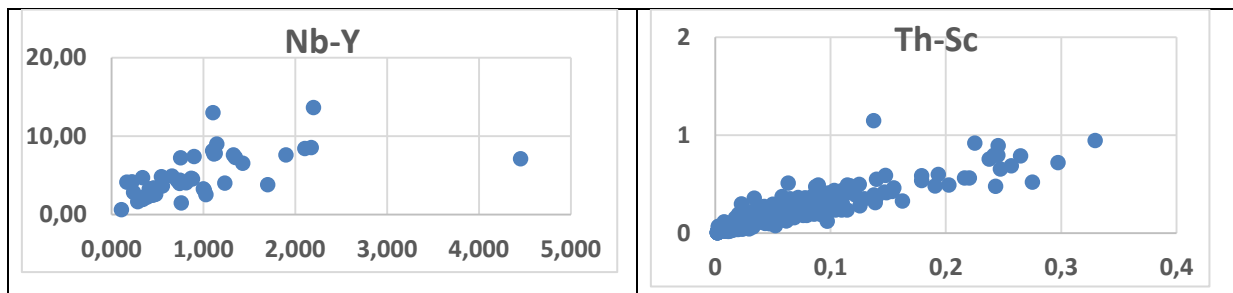


Рисунок 1 – Бинарные диаграммы состава уникальных Nb-Y-Sc-REE руд (уч. Буранный)

В вещественном составе руд обращает на себя внимание сложная связь Nb с Ta (рис.1), поскольку Ta в рудах, по предварительным данным, связан, преимущественно, с колумбитом [8, 9], который, в свою очередь, присутствует в качестве акцессорного минерала, распространен не закономерно и встречается спорадически. Nb же представлен пирохлором, в различной степени измененным. Поэтому максимальные концентрации Ta не связаны с максимальными – Nb. Тем не менее, в рудах отмечены достаточно высокие концентрации Ta (на уровне 0,015-0,025%), на что также следует обратить внимание при дальнейших исследованиях. Подобная сложная связь в рудах наблюдается у Nb и Sc, и обусловлена она, прежде всего, различными минеральными формами этих элементов, которые в данных рудах лишь совпали пространственно, благодаря наложению одинаковых рудоконцентрирующих процессов и отражает лишь тенденцию, которую можно наблюдать также и в связи Nb с LREE и HREE.

В то же время достаточно интересна корреляция Sc с REE, причем, если с тяжелыми REE (HREE) она очевидна и закономерна, то с легкими цериевыми лантаноидами (LREE) она при той же общей тенденции не столь однозначна, равно как и связь LREE с HREE, связь LREE – с Y и связь Y с Nb. Более уверенная положительная связь в этих рудах прослеживается у Y со Sc и HREE, а также у Sc с Th, что отчасти объясняется их общими минеральными формами в рудах.

Подобные уникальные руды, выявленные в пределах Томторского рудного поля впервые в мире, представляют собой природный пирохлор-монацитовый концентрат со значимым количеством минералов группы крандаллита (гояцитом, горсейкситом и флоренситом), рутила, лимонита и сидерита. Следует отметить, что их вещественный состав достаточно полно изучен ранее учеными ИМГРЭ, ВИМС и ИГМ СО РАН [2, 5, 8], однако выделенный западный блок Буранного участка значительно отличается от изученных весьма высокими концентрациями (в 1,5-2 раза даже по сравнению с уникальными средними значениями) всех полезных компонентов (в первую очередь, это касается Y, Sc и HREE), и в настоящее время он является предметом их дальнейшего тщательного изучения. Средний химический состав уникальных руд приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Состав Nb-Y-Sc пирохлор-монацит-крандаллитовых руд (среднее из 45 ан)

Эл-т	Y ₂ O ₃	∑HREO	∑LREO	Nb ₂ O ₅	Ta ₂ O ₅	Sc ₂ O ₃	ZrO ₂	U ₃ O ₈	V ₂ O ₅	TiO ₂	Er	Tm	Yb	Lu
Сод-е, %	0,926	0,935	11,219	4,877	0,009	0,083	0,212	0,012	1,379	8,629	0,078	0,011	0,067	0,067

Zr	Th	Fe	Mn	Sr	Ba	Ca	Si	K	Na	Mg	Cr	Cu	Zn	Pb
0,212	0,281	7,667	0,165	3,766	2,669	7,009	2,831	0,111	0,196	0,118	0,064	0,006	0,281	0,316

Анализы выполнены в АСИЦ ВИМС, г. Москва и характеризуют рудный интервал 105 м.

Технологические исследования, выполненные по уникальным рудам, подтвердили невозможность получения кондиционных концентратов механическими методами (гравитация, флотация), что предопределило постановку в голове процесса операцию

гидрометаллургической переработки [4, 7, 9, 10]. Разработанная схема предусматривает щелочное вскрытие исходной руды, последующее сульфатное разложение кека и экстракцию раствора с получением в товарную продукцию оксидов редких элементов: Nb, Sc, Y, Ce, La, Pr, Nd, Sm, Eu, а также Ti.

Существую и другие схемы обработки руды, однако щелочная технология оказалась более эффективной, поскольку в процессе щелочной алюминатный раствор, соединения Ba и Sr, HCl, AlCl₃ и Na₃PO₄ также относятся к продуктам производства, поскольку они участвуют в технологическом процессе. Таким образом, технологической схемой достигается комплексное, максимально полное использование этого типа руд, в результате чего в полезную переработку вовлекается до 75% компонентов руды. При этом отпадает принципиальная необходимость предварительного обогащения руды. Согласно технологическому регламенту, разработанному ИХХТ СО РАН, из руды предусматривается получение 10 продуктов (таблица 2).

Таблица 2 – Товарная продукция, получаемая из Nb-Sc-Y руд по технологическому регламенту

-технический Nb ₂ O ₅ , 95%, НБО-М, ГОСТ 23620-79;	-диоксид титана (пигментного), 99,9%;
-оксид скандия, 99,9%, ТУ 95.148-77;	-оксид европия, 99,99% ОСТ 48-199-81;
-оксид церия, 99,9% ОСТ 48-195-81;	-оксид неодима, 99,9% ОСТ 48-197-81;
-оксид иттрия, 99,9% ОСТ 18-208-81;	-оксид самария, 96%;
-оксид лантана, 99,99%;	-оксид празеодима, 96%.

Позже в ИХХТ СО РАН были продолжены исследования, расширяющие линейку до 20 товарных продуктов, включая индивидуальные РЗЭ – тяжелые лантаноиды [7]. В настоящее время в ИХХТ СО РАН продолжают исследования по оптимизации технологии обогащения уникальных руд с разработкой возможных вариантов вскрытия исходной руды. При разрабатываемых новых вариантах первичного вскрытия исходной руды показана возможность использования простых реагентов, таких, как соль (NaCl), щелочь (NaOH) и соляная кислота (HCl). В результате взаимодействия с рудой соединения не образуют токсичных отходов, поскольку в процессе они регенерируются электрохимическим методом и используются повторно с формированием замкнутого цикла. После обработки руды разбавленным раствором щелочи – (NaOH) в смеси с соевым раствором (NaCl) дальнейшая обработка проводится разбавленной HCl смеси с NaCl. Затем растворы выщелачивания объединяют, и при этом образуются отходы (отвальные продукты) и раствор NaCl, направляемый на мембранную электрохимическую регенерацию с получением разбавленной NaOH и раствора NaCl, которые повторно направляют на химическое обогащение новой порции руды. В результате первичного обогащения исходной руды получают Nb-REE концентрат (65% от первичного объема руды), содержащий оксиды Nb и Ti по 11% каждый и оксиды РЗЭ 25%, а также оксидно-фосфатный кек (отвальный продукт), составляющий около 35% от первичного объема руды. Таким образом, достигается значительное сокращение исходной руды на 35% и получение промпродукта – Ti-Nb-REE концентрата для дальнейшей щелочной обработки 45%-ной щелочью (NaOH). Эта операция позволяет получить кек с содержанием TiO₂ и Nb₂O₅ по 12-13% и TR₂O₃ около 32%.

Следующий этап – кислотное растворение кека и получение кондиционного пироклорового концентрата, содержащего Nb₂O₅ 42% при соблюдении нормативных лимитов по другим элементам. Ориентировочный расход реагентов на 1 тонну исходной руды составит 1,95 т, в том числе: гидроксид натрия – 0,45 т; соляная кислота (31%) – 1,3 т; сода – 0,2 т. Это позволяет получить с 1 т руды товарную продукцию в объеме 0,420 т, в том числе кондиционный пироклоровый концентрат (42% Nb₂O₅ по ТУ 48-0506-1—74) объемом 0,170 т и карбонаты РЗМ объемом 0,250 т. Данная схема в настоящее время интенсивно совершенствуется и в ближайшее время может быть окончательно завершена и запатентована.

Включение данной схемы в цепочку отработки месторождения позволит значительно сократить издержки предприятия из-за упрощения транспортно-логистических схем руды на первом

этапе. Так, для обеспечения минимальной потребности Российской Федерации в Nb-TR продукции в рамках импортозамещения на современном уровне необходимо около 5000 т карбонатов РЗМ и 3400 т пироклорового концентрата, что потребует создания на базе Томторского месторождения опытно-промышленного участка с минимальной производительностью 20 тыс.т руды в год с возможностью последующего наращивания объемов добываемой руды до 30– 50 тыс.т. При подобных объемах отработки месторождения по Nb и REE блока уникальных руд достаточно на ближайшие 20 лет. Тем более, что имеющихся запасов участка месторождения даже при увеличении производительности в несколько раз достаточно на длительный период [4, 7, 10].

Не менее важным при проектировании горнодобывающего предприятия по отработке месторождения является и то обстоятельство, что разрабатываемая технология обогащения руды позволяет проектировать предприятие по первичной переработке исходной руды на базе существующей региональной инфраструктуры. Она позволяет использовать имеющиеся в Западной Якутии и высвобождающиеся мощности действующих крупных горнодобывающих предприятий. Возможность организации исходной переработки руды с доведением до конечной товарной продукции первого передела – кондиционного пироклорового концентрата, пригодного для производства феррониобия, а также коллективного карбоната РЗМ, предназначенного для извлечения индивидуальных РЗМ, в зависимости от ликвидности каждого из них, и продукции на их основе более высоких порядков с дополнительной добавленной стоимостью, несомненно весьма положительно отразится не только на экономике Республики Саха (Якутия), а также сопредельных субъектов РФ, что должно быть подтверждено экономическими расчетами [7].

3. Выводы

Уникальные Nb-Y-Sc руды в переотложенных (эпигенетически измененных) корях выветривания карбонатитов образуют пластовые залежи мощностью около 10 м, перекрытые юрскими морскими и пермскими терригенными отложениями до 100 м. В составе руд преобладают минералы группы крандаллита (флоренсит, гоэцит, горсейскит), монацит, пироклор, минералы титана и ванадия. Уникальность руд заключается их комплексности, благодаря которой полезные компоненты составляют до 75% объема руды.

Усовершенствована разработанная технология гидрометаллургической переработки исходной руды, предусматривающая получение согласно технологическому регламенту 10 конечных товарных продуктов, включая пироклоровый концентрат и коллективный карбонатный концентрат РЗЭ. Возможность и гибкость схемы позволяет довести количество конечных продуктов до 20, включая индивидуальные РЗМ и продукцию более высокого передела.

Дальнейшее совершенствование технологии передела руд позволяет организовать предприятие по переработке первичной обработки руды непосредственно в Западной Якутии, что благоприятно отразится на экономике всей Республики Саха [7, 10].

4. Благодарности

Работа выполнена за счет гранта РНФ 23-63-10017 ИГМ СО РАН им. В.С. Соболева.

5. Литература:

- [1] Entin A.R., Zaitsev A.I., Nenashev N.I., Vasilenko V.B., Orlov A.I., Tyan O.A., Olkhovik Yu.A., Olshtynsky S.I., Tolstov A.V. On the sequence of geological events associated with the introduction of the Tomtor massif of ultrabasic alkaline rocks and carbonatites (Northwestern Yakutia) // *Geology and geophysics*. 1990. Vol. 31. No.12. pp. 42-51. (In Russian).
- [2] Kravchenko S.M., Belyakov A.Yu., Kubyshev A.I., Tolstov A.V. Scandium-rare earth-yttrium-niobium ores are a new type of rare metal raw materials. *Geology of ore deposits*. 1990. Vol. 32. No. 1. pp. 105-109. (In Russian).

- [3] Lapin A.V., Tolstov A.V. Oxidative and reducing stages of formation of the hypergenesis zone of carbonatites and their ore-bearing capacity // *Geology of ore deposits*. 1991. Vol. 33. No. 4. pp. 81-91. (In Russian).
- [4] Tolstov A.V., Gunin A.P. Comprehensive assessment of the Tomtor deposit // *Bulletin of the Voronezh State University. Series: Geology*. 2001. No. 11. pp. 144-160. (In Russian).
- [5] Lapin A.V., Tolstov A.V. Minerageny of carbonatite weathering crust / *Methodological guide / Ser. A series of methodological manuals on forecasting and prospecting for mineral deposits in the regional geological study of the subsurface*. Moscow. GEOS. 2011. 308 p. (In Russian).
- [6] Pokhilenko N.P., Kryukov V.A., Tolstov A.V., Samsonov N.Y. Tomtor as a priority investment project to provide Russia with its own source of rare earth elements. *ECO*. 2014. No. 2 (476). pp. 22-35. (In Russian).
- [7] Tolstov A.V., Samsonov N.Y. Tomtor: geology, technologies, economics // *ECO*. 2014. No. 2 (476). pp. 36-44. (In Russian).
- [8] Lazareva E.V., Zhmodik S.M., Tolstov A.V., Shcherbov B.L., Karmanov N.S., Dobretsov N.L., Gerasimov E.Y., Bryanskaya A.V. Main Minerals of abnormally high-grade Ores of the Tomtor deposit (Arctic Siberia) *Russian Geology and Geophysics*. 2015. T. 56. № 6. C. 844-873.
- [9] Lapin A.V., Kulikova I.M., Tolstov A.V. Distribution of REE, Y, Sc, and Th in the Unique complex rare-metal ores of the Tomtor deposit // *Geochemistry International*. 2016. T. 54. № 12. C. 1061-1078.
- [10] Tolstov A.V., Pokhilenko N.P., Samsonov N.Yu. New possibilities for obtaining rare earth elements from a single Arctic raw material source // *Journal of the Siberian Federal University. Series: Chemistry*. 2017. Vol. 10. No. 1. pp. 125-138.

МАРГАНЕЦ ТОМТОРСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ

Александр Толстов¹, Александр Лапин², Афанасий Слепцов³

- 1 ФГБУН «Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3
- 2 ФГБУ «Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов», 121357, Россия, г. Москва, ул. Вересаева, 15
- 3 ООО «Геовектор», 677000, Россия, г. Якутск, ул. Кулаковского, 12

MANGANESE OF THE TOMTOR ORE FIELD

Aleksandr Tolstov^{1,4}, Aleksandr Lapin², Afanasy Sleptsov³

- 1 Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3, Akademika Koptyuga ave., Novosibirsk, 630090, Russia
- 2 Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystallochemistry of Rare Elements, 15, Veresaeva str., Moscow, 121357, Russia
- 3 Geovector LLC, 12, Kulakovskogo str., Yakutsk, 677000, Russia

Abstract. Within the Tomtor ore field, the prospects of detecting significant manganese resources at high concentrations in a hypergenic complex under layers of unique niobium-rare earth ores. The formation deposits of manganese ores are confined to the limonite horizon of the laterite crust of carbonatite weathering. The ore composition is predominantly oxide (pyrolusite-psilomelan-groutite) with signs of widespread carbonation (with siderite, oligonite and rhodochrosite). The estimated resources of manganese oxide only within the limits of only one Northern section exceed 17 million tons. Further prospecting for manganese of this deposit, as well as the Southern and Buranny sections, followed by exploration of the most ore-bearing allocated areas, according to preliminary data, will increase manganese resources within the Tomtor ore field to 100 million tons with MnO contents of about 15-20%.

1. Введение

Томторское рудное поле приурочено к одноименному массиву ультраосновных щелочных пород и карбонатитов (УЩК). Массив Томтор расположен в центральной части Уджинского сводового поднятия. Комплексное железо-фосфорное оруденение в пределах массива Томтор выявлено в 1977 г геологами НПО «Севморгео» при проведении поисковых работ на алмазы, бокситы, фосфор и редкие металлы [1]. Последующие поисково-оценочные работы проводились в центральной части массива в 1985–1991 гг. на Nb, P, REE и Al ПГО Якутскгеология, в результате чего подтверждено наличие уникального Nb-REE, Fe и P оруденения в латеритных Fe-P корах выветривания [2]. Были изучены подстилающие коренные породы (кальцитовые, доломит-кальцитовые, полиминеральные редкометальные, фосфорно-редкометальные карбонатиты) и апатит-магнетитовые руды в фоскоритах [2]. Выделены рудоносные полиминеральные и анкеритовые карбонатиты и залегающие на них рудные горизонты гипергенного комплекса [3].

В 1986 г в кровле коры выветривания под пермскими терригенными отложениями были вскрыты уникально богатые Nb-REE руды [1,3], классифицированные как эпигенетически измененные коры выветривания карбонатитов [1]. Они явились объектом поисково-оценочных и разведочных работ [3]. Помимо Буранного участка, в пределах карбонатитового ядра массива оконтурены еще два участка с подобными рудами: Северный и Южный. В 2015-18 гг на них были проведены поисково-оценочные работы силами (АО «Якутскгеология»), подтвердившие значительные ресурсы Nb и REE при уникальных концентрациях [4].

2. Марганцевое оруденение в пределах Томторского рудного поля

Марганец входит в Перечень основных видов стратегического минерального сырья в Российской Федерации, утвержденный распоряжением Правительства Российской Федерации № 50-Р от 16.01.1996 г. Суммарные мировые запасы Mn руд превышают 250 млн.т., однако, попытки выявления месторождений Mn в России, не увенчались успехом, в результате чего в нашей стране все Mn-содержащие объекты содержат бедные труднообогатимые руды низкого качества. Это обусловило ежегодный импорт товарных марганцевых руд в объемах 1 млн.т., а также Mn-ферросплавов около 200 тыс.т. и металлического Mn 60 тыс.т. Этим обоснована актуальность оценки Томторского рудного поля на марганцевое оруденение [6].

В ходе выполнения поисково-оценочных работ, в 1985–90 гг. в латеритных корах выветривания в пределах Северного участка массива Томтор (Рисунок 1) были отмечены повышенные концентрации марганца (Табл. 1). Скважина D1 НПО «Севморгео», продублированная позже ПГО Якутскгеология под №3565, показала содержания MnO, превышающие 20%. Последующие работы на участках Северный и Южный (2015–18 гг), подтвердили эти результаты. В поисковых и разведочных пробах зачастую отмечались концентрации MnO 10-25% на значительные интервалы 13-110 м (табл. 1), однако специализированных геолого-минералогических, лабораторно-аналитических и минералого-технологических исследований на Mn не было [5].

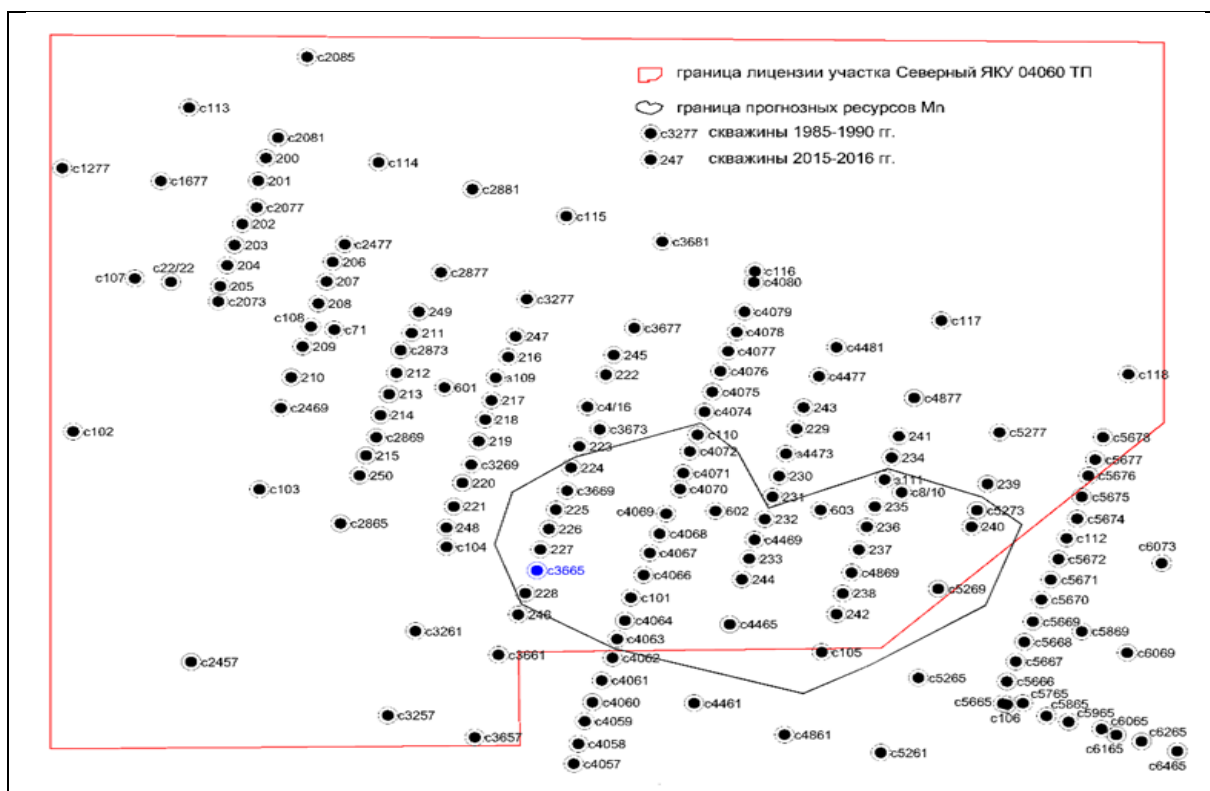


Рисунок 1 – Прогнозная схема марганцевого оруденения в пределах Северного участка Томторского рудного поля [10].

Таблица 1 – Распределение марганца в скважинах участка Северный Томторского рудного поля (латеритные коры выветривания)

№ скважины	Мощность, м	Содержание MnO в %
101	28.4	11.71
105	110	13.75
108	40	10.58
111	13	12.25
3665	30	22.57
4465	70	12.72

Среднее по скважинам	48.6	12.83
----------------------	------	-------

Первая прогнозная оценка ресурсов марганцевых руд Томторского рудного поля, выполненная на базе результатов ПГО и АО Якутскгеология, показала, что в пределах только одного участка Северный залежи марганцевых руд в латеритных кор выветривания имеют мощность около 50 м и распространены на площади свыше 1,5 км² (Рисунок 1). Прогнозные ресурсы на этом участке превышают 17 млн.т. MnO (табл. 2).

Таблица 2 – Прогнозные ресурсы MnO в латеритных корках выветривания участка Северный Томторского рудного поля

Площадь рудоносного участка, тыс. м ²	Средняя мощность руд, м	Объём руды млн. м ³	Удельный вес руды, т/м ³	Объём руды, млн. т	Среднее сод-е MnO в руде, %	Ресурсы MnO, млн. т
1550.6	23	35.7	3.8	135.5	12.83	17.4

Источником марганца в латеритных корках выветривания, как и разобщенных с ними уникальных Nb-REE рудах являются породы УЩК комплекса [5,6]. Наиболее высокие концентрации MnO – 3,0-3,2% отмечены в образованиях редкометальной подгруппы (в 2-2,5 раза выше по сравнению со всеми другими комплексами (табл. 1), что позволяет рассматривать эти образования в качестве коренных пород Mn оруденения в пределах Томторского рудного поля [6].

Таблица 3 – Средние химические составы пород массива Томтор, масс.% [по 3]

Породы, к-во анализов	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	CO ₂	H ₂ O	Σ	Nb ₂ O ₅
Комплекс силикатных пород															
Фойдолиты, n=20	35,81	2,37	17,93	5,61	2,15	0,16	4,66	13,06	3,38	7,65	0,84	н/о	5,44	99,06	0,03
Сиениты, n=14	51,90	0,79	21,75	3,12	3,06	0,17	1,45	1,11	11,45	1,06	0,34	"	3,82	100,02	0,03
Альнеиты, n=20	30,97	2,96	8,12	6,85	5,24	0,27	14,01	14,33	3,19	0,87	1,38	н/о	94,13	0,04	
Пикриты, n=10	26,80	2,67	5,31	8,45	4,77	0,33	15,48	14,64	2,77	0,66	1,17	"	"	83,05	0,04
Карбонатитовый комплекс															
Карбонатиты, n=335	7,06	0,69	1,54	3,62	4,15	1,49	5,28	36,28	1,07	0,17	2,87	32,26	н/о	96,48	0,18
Камафориты (валовая проба)	4,00	4,15	1,36	47,35	26,48	1,05	1,14	1,75	0,32	0,40	0,80	н/о	0,22	89,02	0,06
Безрудная группа															
Кальцит-микроклин-слюдистые породы, n=87	29,39	3,04	8,20	5,88	6,80	0,76	6,24	13,28	6,46	0,28	2,59	13,95	н/о	96,87	0,05
Карбонатиты безрудные, n=103	7,89	0,77	2,08	3,34	4,23	1,32	6,17	35,08	1,06	0,16	1,62	33,62	"	97,34	0,09
Рудная группа															
Фосфорно-редкометальная подгруппа															
Апатит-микроклин-слюдистые породы, n=143	28,24	3,43	9,58	8,89	10,54	1,41	5,44	9,30	5,08	0,21	5,58	5,71	н/о	93,41	0,18
Карбонатиты фосфорно-редкометальные,	6,10	0,47	1,17	3,64	3,36	1,26	4,17	39,22	0,90	0,17	3,87	32,43	"	96,76	0,21

n=194															
	Редкометалльная подгруппа														
Анкерит-шамозитовые породы, n=29	14,40	2,20	4,07	17,23	9,72	3,22	3,98	16,14	0,86	0,14	3,81	13,98	"	89,75	0,33
Карбонатиты редкометалльные, n=37	9,90	1,54	2,00	3,87	8,07	3,20	8,75	24,22	2,08	0,17	1,13	27,71	"	92,64	0,19
	Эксплозивные брекчии														
Эксплозивные брекчии, n=20	14,83	3,90	14,01	5,44	16,82	1,41	0,53	7,43	1,28	0,15	11,28	8,22	"	85,30	1,15

Анализы выполнены в ЦАЛ ПГО Якутскгеология, химик-аналитик Забуга Т.Р.

Гипергенез по породам карбонатитового и силикатного комплексов массива Томтор вследствие неоднородности их строения и гетерогенности состава развивался неодинаково. Наиболее интенсивно подвергались гипергенным изменениям полиминеральные рудоносные карбонатиты, обогащенные фосфатами и сульфидами, как наиболее разнородные эндогенные образования. На первой стадии гипергенного преобразования карбонатитов в коре выветривания образовались два горизонта – нижний (фосфатный) и верхний (оксидный). Характерными конечными продуктами нижнего горизонта являются фосфаты (карбонат-апатит – франколит), для верхнего – оксиды Fe и Mn (гетит, гидрогетит, пиролюзит, псиломелан, гроутит).

Близость химических свойств Mn с Fe определяет сходство их геохимического поведения в гипергенном процессе при выветривании карбонатитов; в окислительных условиях поверхностного выветривания Mn, так же, как и Fe, легко гидролизуется и накапливается, занимая доминирующее положение в остаточных охристых Fe-Mn продуктах.

Fe и Mn присутствуют в остаточных продуктах в самостоятельных минеральных формах (Fe – в форме гётита, гидрогётита и гематита, Mn – в форме собственных минералов – псиломелан, пиролюзит, гроутит, голландит, рамселлит и др.). Нередко на локальных участках латеритного профиля выветривания обнаруживается обратная тенденция их распределения (Рис. 3). Распределение Mn в остаточных охристых продуктах выветривания карбонатитов массива Томтор во многих случаях прямо коррелируется с распределением бария, что может указывать на преобладающую роль в породах единой минеральной формы этих компонентов.

Для прогнозирования потенциально промышленного марганцевого оруденения в пределах Томторского рудного поля наиболее перспективна верхняя часть латеритных кор выветривания, развитая по марганцесодержащим анкеритовым карбонатитам и анкерит-шамозитовым породам, залегающая непосредственно под пластом уникальных пирохлор-монацит-крандаллитовых руд в пределах границы Северного и Буранного участков. Анализ имеющихся результатов показывает наличие неопровержимых данных о более широком размахе марганцевого оруденения на этих участках, поскольку большая часть мелких скважин, пройденных для разведки богатых руд, просто не вскрыли обогащенные марганцем пласты (Рисунок 2). Об этом свидетельствуют концентрации MnO в последних призабойных пробах на уровне 20%.

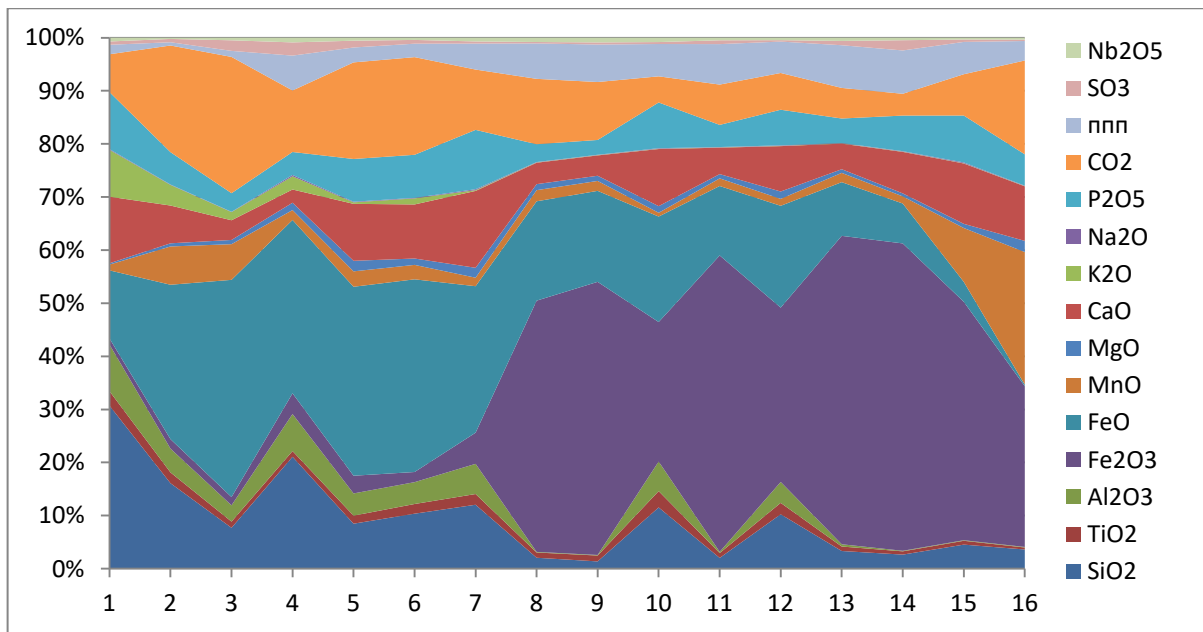


Рисунок 2 – Положение марганцевого оруденения по скважине 5652 (Северный участок)

Залегание марганцевых руд в лимонитовом горизонте коры выветривания, как правило, субгоризонтальное, пластовое или линзовидное (Рисунок 3). Судя по скважинам, вскрывшим обогащенные марганцевые интервалы (Табл. 2), средняя мощность обогащенных пластов составляет не менее 25 метров.

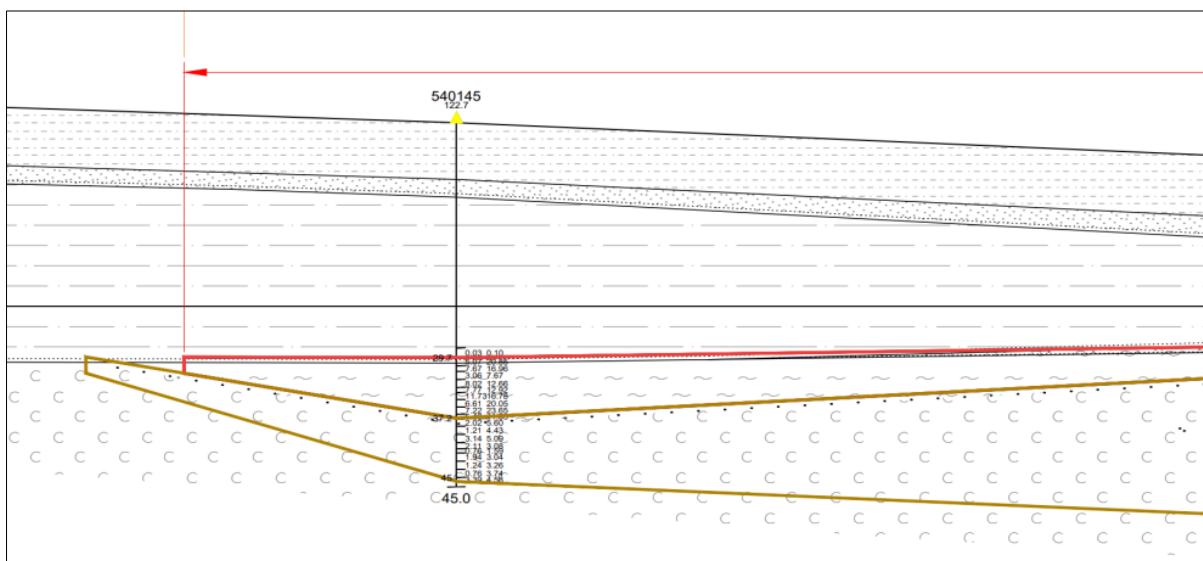


Рисунок 3 – Фрагмент разреза кровли коры выветривания (западная часть участка Буранный).
Анализы проб на Fe и Mn под рудным пластом, приведены на диаграмме (рис. 4).

Приведенная информация позволяет ставить вопрос о безотлагательной постановки поисково-оценочных и разведочных работ на выделенной площади с детальным изучением геологии, вещественного состава и технологии обогащения марганцевых руд для своевременного комплексного освоения Томторского рудного поля.

Опробованные подошвенные части, залегающие непосредственно под уникально богатыми рудами и вскрытые при разведке участка Буранный, зачастую показывают весьма высокие концентрации оксида марганца от 20 до 40% (Рис.4), что позволяет при укрупненных расчетах принять среднее содержание MnO в прогнозируемом блоке на уровне 20%.

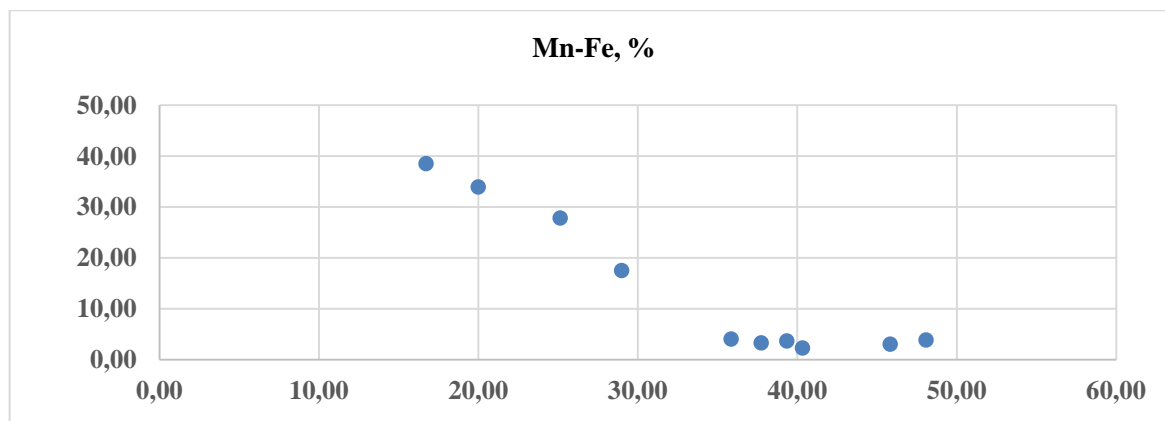


Рисунок 4 – Диаграмма MnO-Fe₂O₃ пород в кровле лимонитового горизонта (участок Буранный, скв. 540145, инт-л 36,7-45,0 м). Анализы выполнены в АСИЦ ВИМС.

Ориентировочные расчеты, учитывающие широкое распространение железо-марганцевых руд в пределах Буранного и Южного участков и принимая во внимание общую площадь распространения пород редкометальной подгруппы 5,5 км² (анкеритовых карбонатитов – 2,5 км² и анкерит-шамозитовых пород – 3,0 км²), среднюю мощность обогащенных марганцем железных руд 25 м, объемный вес руды 3,8 т/м³ и среднее содержание MnO около 20%, показывают, что ресурсы оксида марганца в пределах Томторского рудного поля могут составить около 100 млн.т.

3. Выводы

В латеритных корах выветривания карбонатитов Томторского рудного поля, непосредственно под пластом уникальных Nb-REE руд, установлены значительные ресурсы Mn оксидного типа (Fe-Mn руды пиролюзит-псиломелан-гроутит-лимонитового состава) с наложенной карбонатизацией (с сидеритом, олигонитом и родохрозитом).

В пределах Северного участка Томторского рудного поля по результатам опробования шести скважин оценены прогнозные ресурсы MnO в латеритных Fe-Mn корах выветривания, которые превышают 17 млн. т. при среднем содержании MnO около 13%.

По анализу результатов получены данные, расширяющие перспективы на сопредельные Буранный и Южный участки, в результате переоценки которых общие прогнозные ресурсы марганца оксидного и карбонатизированного типов в пределах Томторского рудного поля могут превысить 100 млн. т. при среднем содержании MnO в рудах около 20%.

4. Благодарности

Работа выполнена за счет гранта РНФ 23-63-10017 ИГМ СО РАН им. В.С. Соболева.

5. Литература:

- [1] Lapin A.V., Tolstov A.V. Oxidative and reducing stages of formation of the hypergenesis zone of carbonatites and their ore-bearing capacity // *Geology of ore deposits*. 1991. Vol. 33. No. 4. pp. 81-91. (In Russian).
- [2] Lapin A.V., Tolstov A.V. Minerageny of carbonatite weathering crust / *Methodological guide / Ser. A series of methodological manuals on forecasting and prospecting for mineral deposits in the regional geological study of the subsurface*. Moscow. GEOS Publishing House. 2011. 308 p.
- [3] Tolstov A.V., Gunin A.P. Comprehensive assessment of the Tomtor deposit // *Bulletin of the Voronezh State University. Series: Geology*. 2001. No. 11. pp. 144-160. (In Russian).
- [4] Lapin A.V., Kulikova I.M., Tolstov A.V. Distribution of REE, Y, Sc, and Th in the Unique complex rare-metal ores of the Tomtor deposit // *Geochemistry International*. 2016. T. 54. № 12. С. 1061-1078.

- [5] Sleptsov A.P., Tolstov A.V. Prospects of the Tomtor ore field for the detection of manganese deposits. In the book: Geology and mineral resources of the North-East of Russia. The XIII All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation dedicated to the 30th anniversary of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia) and the 40th anniversary of the Geological Exploration Faculty of the M.K. Ammosov NEFU. Yakutsk, 2023. pp. 261-266.
- [6] Rylov D.A., Sleptsov A.P., Tolstov A.V. Prospects of the Tomtor ore field for new types of minerals // In the collection: Geology and mineral resources of the North-East of Russia. 2017. pp. 423-427.
- [7] Tolstov A.V., Konoplev A.D., Kuzmin V.I. Features of the formation of the unique rare metal deposit Tomtor and assessment of the prospects for its development // Exploration and protection of the subsoil. 2011. No. 6. pp. 20-26.
- [8] Tolstov A.V., Pokhilenko N.P., Lapin A.V., Kryukov V.A., Samsonov N.Yu. Investment attractiveness of the Tomtor deposit and prospects for its improvement // Exploration and protection of the subsoil. 2014. No. 9. pp. 25-30. (In Russian).
- [9] Tolstov A.V., Pokhilenko N. P., Sleptsov A. P. Prospects of the Tomtor ore field for manganese deposits. Collection of articles: Alkaline and kimberlite magmatism of the Earth and related deposits of strategic metals and diamonds, Proceedings of the international conference, Apatity, 2023. pp. 406-410.
- [10] Pokhilenko N.P., Afanasyev V.P., Tolstov A.V., Kruk N.N., Pokhilenko L.N., Ivanova O.A. Prospects of development and problems of development of the raw material base of scarce strategic types of solid minerals of Siberia // Geology of ore deposits. 2023. Vol. 65. No. 5. pp. 476-492.

ПОИСКИ КИМБЕРЛИТОВ ПО МОРФОЛОГИИ ТРАППОВЫХ СИЛЛОВ (НА ПРИМЕРЕ ТРАППОВ В БАССЕЙНЕ Р. МОРКОКА)

Михаил Томшин, Саргылана Гоголева
ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

TRAPS OF THE MORKOKA RIVER AND THEIR MORPHOLOGY IN RESPONSE TO THE POSSIBLE PRESENCE OF KIMBERLITES

Mikhail Tomshin, Sargylana Gogoleva
Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. The study of traps in the outcrops of the middle course of the Morkoka River was carried out. It is established that in this area troupes were formed in three stages, in three phases of implementation. Each subsequent phase of the introduction of the basite melt is distinguished by its petro- and geochemical features, its degree of crystallization of the magmatic melt and, accordingly, its density characteristics. The established unusual form of introduction of intrusions of the second phase (crushing of the sill, introduction into the rocks of the early intrusive) by analogy with the similar behavior of traps near kimberlites (Komsomolskaya and Morkoka pipes) suggests the presence of an unknown kimberlite body under the traps in this area.

1. Введение

Северо-восточное окончание Тунгусской синеклизы (междуречье Вилюя и Мархи) является областью интенсивного распространения траппов. Площадь, перекрытая траппами, здесь достигает 70%. С учетом того, что на территории установлены многочисленные девонские кимберлитовые трубки, в том числе и алмазоносные (Айхал, Юбилейная, Комсомольская и др.) допустимо, что под траппами могут находиться еще нескрытые диатремы, поскольку в геофизических полях кимберлиты под долеритами не видны. При изучении траппов района было обращено внимание на их необычное поведение, вблизи некоторых кимберлитовых трубок. Перед кимберлитами силлы траппов могли увеличивать свою мощность, сминаться и расщепляться на маломощные инъекции. То есть, траппы, своей формой указывают на присутствие кимберлитов. Учитывая это, было обращено внимание на необычное поведение силлов траппов в борту р. Моркока в районе ее левого притока р. Тегерюк.

2. Траппы бассейна р. Моркока

В среднем течении р. Моркока в районе ее левого притока р. Тегерюк на протяжении 12 км обнажаются траппы (рисунок 1). В верхней части (около 150 м) обнажение представлено крупноглыбовым курумником долеритов с редкими останцами скальных пород, а в нижней (около 10 м) долериты вскрываются в коренном залегании (рисунок 2). Обнажение выполнено в основном двумя интрузивами, имеющими между собой горячий контакт, подчеркивая тем самым, более позднее внедрение нижнего силла. В точке наблюдения Мр-61/41 (см. рисунок 2) оба силла пересекаются маломощной (около 0,4-0,6 м) дайкой тонкозернистых долеритов, что говорит о наличии третьей фазы внедрения базитового расплава. Дайка имеет горячие контакты с обоими силлами и содержит в себе угловатые обломки долеритов второго интрузива. Таким образом, в обнажении четко фиксируется три фазы внедрения базитовой магмы. Первым был сформирован верхний силл, в настоящее время бронирующий водораздельное пространство территории и представленный в основном развалами долеритов за исключением отдельных останцев и нижних приконтактных его горизонтов, обнажающихся в коренном виде. Затем внедрялся второй интрузив, верхняя часть которого образует подножие обнажения, а все

остальное тело располагается ниже уреза воды. Третьей внедрялась интрузия, фиксируемая лишь по маломощной дайке. Можно предположить, что основное тело третьей интрузии находится на глубине, а в обнажении вскрыта лишь ее маломощная апофиза.

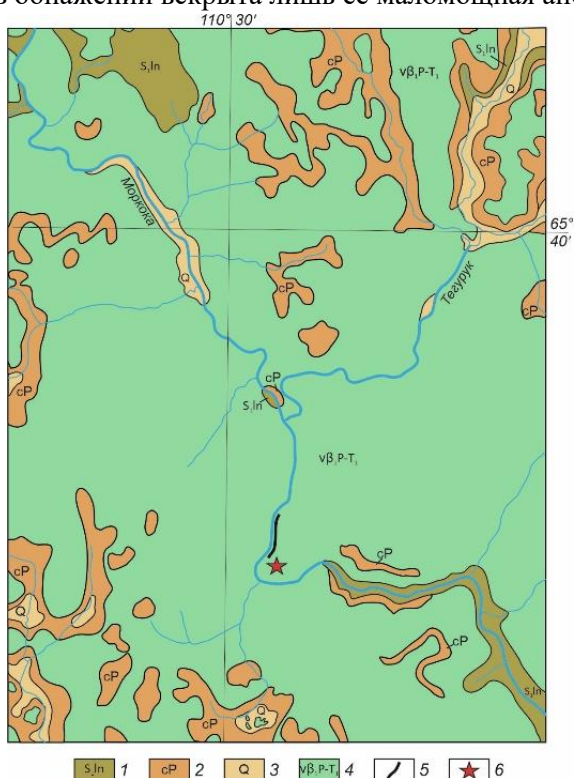


Рисунок 1 – Геологическая карта. Р. Моркока. Масштаб 1:200000.

Условные обозначения: 1 – силур; 2 – пермь; 3 – четвертичные отложения; 4 – траппы; 5 – обнажение Мр-61; 6 – место возможного нахождения кимберлитов.

Ранее [1, 2] все пермо-триасовые траппы востока Тунгусской синеклизы по петрохимическим показателям были разделены на три петрохимические группы – три петротипа, соответствующие трем фазам внедрения. В данном случае мы так же имеем дело с тремя самостоятельными фазами внедрения базитового расплава, сформировавшего три самостоятельных интрузива.



Рисунок 2 – Схематический рисунок обнажения Мр-61. Общая протяженность обнажения ~ 900 м, высота коренных выходов 8-10 м.

Условные обозначения: 1 – долериты интрузивов I петротипа; 2 – долериты интрузивов II петротипа; 3 – долериты интрузивов III петротипа; 4 - места отбора проб; 5 – бровка над коренными выходами с

почвенным слоем; б – контакты интрузий: а – видимые, б – предполагаемые; 7 – зона дробления, пронизанная жилками долеритов.

Установлено, что первый силл залегая горизонтально, перекрывает существенную часть территории, образуя сплошное трапповое поле (см. рисунок 1). Находящийся под ним второй интрузив на протяжении ~ 10 км внедрялся горизонтально вдоль подошвы верхней интрузии. Затем он начинает резко сминаться. То есть очевидна схожесть в поведении трапповых силлов р. Моркока с пластовыми интрузиями вблизи некоторых кимберлитовых трубок. Так, например, в производственном карьере трубки Комсомольская вскрываются два силла [Рисунок 3]. Верхний силл залегает горизонтально согласно с вмещающими осадочными породами и перекрывает кимберлиты, тогда как нижний, встретив на пути внедрения препятствие в виде кимберлитов, начинает сминаться, задирается вверх. Деформирующийся силл выполнен более вязкой более раскристаллизованной магмой, относящейся ко второму петрохимическому типу. Аналогичное поведение траппов было описано вблизи трубки Моркока [3]. Здесь также установлено два силла. Верхний из них занимает бронирующее положение и перекрывает кимберлиты тр. Моркока, а залегающий под ним второй интрузив перед диатремой, образует раздув мощности, начинает сминаться, щепиться на многочисленные апофизы [3, рисунок 2]. Второй силл, также был выполнен хорошо раскристаллизованной, более вязкой магмой. То есть в зависимости от внутреннего строения и состава траппы по-разному ведут себя вблизи кимберлитов. Более вязкая базитовая магма чутко реагировала на плотностные характеристики вмещающих пород.

Известно, что под воздействием кимберлитов в процессе образования трубки вмещающие осадочные породы становятся более плотными [4], в них возникают термоупругие и магнитоупругие [5, 6] напряжения, аналогичны тем, что проявляются при подземном ядерном взрыве [7]. Согласно данным бурения такие изменения вмещающих пород, на которые начинает реагировать внедряющаяся базитовая магма могли распространяться вокруг кимберлитов на несколько километров [5]. Таким образом, именно кимберлитовые диатремы и окружающие их вмещающие породы создают трудно проницаемую зону для относительно вязкой интенсивно раскристаллизованной базитовой магмы. Обычно подвижная, обладающая мощной интрузирующей силой базитовая магма формирует многокилометровые пластовые интрузии, как правило, согласно залегающие с вмещающими их осадочными породами. Учитывая сказанное можно с определенной долей уверенности предположить, что в данном случае сложная морфология траппов р. Моркока обусловлена процессом образования кимберлитовых трубок.

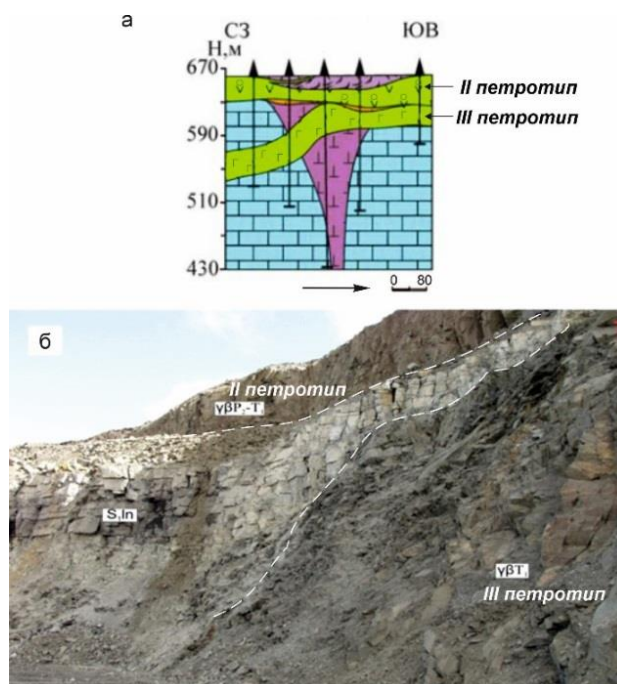


Рисунок 3 – Борт карьера трубки Комсомольская: а – схематический разрез трубки; б – взаимоотношение трапповых силлов второго и третьего петротипов.

3. Обсуждение

Возможен следующий сценарий становления траппов. Внедряющийся первым базитовый расплав, формировавший верхний силл, перекрыл кимберлиты. Поступающая через какое-то время, частично раскристаллизованная на глубине, более вязкая магма, встретив на пути внедрения кимберлитовую и диатрему и вмещающие ставшие более плотными карбонатные породы, как бы уперлась в них. Внедряющийся магматический клин начинает сминаться, вдавливаясь в долериты верхнего интрузива, дробить их и инъецировать в раздробленные породы в виде тонких ветвящихся жилок. Часть магмы возможно могла, обогнув возникшее препятствие и уже на удалении от кимберлитов, вновь формировать пологозалегающий силл. Третий интрузив представлен в обнажении маломощной дайкой. Предполагается, что базитовый расплав ее формировавший, будучи наиболее вязким, интенсивно раскристаллизованным и имевшим более высокую (до 3 г/см³ против 2,7-2,8 г/см³) плотность остановился перед кимберлитами, образуя раздуп мощности. Известны случаи, когда перед кимберлитами в силлах траппов их мощность увеличивается втрое. Дальнейшее внедрение расплава могло проходить в виде маломощных даек, аналогичных тем, что показаны на рисунок 2, и в статье [3].

4. Выводы

Изучение траппов бассейна р. Моркока показало, что в зависимости от раскристаллизации базитовой магмы, изменения плотностных характеристик и вязкостных свойств расплава внедряющийся магматический клин будет по-разному реагировать на кимберлиты и, особенно, на вмещающие их осадочные породы. Последние, за счет приобретенного термоупругого и магнитоупругого эффектов (Вилла-эффект), образуют вокруг диатремы «защитный экран» [5], препятствующий относительно свободному внедрению базитов. В подобных случаях трапповые силлы вблизи кимберлитов начинают менять свою конфигурацию, тем самым сигнализируя о наличии кимберлитовых трубок.

Приведенная выше информация дает основание предполагать, что в случае траппов бассейна р. Моркока их морфологические изменения обусловлены кимберлитовой диатремой, которая находится на левом берегу реки в 5 км ниже по течению от устья р. Тегерюк в подковообразной излучине. Именно этот изгиб р. Моркока, оконтуривая инъецивное поднятие осадочных пород,

обусловленное внедрением кимберлитов, подтверждает возможное присутствие здесь кимберлитовой трубки.

5. Благодарности

Работа выполнена в рамках госзадания ИГАБМ СО РАН.

6. Литература:

- [1] Tomshin M.D., Kopylova A.G., Tyan O.A. Petrochemical diversity of traps of the eastern periphery of the Tunguska syncline. *Geology and geophysics*. 2005; 46 (1):72-82.
- [2] Kopylova A.G., Tomshin M.D. Geochemistry of traps in the eastern part of the Tunguska syncline // *Domestic geology*. 2011; (5): 80-88.
- [3] Tomshin M.D., Lelyukh M.I., Mishenin S.G., Suntsova S.P., Kopylova A.G., Dubinin S.G. Scheme of development of trap magmatism of the eastern side of the Tunguska syncline. *Domestic geology*. 2001; (5): 19-24.
- [4] Nikulin V.I., Lelyukh M.I., Von der Flaass G.S. *Almazprognostika*. Irkutsk. 2001: 317.
- [5] Konstantinov K.M., Kirguez A.A., Good M.S. Petromagnetic inhomogeneities of stress: an applied consequence of the Villari effect. *Natural resources of the Arctic and Subarctic*. 2018; 24(2): 29-38.
- [6] Konstantinov I.K., Konstantinov K.M., Orlova G.V., etc. Influence of pressure and temperature on the anisotropy of magnetic susceptibility of host rocks: observations, hypotheses and experiments / *Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian Mobile Belt (from ocean to continent)*. Materials of the meeting, Issue 20. – Irkutsk: Institute of the Earth's Crust SB RAS. 2022: 137-139.
- [7] Kostrovitsky S.I. Physical conditions, hydraulics and kinetics of filling kimberlite pipes. *Novosibirsk. Nauka*, 1976: 96. Fridovsky, V.Yu., Gamyagin, G.N. and Polufuntikova, L.I. Metallogeny of gold and silver in South Verkhoyanie // *Gorny Zhurnal*, 2017, vol. 6, pp. 9-15.

**ЛОКАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ, МИНЕРАЛЬНЫЕ АССОЦИАЦИИ, ФЛЮИДНЫЕ
ВКЛЮЧЕНИЯ, МИКРОЭЛЕМЕНТНЫЙ И ИЗОТОПНЫЙ (S-O) СОСТАВ РУД
МЕСТОРОЖДЕНИЯ БАДРАН: К ПРОИСХОЖДЕНИЮ ОРОГЕННЫХ
ЗОЛОТОРУДНЫХ СИСТЕМ ЯНО-КОЛЫМСКОГО ПОЯСА**

Валерий Фридовский¹, Сергей Кряжев^{2,1}, Лена Полуфунтикова¹, Максим Кудрин¹,
Галина Анисимова¹

¹ ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

² ФГБУ «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и
благородных металлов», 117545, Россия, г. Москва, Варшавское шоссе, 129, к. 1

**LOCAL CONTROL, MINERAL ASSOCIATIONS, FLUIDS INCLUSIONS, TRACE
ELEMENTS AND ISOTOPIC (S-O) COMPOSITION OF ORES OF THE BADRAN
DEPOSIT: ON THE ORIGIN OF OROGENIC GOLD SYSTEMS OF THE YANA-KOLYMA
BELT**

Valery Fridovsky¹, Sergey Kryazhev^{2,1}, Lena Polufuntikova¹, Maxim Kudrin¹, Galina Anisimova¹

¹ Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

² Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals,
1-129, Warshawskoe ch., Moscow, 117545, Russia

Abstract. The Badran orogenic gold deposit is located in the Yana-Kolyma belt, Eastern Siberia, it has proven reserves of ~9.3 t of gold and an average grade of 7.8 g/t. The total gold production at the Badran deposit since 1984 amounted to ~ 34 t. Despite many years of study, the origin of the gold deposits of the Yana-Kolyma metallogenic belt one of the world's largest belts, and the Badran deposit is controversial. Synthesis of regional geology, geology and structure of the Badran deposit, fluid inclusion analysis, mineral and (S-O) isotope chemistry defines the genetic model, origin of fluids and source of metals in the evolution of the ore-forming system, equivalent to other orogenic gold deposits on the margin of the Siberian craton. The deposit is localized in the Upper Triassic clastic rocks and is controlled by the NW-trending thrust. The ore bodies of the deposit are controlled by the Nadvigovaya zone; the formation of ore bodies is associated with Late Jurassic-Early Cretaceous deformations by reverse-thrust kinematics, which was the transit path of trunk fluids. The calculated position of the paleotectonic stress fields of the ore stage is as follows: $\sigma_1 - 46/60$, $\sigma_2 - 315/2$, $\sigma_3 - 225/28$. Polyphase mineralization occurs as disseminated arsenian pyrite and arsenopyrite ores with invisible gold, quartz veins with native gold and Fe, Pb, Zn, Cu sulfides and sulfosalts of orogenic type, and locally post-ore Ag, Sb-bearing minerals and Hg epithermal features. The quartz veins with native gold were formed from a boiling low-medium saline (1.5–10 wt% NaCl eq.) aqueous-carbonic fluids at temperatures of 290 to 210 °C and pressures of 300–250 to 125 bar. $\delta^{34}\text{S}$ values of pyrite and arsenopyrite vary from -1.1‰ to +2.4‰, with an average of +0.4‰; the $\delta^{18}\text{O}$ of quartz from +15.1‰ to +17.5‰ at constant $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ about +7.5 ‰ ($\pm 1.0\%$). High contents of As (up to 2.4 wt%), Co/Ni ~ from 0.3 to 9.9 in pyrite of proximal alteration, are typical for hydrothermal systems. The results obtained confirm that the ore-forming fluids did not have a single origin, but were formed from a mixture of subcontinental lithospheric mantle and metamorphic sources. The subcrustal lithospheric mantle was fertilized in the time preceding mineralization (Late Jurassic) and was derived directly from the down-going subduction slab and overlying sediment wedge at the closure of the Oymyakon Ocean.

1. Введение

Месторождение Бадран открыто в 1961 г., разведано в 1970-1980 гг. горно-буровыми и подземными работами. В 1984 году на месторождении началась подземная добыча золота, которая продолжается и в настоящее время. Общий объем добычи золота составляет около 34 т, запасы оцениваются в ~9.3 т Au при среднем содержании 7.8 г/т. Месторождение прослежено

поверхностными и подземными выработками на расстояние более 5 км, по падению рудного тела – более 1.2 км, что дает возможность изучить строение месторождения, минеральный состав руд и условия рудообразования на различных глубинных уровнях.

Несмотря на многолетние исследования, происхождение золотых месторождений Яно-Колымского металлогенического пояса и месторождения Бадран остается спорным. В настоящей работе на основе детальных полевых работ в подземных горных выработках представлены новые данные по локальному структурному контролю, вещественному составу вкрапленной и жильной минерализации, геохимическому и изотопному (S и O) составу руд, а также результаты микротермометрии флюидных включений важные для понимания рудообразующих событий и новой интерпретации источника золота и процессов, сформировавших месторождение Бадран, в контексте эволюции окружающих аккреционно-коллизонных структур Верхояно-Колымского орогена.

2. Геология и локальный структурный контроль оруденения

Месторождение Бадран приурочено к зоне Надвиговая – наиболее рудоносному участку Бадран-Эгеляхского разлома. Развита складка нескольких генераций. Ранние складки – сжатые, СЗ простирания с близгоризонтальными шарнирами, поздние – присдвиговые аксоноклинали с шарниром в круто (60°) погружающимся к восток-юго-востоку.

Жильно-прожилковая минерализация наиболее интенсивно развита в пластах песчаников, а их контакты с алевролитами определяют положение и морфологию рудных тел. На месторождении выделены два основных морфологических типа рудных тел: жильно-прожилковый и вкрапленный. Кварцевые жилы являются ведущим типом рудных тел. Их мощность достигает нескольких метров, протяженность по простиранию – десятки метров, по падению – сотни метров. Жилы обычно залегают в осевой части зоны Надвиговой, реже в ее подошве или висячих контактах. На флангах жил увеличивается количество кварцевых прожилков, массивные и грубополосчатые структуры жил сменяются прожилковыми и брекчиевыми рудами. Вкрапленный тип представлен золотосными пиритом и арсенопиритом в околожильных метасоматитах. Анализ положения полюсов золотосных жил и прожилков на стереографических проекциях (сетка Вульфа, верхняя полусфера) показал наличие нескольких систем. Первая система – согласные с зоной Надвиговая жилы полого ($20-40^\circ$) падающие к северо-востоку ($35-45^\circ$). Это наиболее распространенные и выдержанные по простиранию и падению жилы. Вторая система падает к юго-западу под углами $40-60^\circ$. Третья система – поперечные к падению и простиранию жилы, расположенные вдоль пояса σ_3/σ_1 . Первая и вторая системы образуют закономерные сопряженные динамопары, их полюсы группируются вдоль субвертикального пояса σ_3/σ_1 , характерного для взбросо-надвиговых движений ($\sigma_1 - 46/60$, $\sigma_2 - 315/2$, $\sigma_3 - 225/28$).

3. Минералогия и парагенетическая последовательность

Руды месторождения Бадран характеризуются разнообразным минеральным составом [1]. Здесь описано около 50 гипогенных и гипергенных минералов, образованных в течении восьми (четыре рудных и четыре пострудных) стадий минералообразования.

В проксимальных серицит-хлорит-карбонат-кварцевых изменениях широко распространена метасоматическая пирит-арсенопирит-карбонат-кварцевая ассоциация. Типоморфными рудными минералами ассоциации являются золотосодержащие пирит-3 и арсенопирит-1, образующие дисперсную вкрапленность метакристаллов в зонах дробления и во вмещающих породах. Золото-1 находится в этих сульфиды в «невидимой» форме [2].

В жилах главной является *арсенопирит-пирит-карбонат-кварцевая ассоциация*. Самородное золото-2 этой ассоциации обычно представлено мелкодисперсными идиоморфными кристаллами и комковатыми разновидностями. Для пирита-4 характерно высокое содержание золота, иногда достигающее сотен г/т, но в среднем десятков г/т. Арсенопирит-2 развивается в кварцевых жилах и часто встречается вместе с Ру4.

Полиметалльно-карбонат-альбит-кварцевая минеральная ассоциация распространена преимущественно на флангах верхних горизонтов зоны Надвиговая. На глубоких горизонтах встречается в центральной части рудных столбов. Типоморфные минералы – халькопирит, галенит, сфалерит, золото, доломит, альбит.

Сульфостибнит-серицит-кварцевая минеральная ассоциация с примесью редких сульфостибнитов развивается в центральном наиболее рудоносном интервале зоны Надвиговая. Тетраэдрит, золото и серицит – типоморфные минералы. Самородное золото-4 этой ассоциации наиболее высокопробное (900–998 ‰), преимущественно интерстициальное, линзовидное, клиновидное, лентовидное и комковатое.

На месторождении локально распространены *серебряно-кварцевые и киноварно-стибнит-карбонат-кварцевые минеральные ассоциации*. Фрейбергит, акантит, аргентотетраэдрит, ртутное золото (400–700 ‰) – типоморфные минералы серебряно-кварцевой ассоциации. В сочетании с акантитом в руде обнаружены бурнонит и низкопробное самородное золото (Au5). В процессе гипергенеза произошло образование двух минеральных ассоциаций серно-сульфатного (гипс, ярозит, англезит, ковеллин и халькозин) и оксидного состава (гетит, гидрогетит, малахит, азурит, сервантит, трипугиит, полианит и ютенбогаардтит). С минералами гипергенной стадии встречается самородное золото.

4. Химический состав и генезис пирита и арсенопирита из проксимальных метасоматитов

В серицит-хлорит-карбонат-кварцевых проксимальных изменениях содержание вкрапленной сульфидной минерализации достигает 6–8 ‰. Обычно пирит преобладает на расстоянии от кварцевых жил/прожилков, а арсенопирит – вблизи них. Эти минералы содержат «невидимое» золото.

Методом микрозондового анализа определено, что преобладает пирит нестехиометрического состава ($Fe/(As+S) \neq 0,50$; $S/Fe \neq 2,00$). Основной примесью в пирите является As ($C_{As} = 0,18-2,41$ мас. %). Типоморфными примесями в пирите являются Co, Ni, Cu, Sb и Pb. Общее содержание примесей варьируется от 0,01 до 0,37 мас. %. Распределение содержания как главных, так и примесных элементов носит зональный характер, что позволило выделить в кристаллах краевую (кора), промежуточную (мантия) и ядерную зоны. Для краевой зоны характерно повышенное содержание Co (0,07–0,09 мас. %), для отдельных кристаллов пирита фиксируются повышенные содержания Ni и Sb (max C_{Ni} до 0,28 мас. %; max $C_{Sb} =$ до 0,11 вес.%). В промежуточной зоне наблюдаются минимальные содержания Cu, Ni и Pb. Для зоны ядра характерно повышенное содержание As (0,98–2,2,24 мас. % при $V\sigma = 24\%$), но максимальные концентрации отмечаются в краевой зоне.

Арсенопирит-1 характеризуется нестехиометрическим составом ($(S+As)/Fe \neq 2,00$), избытком S ($C_S = 19,96 - 23,21$ мас. %) и недостатком As ($C_{As} = 41,81 - 45,98$ мас. %). Содержание Fe близко к стехиометрическому ($Me = 34,36$ мас.%). Элементами-примесями являются Co, Ni, Cu и Sb. Постоянная примесь – Co ($V\sigma = 35\%$). Распределение остальных примесей весьма неравномерно. Соотношение Co/Ni в пирите варьируется от 0,3 до 9,9, что характерно для пирита р-типа с высокой проводимостью. Такой отрицательно заряженный пирит по данным [3] притягивает преимущественно золото. Для большинства проанализированных зерен $Co/Ni > 1$, что, по данным [4], характерно для гидротермальных флюидов. Рассматривая систему As-Co-Ni, можно судить об условиях образования пирита. Co и Ni имеют мантийное происхождение, однако Ni входит в состав минералов уже на ранних стадиях миграции магматических расплавов. Содержание Co в гидротермальном флюиде достаточно стабильно. As переходит в твердую фазу при более низких температурах, изоморфно замещая S в пирите.

Вариации содержания As и S даже в пределах одного зерна в метасоматическом арсенопирите месторождения Бадран составляют 0,6–1,2 мас. %. Постоянный избыток S при недостатке As и высокая «подвижность» этих элементов в растворе приводят к нарушению структуры минерала и искажению октаэдрического окружения атомов Fe [5]. Нестехиометрический состав $Aspy$ ($S/As = 1,01-1,30$; $(S+As)/Fe = 2,01-2,08$) отражает нестабильность режима рудообразования.

Золото может находиться как в виде изоморфного замещения Fe, As и S в этих сульфидах нестехиометрического состава, так и в виде микровключений. Микровключения самородного золота в изученных сульфидах не обнаружены, но содержание золота в них высокое (в пирите до 155,5 г/т Au и в арсенопирите до 168,5 г/т Au). Положение концентраций Au в Py и Apy ниже линии насыщения характерно для структурно связанной формы «невидимого» золота Au^+ . Нестехиометрия составов и несовершенство структуры пирита и арсенопирита открывают возможности для изоморфного замещения Au минералообразующих элементов (As, F, S).

5. Происхождение флюидов в эволюции рудообразующей системы

По результатам изучения флюидных включений из кварцевых жил с видимым золотом месторождения Бадран установлено его образование при температурах от 290° до 210° С и давлениях от 250 до 125 бар. Минералообразование на месторождении происходило в условиях гетерогенизации (кипения) рудоносных флюидов и смены градиента литостатического давления гидростатическим. В процессе рудообразования состав золотосодержащих растворов существенно менялся. Ранние пирит-арсенопиритовые метасоматические и арсенопирит-пирит-карбонат-кварцевые жильные минеральные ассоциации формировались с участием разбавленных щелочно-хлоридных метан-углекислотных флюидов ($C=1,5-3,5$ мас.% NaCl-экв., $xCO_2+CH_4 = 4-6$ мол. %, $CO_2/CH_4 = 5-7$). Поздние полиметалльно-карбонат-альбит-кварцевая и сульфосибнит-серицит-кварцевая минеральные ассоциации отлагались после падения температуры и давления из серно-метановых растворов ($C = 8-10$ мас.% NaCl-экв., $xCO_2+CH_4 < 1$ моль. %, $CO_2/CH_4 = 0,3-0,4$). Полученные параметры типичны для орогенных месторождений фанерозоя [6]. В слабо- и умеренно-соленых флюидах сульфидный (HS^-) комплекс может быть основным агентом транспорта золота в гидротермальных флюидах золоторудного месторождения Бадран. Изменение P-T параметров рудного флюида от ранних стадий к поздним стадиям минералообразования, его охлаждение, снижение давления, взаимодействие с вмещающими породами приводит к снижению растворимости золота, дестабилизации $Au(HS)_2$, осаждению золота в ассоциации с сульфидами Fe, Pb, Zn, Cu.

Изучение параметров флюидных включений позволяют предположить происхождение рудоносных флюидов месторождения Бадран из различных источников глубоких метаморфических резервуаров и подкоревой литосферной мантии. Последний был обогащен и образовался непосредственно из нисходящей субдукционной плиты и перекрывающего клина осадков при закрытии Оймяконского океана.

6. Источник металлов и рудных флюидов

Данные по изотопам серы и кислорода дают возможность получить полезную информацию о возможных источниках металлов и рудных флюидов. Исследования изотопного состава серы пирита ($\delta^{34}S$ от $-0,7$ до $+2,1\%$) и арсенопирита ($\delta^{34}S$ от $-1,1$ до $+2,4\%$) месторождения Бадран показали, что $\delta^{34}S$ близки к сульфидам золото-кварцевых жил орогенных месторождений в западной части ЯКМП (арсенопирит – от $-2,1$ до $+2,4\%$, пирит – от $-6,6$ до $+5,4\%$ [2, 7, 8] и характеризуются меньшим диапазоном изменений, чем $\delta^{34}S$ в пирите кварцевых жил и метасоматитов (в среднем $+4,0\%$) Верхнеколымского золотоносного района [9]. Близкий изотопный состав серы арсенопирита и пирита орогенных месторождений западной части ЯКМП и вкрапленной минерализация из Бадранского месторождения свидетельствуют об их формировании в ходе единого изотопно-равновесного гидротермального события в условиях фазового расслоения рудообразующих флюидов.

Значения изотопного состава $\delta^{34}S$ сульфидов месторождения Бадран показывают, что сера соответствует флюидам субконтинентальной литосферной мантии и магматического происхождения. Полученные результаты могут свидетельствовать об участии глубинного мантийного/магматического источника серы в рудообразовании месторождения Бадран. Сочетание узкого диапазона $\delta^{34}S$ и отсутствия резкого изменения от глубины 600 м к поверхности температуры и солености флюида показало, что рудообразующие флюиды и источники стабильны. Такие условия могут быть важным требованием для крупномасштабной золоторудной минерализации.

Изотопный состав кислородного кварца из рудных жил с самородным золотом месторождения Бадран (от $+15,1$ до $+17,5\%$) сопоставим с фанерозойскими орогенными золоторудными месторождениями (от $+12$ до $+18\%$) [10]. Близкие значения $\delta^{18}O$ кварца из разных участков Бадранского месторождения могут свидетельствовать об однородном источнике флюидов глубинной метаморфической термальной системы.

Изотопный состав кислорода воды, входящей в эти флюиды, рассчитывается с учетом температур улавливания первичных включений в кварце ($290-210$ °С) и констант равновесия изотопного обмена кислорода между кварцем и водой [11]. Полученный достаточно однородный диапазон значений $\delta^{18}O_{H_2O}$ ($+7,5 \pm 1\%$) указывает на вероятную парагенетическую связь рудообразующих флюидов с магмами или метаморфическими резервуарами.

Таким образом, полученные результаты изучения флюидных систем, стабильных изотопов S-O и геохимии сульфидов проксимальных метасоматитов подтверждают, что рудообразующие

флюиды месторождения Бадран не имели единого происхождения, а были получены из смеси субконтинентальной литосферной мантии и метаморфических источников.

7. Заключение

1. Рудные тела месторождения Бадран контролируются зоной Надвиговая, формирование рудных тел связано с позднеюрско-раннемеловыми деформациями взбросо-надвигой кинематики. Рассчитанное положение полей палеотектонических напряжений рудного этапа следующие: $\sigma_1 - 46/60$, $\sigma_2 - 315/2$, $\sigma_3 - 225/28$.

2. Полихронное месторождение золота Бадран содержит типично орогенную вкрапленную минерализацию с мышьяковистым пиритом и арсенопиритом с «невидимым» золотом (преимущественно структурно-связанное Au^+), кварцевые жилы с самородным золотом и сульфидами Fe, Pb, Zn, Cu и сульфосолями, а также локально проявленными пострудными минералами Ag, Sb и Hg. Месторождение образовалось в шесть стадий минерализации: (I) метасоматическая пирит-арсенопиритовая, (II) жильная арсенопирит-пирит-карбонат-кварцевая, (III) полиметалльно-карбонат-альбит-кварцевая, (IV) сульфостибнит-серицит-кварцевая, (V) серебро-кварцевая, (VI) киноварьно-стибнит-карбонат-кварцевая.

2. Рудообразование происходило в условиях гетерогенизации (кипения) слабосоленых водно-углекислотных флюидов. На раннем этапе флюиды имели щелочно-хлоридный метан-углекислотный состав. На поздней стадии при падении температуры и давления преобладали серно-метановые растворы. Изменение P-T параметров рудообразующего флюида, кипение и взаимодействие с вмещающими породами привели к снижению растворимости и осаждению золота.

3. Сочетание узкого диапазона $\delta^{34}S$ и отсутствия резкого изменения с глубиной температуры и солености флюида показало, что рудообразующие флюиды и источники стабильны. Такие условия могут быть существенным условием для крупномасштабной золоторудной минерализации.

4. Полученные результаты подтверждают, что рудообразующие компоненты золоторудного месторождения Бадран не имели единого происхождения, а были получены из субконтинентального литосферного резервуара и метаморфических источников. Решающее значение для позднеюрской-раннемеловой металлогении Яно-Колымского пояса имело обогащение мантийной литосферы при субдукции слэба Оймяконского малого океанического бассейна.

8. Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке по плану НИР ИГАБМ СО РАН (проект FUG-2024-0006).

9. Литература:

- [1] Anisimova, G.S., Kondratieva, L.A., Serkebaeva, E.S., and Ageenko, V.A. Badran gold deposit, Eastern Yakutia. *Ores and Metals*, 2008, vol. 5, pp. 49-60 (In Russian).
- [2] Fridovsky, V.Y., Polufuntikova, L.I., Kudrin, M.V., and Goryachev, N.A. Sulfur isotope composition and geochemical characteristics of gold-bearing sulfides of the Badran orogenic deposit, Yana-Kolyma metallogenic belt (North-East Asia). *Doklady Earth Sciences*, 2022, vol. 502(1), pp. 3-9. <https://doi.org/10.1134/S1028334X22010032>.
- [3] Large, R.R., and Maslennikov, V.V. Invisible Gold Paragenesis and Geochemistry in Pyrite from Orogenic and Sediment-Hosted Gold Deposits. *Minerals*, 2020, vol. 10, pp. 339. <https://doi.org/10.3390/min10040339>.
- [4] Roma'n, N., Reich, M., Leisen, M., Morata, D., Barra, F., and Deditius, A.P. Geochemical and micro-textural fingerprints of boiling in pyrite. *Geochim et Cosmochim Acta*, 2019, vol. 246, pp. 60-85. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2018.11.034>.
- [5] Sazonov, A.M., Kirik, S.D., Silyanov, S.A., Bayukov, Y.A., and Tishin, P.A. Typomorphism of arsenopyrite of the Blagodatnoye and Olympiada gold deposits (Yenisei Ridge). *Mineralogy*, 2016, vol. 3, pp. 53-70 (in Russian). <https://elibrary.ru/wzvrof>.
- [6] Goldfarb, R., and Groves, D. Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time. *Lithos*, 2015, vol. 233, pp. 2-26. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.07.011>.

- [7] Gamyagin, G.N., Fridovsky, V.Y., and Vikent'eva, O.V. Noble-metal mineralization of the Adycha–Taryn metallogenic zone: geochemistry of stable isotopes, fluid regime, and ore formation conditions. *Russian Geol and Geoph*, 2018, vol. 59(10), pp. 1271-1287. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.09.006>.
- [8] Kudrin, M.V., Fridovsky, V.Y., Polufuntikova, L.I., Kryuchkova, L.Y. Disseminated Gold–Sulfide Mineralization in Metasomatites of the Khangalas Deposit, Yana–Kolyma Metallogenic Belt (Northeast Russia): Analysis of the Texture, Geochemistry, and S Isotopic Composition of Pyrite and Arsenopyrite. *Minerals*, 2021, vol. 11, pp. 403. <https://doi.org/10.3390/min11040403>.
- [9] Tyukova, E.E., and Voroshin, S.V. Isotopic composition of sulfur in sulfides from ores and host rocks of the Upper Kolyma region (Magadan region). *Russ. J. Pac. Geol.*, 2008, vol. 27, pp. 29-43. <https://doi.org/10.1007/s11720-008-1003-y>.
- [10] Ridley, J.R., and Diamond, L.W. Fluid chemistry of orogenic lode gold deposits and implication for genetic models. *Gold in 2000. Rev. Econ. Geol.*, 2000, vol. 13, p. 141-162. <https://doi.org/10.5382/Rev.13.04>
- [11] Clayton, R.N., O'Neil, J.R., and Mayeda, T.K. Oxygen isotope exchange between quartz and water. *J. Geophys Res.*, 1972, vol. 77, pp. 3057-3067. <https://doi.org/10.1029/jb077i017p03057>.

⁴⁰Ar/³⁹Ar ВОЗРАСТ ЗОЛОТО-КВАРЦЕВЫХ РУД И ВЗАИМООТНОШЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ И ХРУПКИХ ДЕФОРМАЦИЙ НА МЕСТОРОЖДЕНИИ МАРИНСКОЕ АЛЛАХ-ЮНЬСКОЙ МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКОЙ ЗОНЫ (ЮЖНОЕ ВЕРХОЯНЬЕ)

Валерий Фридовский^{1,2}, Ярослав Тарасов^{1,2}, Максим Кудрин¹, Лена Полуфунтикова¹, Егор Иванов^{1,2}

¹ ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН», 677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

² ФГБУН «Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН», 685000, Россия, г. Магадан, ул. Портовая, 16

⁴⁰Ar/³⁹Ar AGE OF GOLD-QUARTZ ORES AND THE RELATIONSHIP OF PLASTIC AND BRITTLE DEFORMATIONS AT THE MARINSKOE DEPOSIT OF THE ALLAKH-YUN METALLOGENIC ZONE (SOUTHERN VERKHOYANSK)

Valery Fridovsky^{1,2}, Yaroslav Tarasov^{1,2}, Maxim Kudrin¹, Lena Polufuntikova¹, Egor Ivanov^{1,2}

¹ Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

² North-East Interdisciplinary Scientific and Research Institute FEB RAS, 16 Portovaya st., Magadan, 685000, Russia

Abstract. The results of structural-kinematic studies of the Marinskoe orogenic gold deposit in the Allakh-Yun metallogenic zone (Southern Verkhoyansk) are presented. The deposit is localized in the asymmetric anticlinal fold hinge disrupted by longitudinal faults. Late-orogenic brittle ore-controlling structures are superimposed on early-orogenic brittle-plastic deformations, which may indicate the exhumation of the latter before ore formation. Three differently oriented systems of gold-bearing vein-veinlet bodies formed in the thrust-fault stress field are identified. ⁴⁰Ar/³⁹Ar age of the sericite from the transverse quartz-carbonate vein was 119.4±4.7 Ma. This dating corresponds to the time of formation of large granitoid massifs and late orogenic gold deposits of the Allakh-Yun zone associated with asthenospheric upwelling in the rear of the active continental margin.

1. Введение

Аллах-Юньская металлогеническая зона (АЮМЗ) является перспективной для открытия крупных золоторудных месторождений орогенного типа, для которых характерны вкрапленная золото-сульфидная и жильно-прожилковая кварц-карбонатная минерализации в shear-зонах и разломах [1, 2]. Здесь разрабатывается четвертое по величине запасов в России месторождение Нежданинское [3]. Титон-аптское орогенное золотое оруденение связано с развитием Удско-Мургальского вулcano-плутонического пояса и является многостадийным [4, 5]. Раннеорогенные месторождения с согласными стратифицированными жилами в каменноугольных отложениях контролируются shear-зонами (Булар, Оночолах, Хотунское, Дуэт, Бриндакит, Юр и другие). Хрупко-пластичные/пластичные структуры shear-зон прогрессивно развивались синхронно минерализации. Позднеорогенные месторождения локализируются в пермских отложениях и контролируются хрупкими разломами (Нежданинское, Задержнинское и другие). Оба типа месторождений располагаются в зонах Минорско-Кидерикинского и Менкюленского региональных разломов и обычно разобщены в пространстве. Исследования последних лет показали, что на месторождении Маринское позднеорогенные хрупкие рудоконтролирующие структуры наложены на раннеорогенные хрупко-пластичные и пластичные деформации, что может свидетельствовать об эксгумации последних до рудообразования. Анализ такой необычной для АЮМЗ структурной обстановки и времени рудообразования важен для

определения характеристик месторождений, условий их размещения, и, следовательно, происхождения.

В работе представлены новые данные о возрасте золото-кварцевых руд и структурах орогенного золоторудного месторождения Маринское.

2. Результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования

Для серицита из поперечной кварц-карбонатной жилы (обр. МП-2-21) месторождения Маринское было выполнено датирование методом ступенчатого прогрева $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ в аналитическом центре Института геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск). В спектре выделяется кондиционное плато, соответствующее возрасту 119.4 ± 4.7 млн. лет (СКВО = 0.25, выход ^{39}Ar = 93.6% по четырем ступеням). Эта оценка близка времени кристаллизации расположенных к северу крупных (сотни км²) гранитоидных массивов – Тарбаганнахский (120 млн лет, U-Pb SHRIMP-II, циркон, [6, 7], Уэмляхский (120 млн лет, U-Pb SHRIMP-RG, циркон, [8]), времени зеленосланцевого дислокационного метаморфизма (119 млн лет, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, биотит, [9]) и ранее установленному возрасту рудогенеза на позднеорогенных золоторудных месторождениях ~124-119 млн лет (Задержнинское, Нежданинское) Аллах-Юньской металлогенической зоны [10, 11, 12]. Согласно [13] формирование баррем-аптских орогенных месторождений золота на восточной окраине Сибирского кратона является результатом обогащения флюидов рудными элементами при астеносферном апвеллинге в тылу активной континентальной окраины.

3. Деформационные структуры и оруденение

Ранние хрупко-пластичные и пластичные деформации представлены Маринской антиклиналью, сланцевым кливажем, бугорчатостью и согласными тонкополосчатыми кварцевыми жилами (Рисунок 1, А, Б, Д и Е) [14]. Шеар-зоны – типичные рудоконтролирующие структуры для раннеорогенных золоторудных месторождений – не установлены [5]. Главной складчатой структурой является асимметричная Маринская антиклиналь. Она сложена каменноугольными отложениями (пенсильванская подсистема) наталинской свиты (алевролиты, аргиллиты и песчаники) [14]. Протяженность складки ~17 км, ширина меняется от 5 км на севере до 2-3 км на юге. Шарнир (b) полого (2-15°) погружается к северо-северо-востоку (22°). Западное крыло антиклинали пологое – от 15 до 40°, восточное крутое – от 30 до 90° до опрокинутого. Полюса слоистости на стереографической проекции рассеиваются вдоль дуги большого круга, что характерно для цилиндрических складок (Рисунок 2, А). На крыльях складки отмечаются борозды скольжения по падению пород ($l - 130/60$) и бугорчатость ($l - 200/5$) субсогласная шарниру Маринской антиклинали. Расстояние между осями бугорчатостей ~5 см (Рисунок 1, Е).

Особенностью месторождения является пологий (от 4 до 42°) сланцевый кливаж восточной-юго-восточной вергентности, что может быть связано с близким положением к детачменту Верхоянского терригенного комплекса. Он листоватый (толщина литонов первые мм) в алевролитах и скорлуповато-плитчатый (толщина литонов до 10-15 мм) в песчаниках. Кливаж параллелен осевой поверхности Маринской антиклинали. На микроуровне проявлен межзерновой кливаж катакластическо-сегрегационного и сегрегационно-струйчатого морфологических типов (Рисунок 1, Д). Для обломочной части пород характерен бластез с формированием регенерационных «бород нарастания» в тыловых частях кварцевых зерен. Проявление магистральных зон и выравнивание поверхностей сланцевого кливажа сопровождается интенсивной серицитизацией пород (Рисунок 1, Д).

Раннеорогенные тонкополосчатые кварцевые жилы вместе с вмещающими алевролитами смяты в интенсивные складки подобного типа (Рисунок 1, А-Б). Мощность жил до 10-15 см, золотосность низкая (до 0.24 г/т, в среднем 0.11 г/т).

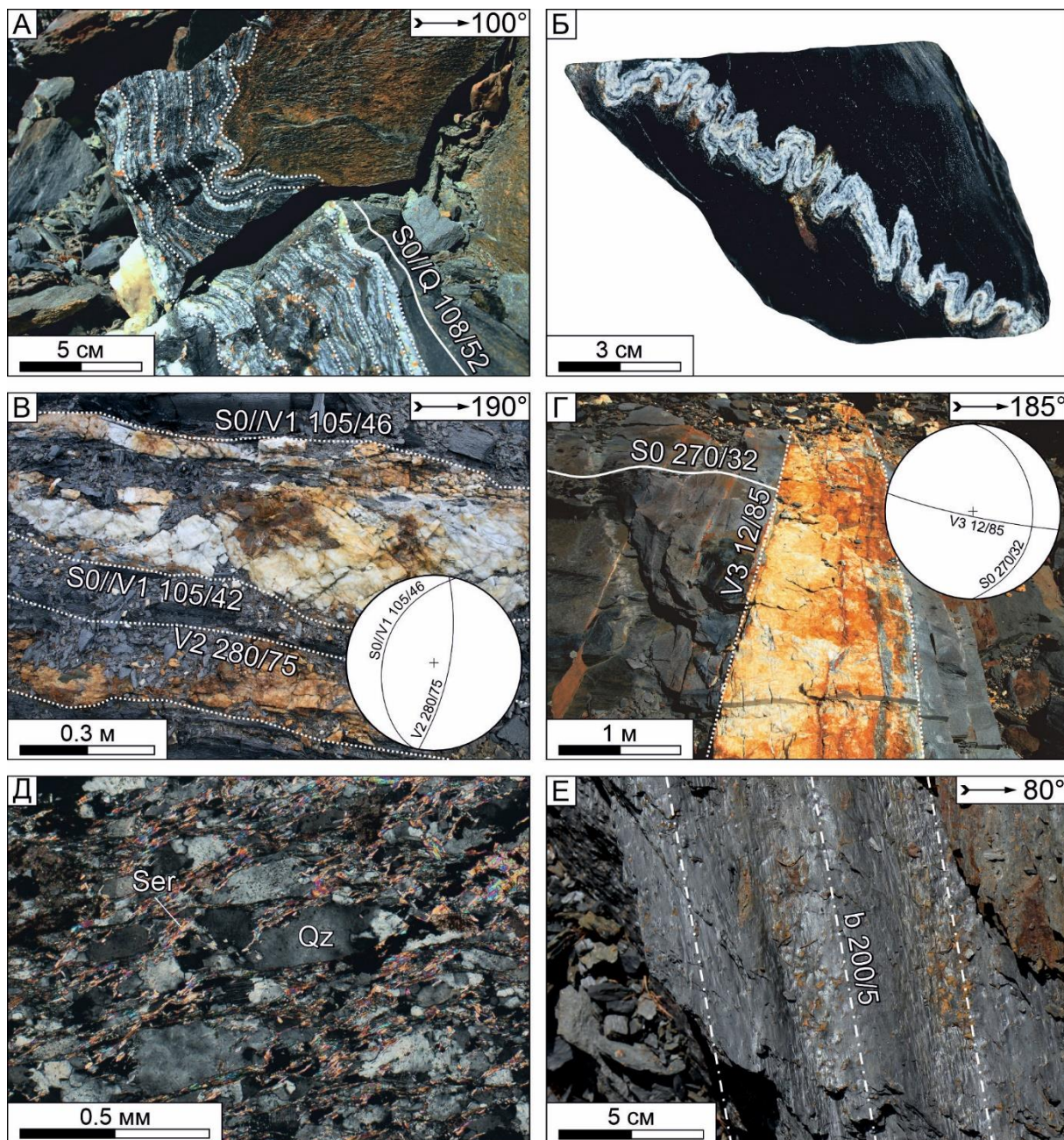


Рисунок 1 – Минерализация и деформационные структуры золоторудного месторождения Маринское

А-Б – раннеорогенные тонкополосчатые кварцевые прожилки; В-Г – позднеорогенные золото-кварц-карбонатные жилы; Д – сегрегационно-струйчатый сланцевый кливаж; Е – бугорчатость в западном крыле антиклинальной складки. Аббревиатура: Ser – серицит, Qz – кварц. На стереограммах дугами большого круга показаны (верхняя полусфера): S0 – слоистость, V – жилы.

К позднеорогенным структурам отнесены субмеридиональные крутопадающие разломы и золотоносные кварц-карбонатные жилы (содержание Au до 27.20 г/т) (Рисунок 1, В-Г). Протяженность разломов от 100 до 300 м, мощность до 1-2 м. Они сложены брекчией вмещающих пород. Встречаются поперечные близвертикальные разломы субширотного простирания протяженностью до 100-150 м. По взаимоотношению со слоистостью пород позднеорогенные золото-кварц-карбонатные жилы подразделяются на три системы (Рисунок 1, В-Г). Первая система V1 – согласные с залеганием пород жилы и прожилки (Рисунок 1, В). Вторая система V2 – близвертикальные и крутопадающие продольно-секущие жилы северо-северо-восточного простирания (Рисунок 1, В). В западном крыле жилы V1 пологопадающие, а

V2 крутопадающие, в восточном крыле наоборот. Третья система V3 представлена крутопадающими поперечными близширотными жилами (Рисунок 1, Г). Мощность рудных тел варьирует от 0.2 до 10 м (в среднем составляет 1-2 м), протяженность – от 60 до 260 м. Жилы сопровождаются пирит-серицит-карбонат-кварцевыми изменениями вмещающих пород. Мощность зон метасоматических изменений до первых м. Полюса жил V1-V2 на стереографической проекции располагаются вдоль субвертикального пояса σ_3/σ_1 , характерного для взбросо-надвигового поля напряжения (Рисунок 2, Б, В). Рассчитанные значения полей напряжения рудного этапа следующие: σ_1 – 18/88, σ_2 – 192/2, σ_3 – 282/2 и σ_1 – 288/58, σ_2 – 194/6, σ_3 – 100/32.

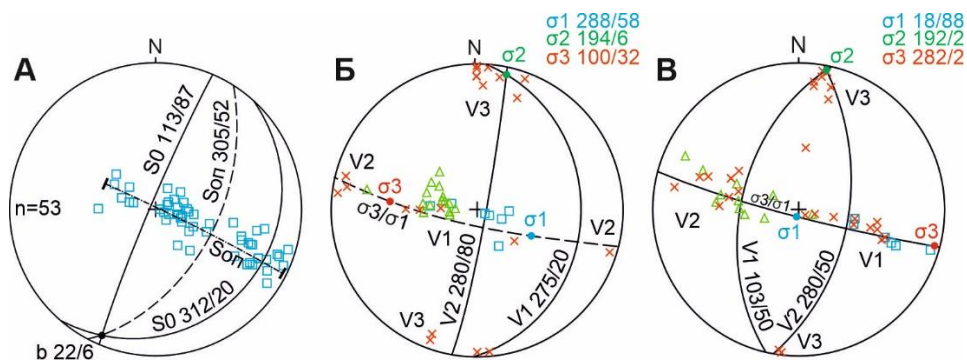


Рисунок 2 – Стереограммы полюсов слоистости (А), кварцевых жил западного крыла (Б) и кварцевых жил восточного крыла антиклинали (В) золоторудного месторождения Маринское.

На стереограммах показаны (верхняя полусфера): синие не залитые квадраты – полюсы слоистости, зеленые, не залитые треугольники – полюсы кливажа, красные крестики – полюсы жил, S0 – слоистость, Sоп – осевая поверхность, b – шарниры складок, □S0 – пояс полюсов слоистости, палеотектонические оси напряжения: σ_3 – сжатия, σ_2 – промежуточная, σ_1 – растяжения, n – количество замеров.

3. Выводы

Золото-кварцевое месторождение Маринское локализовано в замке одноименной асимметричной антиклинальной складки, нарушенной продольными разломами. Позднеорогенные хрупкие рудоконтролирующие структуры месторождения наложены на раннеорогенные хрупко-пластичные/пластичные деформации, что может свидетельствовать об эксгумации последних до рудообразования. Выделены три разноориентированные системы золотоносных жильно-прожилковых тел, сформированных во взбросо-надвиговом поле напряжений при субширотном сжатии. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возраст серицита из поперечной кварц-карбонатной жилы составил 119.4 ± 4.7 млн лет. Эта датировка соответствует времени кристаллизации крупных гранитоидных массивов и позднеорогенных золоторудных месторождений Аллах-Юньской зоны, ассоциирующих с астеносферным апвеллингом в тылу активной континентальной окраины.

4. Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке по плану НИР ИГАБМ СО РАН (проект FUFГ-2024-0006). Анализ изотопно-геохронологических данных поддержан РНФ (проект № 23-47-00064).

5. Литература:

- [1] Fridovsky, V.Y., Gamyarin, G.N., Goryachev, N.A. Geological and genetic model of the formation of stratified gold quartz deposits in the Southern Verkhoyansk region // Russian geology, 2006, no. 5, pp. 33-37.
- [2] Okunev, A.E., Fridovsky, V.Y. Prospects for the discovery of large orogenic gold deposits in terrigenous deposits of the Southern Verkhoyansk region // Ores and Metals. 2012, no. 5. pp. 22-29.

- [3] <https://www.polymetal.ru>.
- [4] Fridovsky, V.Y., Gamyarin, G.N., Polufuntikova, L.I. Metallogeny of gold and silver in Southern Verkhoyansk // Mining Journal. 2017, no. 6. pp. 9-15.
- [5] Fridovsky, V.Y. Structural control of orogenic gold deposits of the Verkhoyansk-Kolyma folded region, northeast Russia // Ore Geology Reviews. 2018, vol. 103. pp. 38-55.
- [6] Fridovsky, V.Y., Vernikovskaya, A.E., Matushkin, N., Kadilnikov, P., Kudrin, M.V., Tarasov, Y.A. U-Pb age, petrogenesis and geodynamic setting of the formation of rapakivi granites and associated rocks of the Tarbagannakh massif of the Allakh-Yun tectonic zone // Geology and mineral resources of the North-East of Russia: materials of the XIII All-Russian scientific and practical conference. Yakutsk: NEFU Publishing House, 2023, pp. 343-347.
- [7] Vernikovskaya, A.E., Fridovsky, V.Y., Rodionov, N.V., Matushkin, N.Y., Kadilnikov, P.I., Kudrin, M.V., Tarasov, Ya.A. Rapakivi Granites and Associating Magmatism during the Aptian Development Phase of the Siberian Craton Active Continental Margin (Northeast Asia) // Doklady Earth Sciences. 2024.
- [8] Prokopiev, A.V., Gamyarin, G.N., Bakharev, A.G., et al. Tectonics, geodynamics and metallogeny of the junction and interaction zone (interference) of the Verkhoyansk fold-thrust belt, the Okhotsk terrane and the Kolyma-Omolon microcontinent // Ore genesis and metallogeny of the East Asia. Yakutsk. 2006, pp. 141-145.
- [9] Prokopiev, A.V., Toro, J., Hourigan, J.K., Bakharev, A.G., Miller, E.L. The Middle Paleozoic-Mesozoic boundary of the North Asian craton and the Okhotsk terrane: new geochemical and geochronological data and their geodynamic interpretation // Stephan Mueller Spec. Publ. Ser., 2009, vol. 4, pp. 71-84.
- [10] Chugaev, A.V., Chernyshev, I.V., Gamyarin, G.N., et al. Rb/Sr isotope systematics of hydrothermal minerals, age and sources of matter of the Nezhdaninskoe gold deposit (Yakutia) // Reports of the Academy of Sciences. 2010, vol. 434, no. 4, pp. 534-539.
- [11] Bakharev, A.G., Gamyarin, G.N., Prokopiev, A.V., Zaitsev, A.I., Travin, A.V. Granitoid magmatism and forms of connection with it of gold mineralization of the Nezhdaninskoe ore-magmatic cluster // Geology, tectonics and metallogeny of the North Asian craton. Yakutsk. 2011, vol. 2, pp. 25-30.
- [12] Kondratieva, L.A., Anisimova, G.S., Zaitsev, A.I. Zaderzhninskoe gold deposit: mineral composition, fluid inclusions, age of formation (Southern Verkhoyansk) // Geology and Geophysics. 2018, vol. 59, no. 10, pp. 1606-1622.
- [13] Goryachev, N.A., Fridovsky, V.Y. Overview of early cretaceous gold mineralization in the orogenic belt of the eastern margin of the Siberian craton: geological and genetic features // Frontiers in Earth Science. 2024, vol. 11, pp. 1252729
- [14] Fridovsky, V.Yu., Polufuntikova L.I. Localization conditions for gold mineralization in the Marinskoye ore field (Southern Verkhoyansk) // Russian geology. 2011, no. 6, pp. 13-20.

СТРУКТУРЫ НИЖНЕЯНСКОГО ШАРЬЯЖА И Au-Sb-Hg ОРУДЕНЕНИЕ (СЕВЕРО-ВОСТОК ЯКУТИИ)

Валерий Фридовский, Максим Кудрин, Ярослав Тарасов
ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

STRUCTURES OF THE LOWER-YANA OVERTHRUST AND Au-Sb-Hg MINERALIZATION (NORTHEAST YAKUTIA)

Valery Fridovsky, Maxim Kudrin, Yaroslav Tarasov
Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. New data on the study of deformation structures of the Lower-Yana overthrust and the eastern flank of the Lower-Yana Au-Sb-Hg metallogenic zone are presented. The overthrust is manifested by melanged, shattered, dislensed debris of local rocks with chaotic blocks and rounded boulders of xenogenic carbonate formations with traces of large-scale movements. Heterochronous fold-thrust, strike slip and normal faults parageneses related with Mesozoic-Cenozoic regional tectonic processes are described. The Lower-Yana overthrust and poorly permeable Jurassic clastic rocks of allochthon served as a screen for trans-crustal Au-Sb-Hg ore-forming fluids ascending along the Yana fault zone.

1. Введение

Нижнеянский шарьяж выделяется на восточном фланге Куларского сектора Кулар-Нерского террейна (КНТ). По шарьяжу отложения средней-верхней юры Полоусно-Дебинского террейна перекрывают верхнетриасовые отложения Куларского сектора. Вдоль шарьяжа и субсогласного с его простиранием Янского трансорового разлома выделяются Буор-Юряхский, Байдахский, Кючусский и Точчумский рудные узлы Нижнеянской Au-Sb-Hg металлогенической зоны [1]. К западу от Нижнеянской зоны известны Центрально-Куларская Au-Sn-TR и Улахан-Сисская Au зоны. Разновозрастное оруденение этих зон располагается в полидеформированных отложениях, нарушенных разломами. Для всех типов минерализации проявлена взаимосвязь между структурами и локализацией рудных тел. Так для пермских отложений Улахан-Сисской зоны характерны пластические деформации, сланцевый кливаж, транспозиционные структуры и локализация орогенного золотого оруденения в shear-зонах двух продольных северо-восточных систем пологих надвигов встречной вергентности [2, 3]. В триасовых отложениях юго-восточного крыла Куларской антиклинали Au-Sb-Hg оруденение месторождения Кючус контролируется сбросо-сдвиговыми разломами юго-восточной вергентности, наложенными на ранние прогрессивные взбросо-надвиговые деформации. В смежных с Нижнеянским шарьяжем структурах Полоусно-Дебинского террейна золотое оруденение пространственно ассоциирует с малыми гранитоидными телами меридиональной Куйгинской полиметаллическо-золото-оловорудной и северо-восточной Абырабытской золото-вольфрам-оловорудной зон. В этой работе мы приводим новые данные изучения в береговых обнажениях среднего течения р. Яна деформационных структур Нижнеянского шарьяжа и восточного фланга Нижнеянской Au-Sb-Hg металлогенической зоны дополняющие рассмотренные в [4]. Правильное понимание структурного контроля важно для определения характеристик месторождений, их размещения, и, следовательно, более обоснованного планирования геолого-разведочных работ.

2. Структуры Нижнеянского шарьяжа

Выше устья руч. Абарабит в береговых обнажениях правого борта р. Яна Нижнеянский шарьяж проявлен меланжированными, раздробленными, развальцованными обломками

местных пород с хаотическими глыбами и окатанными валунами ксеногенных карбонатных образований со следами масштабных перемещений (рис. 1, А-Г). Разлом субсогласен с полого (S/S0 91-120/16-32) залегающими отложениями средней юры, на коротких участках пересекает их (S 40/30). Шарьяж и малопроницаемые юрские отложения аллохтона служили экраном для восходящих по зоне Янского разлома трансформированных рудообразующих флюидов. Стиль деформаций пород различен в аллохтоне и автохтоне шарьяжа.

Ранние тектоно-седиментогенные структуры *аллохтона* в обнажениях, расположенных на правом берегу р. Яна напротив устья руч. Кючус выражены подводно-оползневыми складками в горизонте аргиллитов мощностью около 1 м (рис. 1, Д). Их формирование обусловлено плотностными неоднородностями пород и наклоном рельефа во время осадконакопления. Характерными признаками складок оползания являются сложность и дисгармоничность их морфологии и стиля, что обусловлено не выдержанностью крыльев, разнонаправленностью осевых поверхностей и шарниров, срезанием в кровле поверхностью размыва. Мелкие размеры описанных подводно-оползневых складок указывают на слабую наклонность рельефа во время осадконакопления.

В надвиговых пластинах аллохтона проявлены внутрипластовые рампы, которые сопровождают развитие срывов при надвигообразовании и их перемещении с одного горизонта скольжения на другой (рис. 1, Е). В структурах аллохтона проявлены мелкие сбросы с видимой амплитудой до нескольких метров (рис. 1, Ж). Они смещают ранние складчато-надвиговые структуры. По анализу сопряженных систем разломов (S 125/75 и S 330/45) реконструируется сбросовое поле напряжений: $\sigma_1 - 136/16$, $\sigma_2 - 47/17$, $\sigma_3 - 262/65$.

Обычно складки широкие открытые и только в зонах поперечных разломов их интенсивность возрастает и простирание меняется от меридионального и северо-восточного до близширотного и северо-западного (рис. 1, И-Л), что указывает на их связь с несколькими деформационными событиями. Необходимо, отметить, что в юрских отложениях кливаж не проявлен. В целом, наиболее крупные складчатые структуры аллохтона имеют северо-восточное простирание близкое с простиранием (b 28/13) структур автохтона (рис. 1, Ж).

Структуры автохтона изучены в обнажениях левобережья р. Яна, в ~5 км выше пос. Усть-Куйга. Здесь можно наблюдать межпластовые рампы, складчато-разрывные деформации нескольких генераций, сланцевый кливаж, структуры начальной транспозиции, разнонаправленные борозды скольжения (рис. 2). Ранние структуры автохтона представлены межпластовыми надвиговыми перемещениями и рампами запад-юго-западного падения (S 255/40) (рис. 2, А). В слоистых алевролитах и аргиллитах с маломощными прослоями песчаников ладинского яруса проявлены структуры начальной транспозиции – хрупко-пластичные деформации (рис. 2, Б). Ранее подобные структуры были описаны в пермских отложениях Улахан-Сисской антиклинали Куларского сектора и в верхнекаменноугольных отложениях Южно-Верхоянья [2, 5]. Породы автохтона смяты в напряженные складки с кливажем осевой поверхности. Обычно складки имеют северо-восточное простирание с близгоризонтальными (b 238/4) (рис. 2, Г) и наклонными шарнирами (b 50/32) (рис. 2, В). Отмечаются также системы складок субширотного простирания (b 102/30 и b 268-273/10-12) (рис. 2, Д, Е). Они повторно коаксиально деформированы (b 288/10) в открытые складки того же простирания (рис. 2, Е, диаграмма 3). Реже можно наблюдать складки с крутыми шарнирами (аксоноклинали), связанные со сдвигами (рис. 2, Ж). Шарниры складок погружаются к юго-западу (b 222/66), северо-востоку (b 116/56) и северу (b 8/78) (рис. 2, Ж, З). Кливаж, в основном, северо-северо-западной (С1 125-180/20-85), реже юго-восточной (С1 320-345/55-75) вергентности (рис. 2, И). Он смят в открытые аксоноклинали (рис. 2, И).

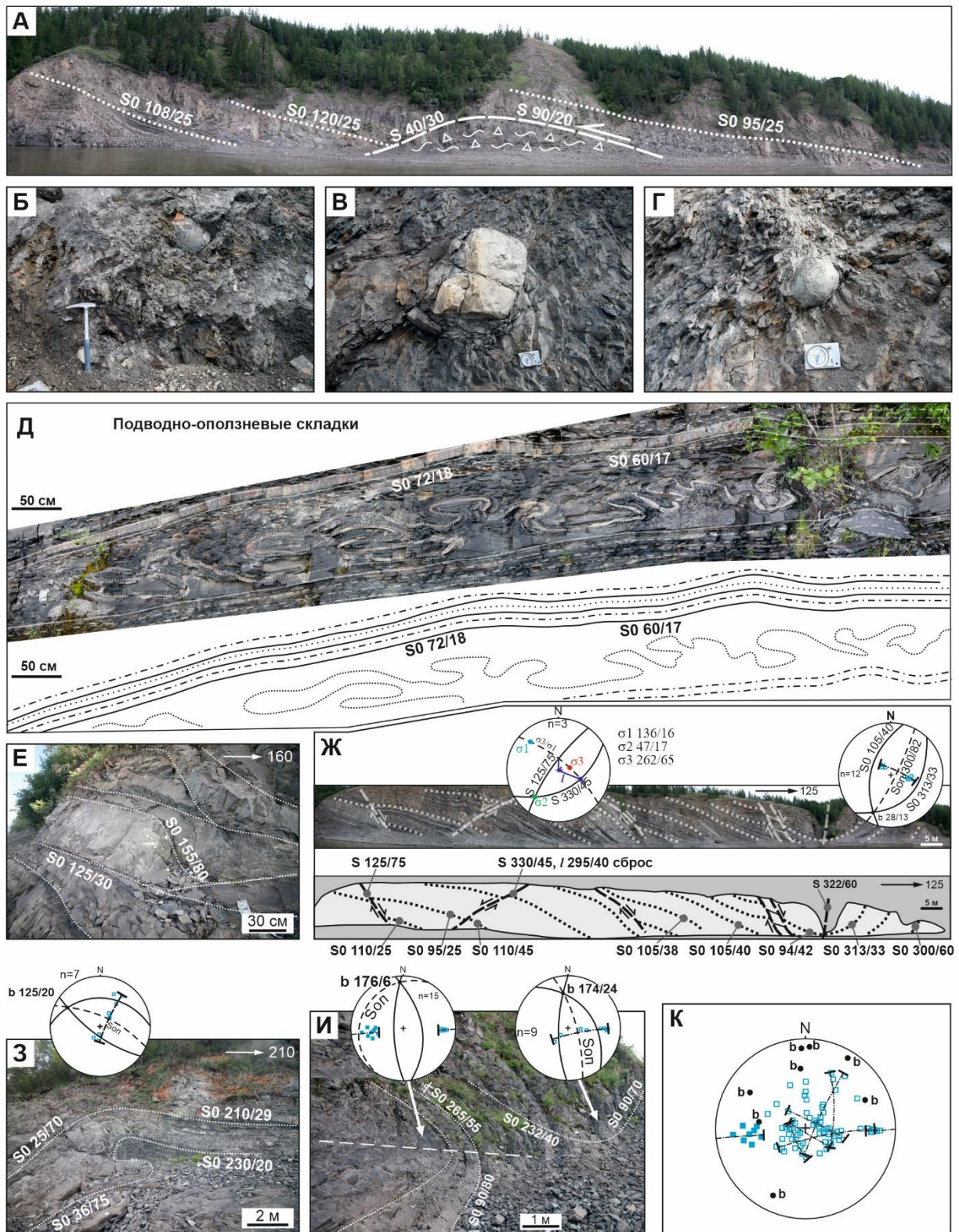


Рисунок 1 – Структуры аллохтона Нижнеянского шарьяжа

А – согласно-секущие взаимоотношения шарьяжа и юрских отложений аллохтона; Б-Г – ксеногенные валуны карбонатных пород в меланжированном, раздробленном и развальцованном матриксе местных пород; Д – подводно-оползневые складки; Е – внутрипластовые ramпы; Ж – сбросы в СЗ крыле синклинальной складки; З-И – складчатые деформации; К – полюса слоистости (нормальное залегание – синие незалитые квадраты, опрокинутое залегание – синие залитые квадраты), пунктирные линии – пояса полюсов слоистости). На стереограммах показаны (верхняя полусфера): S0 – слоистость, Sоп – осевая поверхность (пунктирная линия с точкой), S – разломы, b – шарниры складок, пунктирная

линия – пояса полюсов слоистости, палеотектонические оси напряжения: σ_3 – сжатия, σ_2 – промежуточная, σ_1 – растяжения, n – количество замеров.

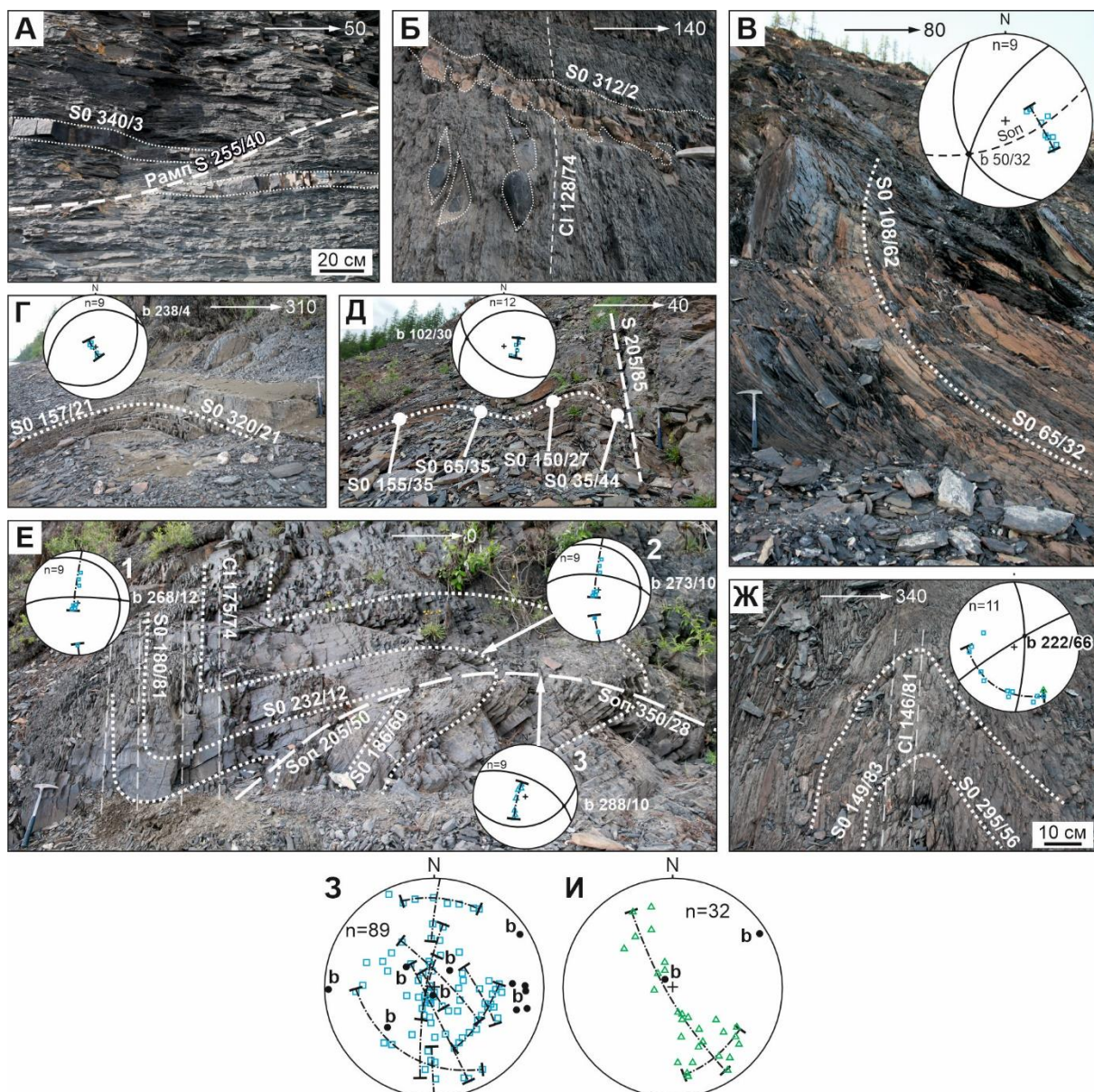


Рисунок 2 – Структуры автохтона Нижнеянского шарьяжа

А – рампы; Б – структуры начальной транспозиции; В-Г – складки северо-восточного простирания; Д-Е – близширотные складки; Ж – складка с крутым шарниром; 3-И – сводные диаграммы полюсов: 3 – слоистости, И – кливажа. На диаграммах: синие квадраты – полюса слоистости, зеленые треугольники – полюса кливажа.

3. Выводы

Структурные исследования зоны Нижнеянского шарьяжа позволяют сделать следующие краткие выводы:

1. Нижнеянский шарьяж выражен меланжированными, раздробленными, развальцованными обломками местных пород с хаотическими глыбами и окатанными валунами ксеногенных карбонатных образований со следами масштабных перемещений. Шарьяж и малопроницаемые юрские отложения аллохтона служили экраном для восходящих по зоне Янского разлома транскоровых Au-Sb-Hg рудообразующих флюидов.
2. Структуры аллохтона и автохтона Нижнеянского шарьяжа отличаются. В аллохтоне складки обычно широкие открытые и только в зонах поперечных разломов их интенсивность

возрастает. Простираение складок меняется от северо-восточного и меридионального до близширотного и северо-западного с преимущественно пологими шарнирами, что указывает на их связь с несколькими деформационными событиями. Наиболее крупные складчатые структуры аллохтона вблизи Нижнеянского шарьяжа имеют северо-восточное простираение близкое с простираением структур автохтона.

3. Структуры автохтона деформированы более интенсивно. Установлены межпластовые рампы, структуры начальной транспозиции, складки нескольких генераций, сланцевый кливаж и поздние сдвиговые структурные парагенезисы.

Разновозрастные структурные парагенезисы восточного фланга Нижнеянской Au-Sb-Hg металлогенической формировались в условиях компрессии, транспрессии и растяжения и отражают мезозойско-кайнозойские региональные тектонические процессы в Арктике и Северо-Восточной Азии.

4. Благодарности

Исследование выполнено за счёт государственного задания ИГАБМ СО РАН.

5. Литература:

- [1] Gertseva, M.V., Borisova, T.P., Chibisova, E.D., Kotov, I.A., Istoshina, E.B., Abramov, I.V., Golota, L.E. The State Geological Map of the Russian Federation on a scale of 1 : 1,000,000. The third generation. Verkhoyansk-Kolyma series. Sheet R-53 – Nizhneyansk. Explanatory note / Ministry of Natural Resources of Russia, Rosnedra, FSBI «VSEGEI», FSBI «VSEGEI» Moscow branch. Saint-Petersburg: VSEGEI, 2020, 320 pp.
- [2] Fridovsky, V.Y. Deformations and mineralization of the Kular segment of the Kular-Nera shale belt (Eastern Yakutia) // News of higher educational institutions. Geology and exploration, 1996, no. 4, pp. 64-71.
- [3] Fridovsky, V.Yu. Kular metallogenic zone: metamorphogenic Au and quartz deposits. In the book (ed. L.M. Parfenov and M.I. Kuzmin) // Tectonics, geodynamics and metallogeny of the territory of the Republic of Sakha (Yakutia). M.: MAIK “Nauka/Interperiodika”, 2001, pp. 199-255.
- [4] Oxman, V.S. Structural studies in the Kular ridge // Geology and ore content of Yakutia. Yakutsk: YSU, 1989, pp. 3-12.
- [5] Fridovsky, V.Y. Structures of early collisional gold deposits of the Verkhoyansk fold-thrust belt // Pacific Geology, 1998, vol. 17(6), pp. 26-36.

**ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЗОЛОТОРУДНОГО
ОРУДЕНЕНИЯ ДАЙКОВОГО ТИПА
(НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ШАХТНОЕ)**

Ибрагим Хасанов¹, Татьяна Михалицына², Диана Макарова³
ФГБУН «Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский
институт им. Н.А. Шило ДВО РАН», 685000, Россия, г.Магадан, ул. Портовая, 16

**GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF GOLD ORE
MINERALIZATION OF THE DYKE TYPE (ON THE EXAMPLE OF THE
SHAKHTNOYE DEPOSIT)**

Ibrahim Khasanov¹, Tatiana Mikhailitsyna², Diana Makarova³
North-East Interdisciplinary Scientific and Research Institute FEB RAS,
16 Portovaya st., Magadan, 685000, Russia

Abstract. The paper presents the results of processing geophysical materials. It has been established that in this research area, rocks are quite contrasting in physical properties. However, the ore-bearing dyke bodies represented by beresitized diorite porphyrites differ slightly in physical characteristics from the carbonaceous, sulfidized and shale sedimentary rocks that contain them. The use of approaches based on statistical processing techniques in the interpretation of geophysical data made it possible to establish geological and geophysical signs of gold quartz mineralization of the dyke type and thus predict gold mineralization.

1. Введение

Систематическое геологическое изучение территории Чай-Урьинской площади начато в 30-х гг. XX века и продолжается по настоящее время. Постоянный интерес связан с наличием в долине р. Чай-Урья богатейшей россыпи золота, из которой добыто более 200 т. металла, и надеждами на обнаружение ее коренных источников. В результате ранее проведенных (2017-2022 гг.) поисково-оценочных и разведочных работ в центральной части Чай-Урьинской площади было выявлено золоторудное месторождение Урьинское, что повышает вероятность обнаружения в пределах рассматриваемой территории новых мелких объектов.

Целью проведенных работ являлось изучение геофизических характеристик дайкового морфогенетического типа золотого оруденения, определения аномального эффекта от объектов рудной минерализации.

Геофизические исследования (электропрофилирование) проводились с помощью аппаратного комплекса: АИЭ-2 по методике срединного градиента в модификации вызванной поляризации (СГ-ВП) на частоте 0.3 Гц. Питаящая линия АВ=800-900 м, приемная MN=10 м.

Результаты геофизических наблюдений обработаны программным комплексом спектрально-корреляционного анализа данных (КОСКАД, блок «Статистика») с целью выделения и уточнения взаимной зависимости геофизических параметров с рудной минерализацией [1].

2. Геолого-геофизическая характеристика района работ

Район исследований расположен на территории Чай-Юрьинской рудной зоны, приуроченной к зоне сочленения двух региональных структур Яно-Колымского орогенного пояса - Аян-Юряхского антиклинория (юго-запад) и Иньяли-Дебинского синклинория (северо-восток). Эти структуры разделены глубинной Чай-Юрьинской зоной разломов, которая в современном рельефе, в границах участка, трассируется долиной реки Чай-Урья. Разлом сопровождается зоной интенсивного смятия (шириной 4-6 км), имеющей северо-западное простирание,

генеральное падение к юго-западу и левосторонний взбросово-сдвиговый тип смещения. С зонами тектонических нарушений связано образование пропилит-березитовых метасоматитов и соответственно, проявления оруденения золотокварцевой формации.

Территория рудного поля сложена морскими терригенными, вулканогенно-терригенными породами, от поздней перми до средней юры. Осадочные отложения прорваны штокообразными интрузивными телами и многочисленными дайками, образующими ареолы разнообразной формы и направления. Основной тип золоторудной минерализации месторождения Шахтное парагенетически связан с дайками nera-бохапчинского комплекса (J_3nb).

Геологическое обоснование месторождения Шахтное. Данное месторождение представлено несколькими субпараллельно расположенными окварцованными и березитизированными дайками диорит-порфиров. Вмещающие породы – березитизированные аргиллиты и углистые аргиллиты с редкими прослоями алевролитов и песчаников. Общее простирание даек северо-западное, примерно, совпадающее с простиранием осадочных пород. Первичный состав даек устанавливается по реликтовым структурам, а сами дайки сложены вторичными минералами (Рисунок 1). Оруденение приурочено к наиболее окварцованным (с прожилками) участкам, располагающимся в дайках в виде полос или зон.

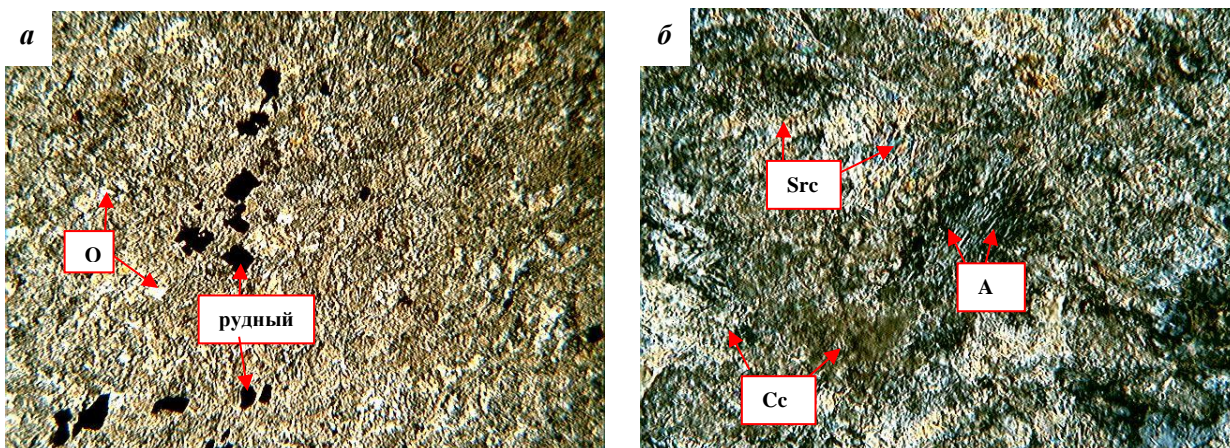


Рисунок 1 – Кварц-альбит-карбонат-серицитовый метасоматит с рудной минерализацией (полнопроявленный березит): а – объектив 2,5, без анализатора; б – объектив 10, с анализатором.

Рудная минерализация представлена пиритом, пирротинном, арсенопиритом, галенитом, халькопиритом, самородным золотом.

Геофизические исследования. Структура геомагнитного поля Чай-Урьинской площади определяется резко-положительными аномалиями на северо-востоке и отрицательными на юго-западе. Территория исследований охватывает фрагмент Чай-Юрьинского разлома. Он отчетливо фиксируется в магнитном поле зоной ярко выраженного интенсивного градиента, максимум которого разграничивает спокойное слабо отрицательное поле, характерное для брахиморфной складчатости Аян-Юряхского антиклинория, и напряженное дифференцированное знакопеременное магнитное поле, фиксирующее интенсивно линейные дислоцированные образования Иньяли-Дебинского синклиория (Рисунок 2).

По данным специализированных лабораторных исследований повышенные магнитные свойства наиболее отчетливо проявляют измененные осадочные породы, как правило, содержащие пирротин. Пирротиновая минерализация обусловлена метаморфогенно-гидротермальными процессами, проявившимися в зонах интенсивной трещиноватости, и соответствует времени образования и внедрения гранитоидных интрузий.

Наиболее значимые рудопроявления и мелкие месторождения располагаются в зоне влияния Чай-Юрьинского разлома и приурочены к узлам пересечения его со скрытыми разрывными

нарушениями северо-восточного простирания. По этому признаку можно прогнозировать несколько перспективных участков в пределах Чай-Урьинской площади (Рисунок 3).

Наиболее представительными объектами дайкового типа золотого оруденения на площади является месторождение Шахтное. В пределах территории этого месторождения наземными геофизическими исследованиями (методом срединного градиента - СГ-ВП), было изучено строение прогнозируемых рудных зон.

Рудоносные дайки регистрируются зонами градиента параметра удельного сопротивления (Рисунок 3-1) и аномалиями его трансформант – эксцесса, асимметрии и регрессии (Рисунок 4). Все известные и потенциально рудоносные дайковые тела приурочены к краевым частям линейных аномалий вызванной поляризации (ВП) интенсивностью до 15-25% и фиксируются зонами градиента этого параметра (Рисунок 3-2). Сами аномалии ВП указывают положение зоны дробления с интенсивной сульфидной минерализацией (возможно с графитизацией), являющихся элементами Чай-Юрьинского разлома высокого порядка. По указанным геофизическим признакам дайковая потенциально рудоносная зона прослежена по простиранию к северо-западу и юго-востоку до 2000 метров при средней мощности 30-60 метров. Таким образом, представленный на площади месторождения дайковый тип золотого оруденения, находит достаточно отчетливое отражение.

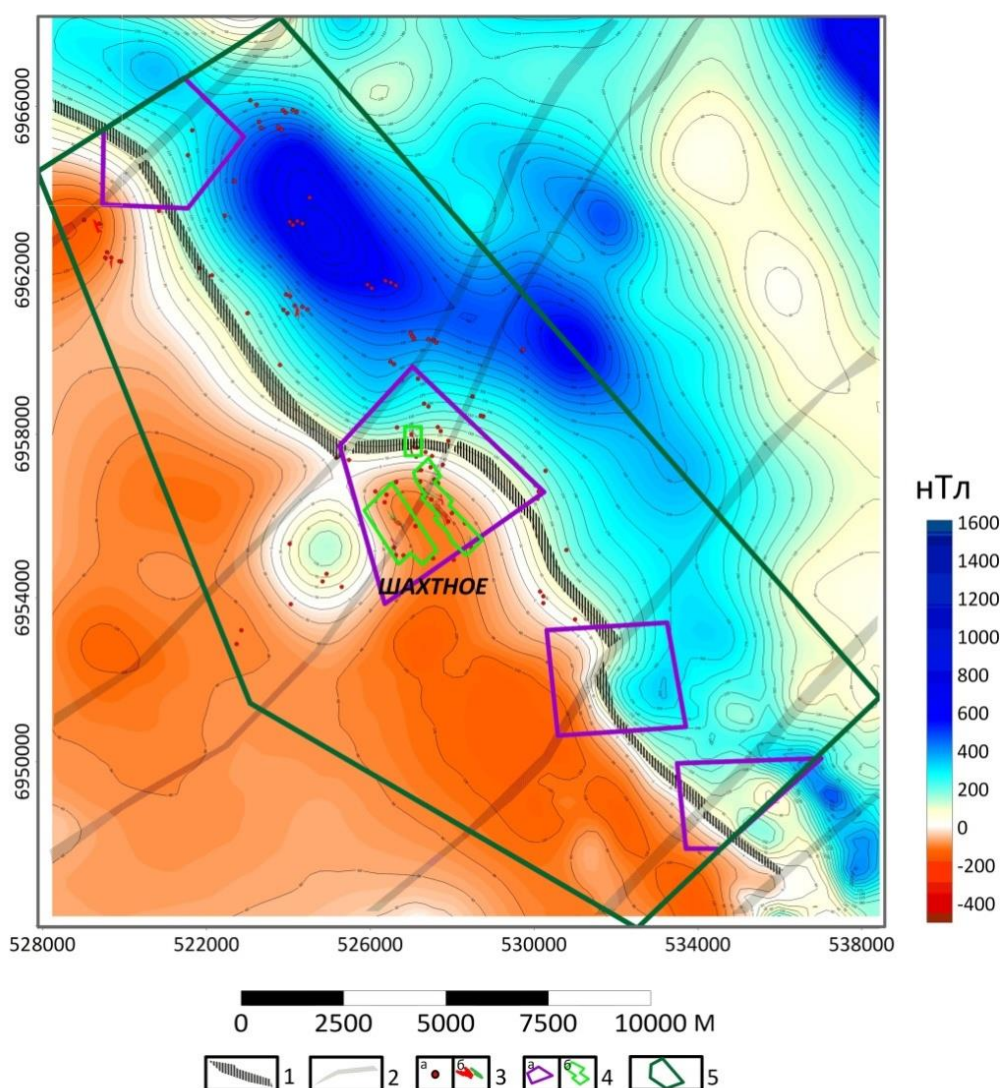


Рисунок 2 – Геомагнитное поле Чай-Урьинской площади: 1 – зона Чай-Юрьинского глубинного разлома; 2 – скрытые разломы северо-восточного простирания; 3 – точки рудной минерализации (а) и зоны кварцевого прожилкования (б); 4 – перспективные участки: а) крупные, б) мелкие; 5 – Чай-Урьинская площадь.

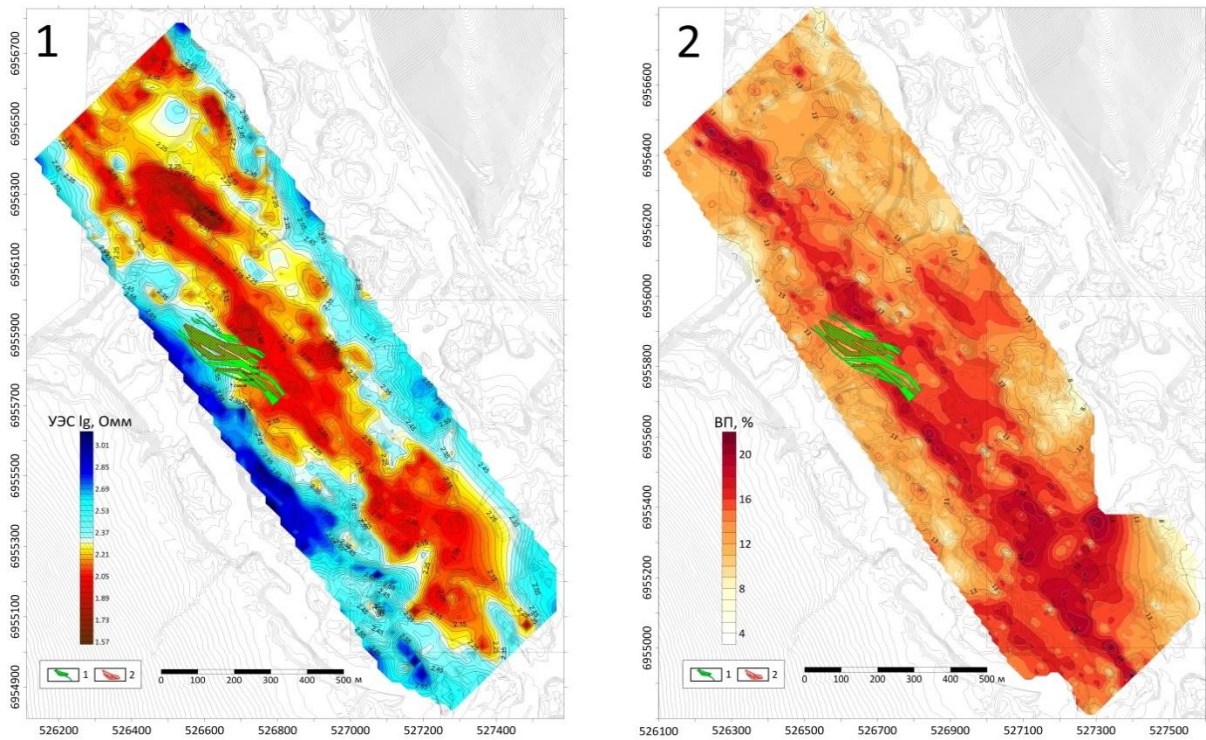


Рисунок 3 – План изолиний удельного электрического сопротивления - 1, план изолиний вызванной поляризации - 2. Месторождение Шахтное.

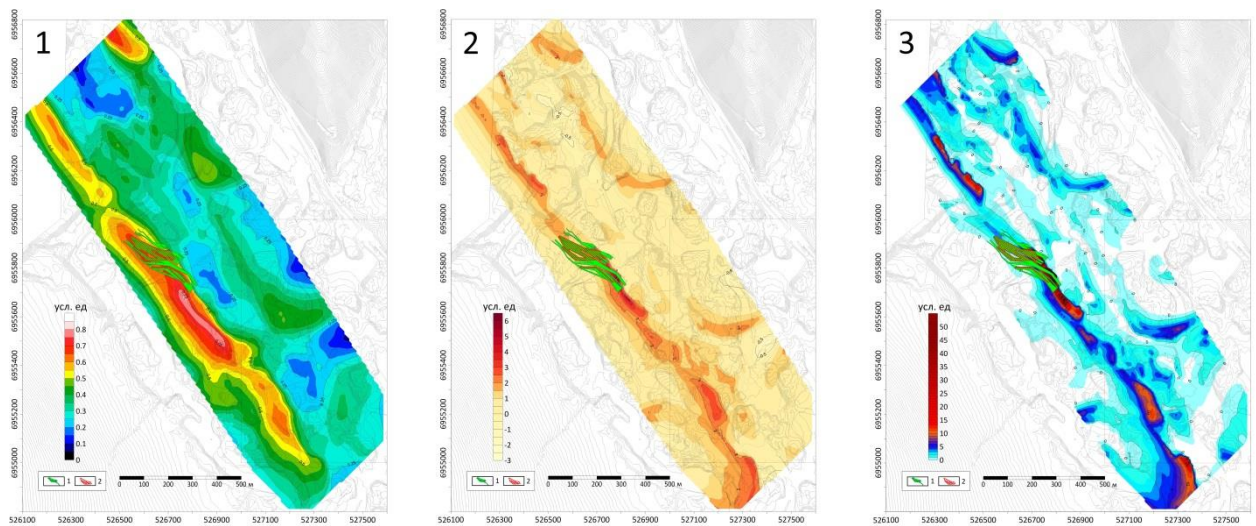


Рисунок 4 – Планы изолиний регрессии -1, асимметрии - 2 и эксцесса -3, удельного сопротивления. Месторождение Шахтное

3. Выводы

1. Представленный комплекс работ способен решать задачи прогноза золотого оруденения в зоне влияния Чай-Юрьинского разлома Яно-Колымской металлогенической системы.
2. На основании интерпретации геофизических данных намечены поисковые геолого-геофизические признаки золотокварцевого оруденения в пределах рудного поля.

3. Одним из основных методических приемов интерпретации при определении поисковых признаков потенциально рудных зон являются электроразведочные исследования методом вызванной поляризации.

4. Благодарности

Авторы выражают благодарность руководству ООО «Золотодобывающая Корпорация» в возможности проведения полевых работ на исследуемой площади.

5. Литература:

[1] Instructions for Using the COSKAD 3DT Spectrum-Correlation Analysis Complex. Moscow: Moscow State University, 2004. p. 64.

**ПРОБЛЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ ЛИТОСФЕРЫ И «АЛМАЗНОГО
ОКНА» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОНОМИНЕРАЛЬНОЙ
ГЕОТЕРМОБАРОМЕТРИИ ДЛЯ ПЕРИДОТИТОВЫХ ГРАНАТОВ
КИМБЕРЛИТОВОЙ ТРУБКИ ИМ. XXIII СЪЕЗДА КПСС**

Игорь Яковлев^{1,2}, Владимир Мальковец^{1,2}, Анастасия Гибшер^{1,2}, Максим Милаушкин^{1,2}

1 АК «АЛРОСА» (ПАО), 630007, Россия, г. Новосибирск, ул. Советская 5

2 ФГБУН «Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева»,
630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3

**PROBLEMS OF DETERMINING THE THICKNESS OF THE LITHOSPHERE AND
THE DIAMOND WINDOW USING THE MONOMINERAL THERMOBAROMETRY
FOR PERIDOTITIC GARNETS FROM THE KIMBERLITE PIPE 23rd PARTY
CONGRESS**

Igor Yakovlev^{1,2}, Vladimir Malkovets^{1,2}, Anastasiya Gibsher^{1,2}, Maksim Milaushkin^{1,2}

1 PJSC «ALROSA», 5, Sovetskaya str., Novosibirsk, 630007, Russia

2 Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3, Akademika Koptyuga ave.,
Novosibirsk, 630090, Russia

Abstract. The results of studying 339 garnets from a concentrate of the heavy fraction obtained after thermochemical dissolution of kimberlite samples from the pipe 23rd Congress of the CPSU. The chemical composition of garnets was determined by the EPMA method; the content of rare elements in garnets was determined by the ICP MS method. Based on the content of the main elements, it was determined that the sample is sharply dominated by peridotite parageneses, with a large proportion of garnets belonging to the harzburgite-dunite paragenesis - 51.9% (according to CaO-Cr₂O₃ contents). Moreover, out of 310 peridotite garnets, 220 grains (71%) have Cr₂O₃ >5 wt. % and about 17% of garnets belong to the diamond association (Sobolev, 1974). The rare earth composition of garnets, as well as the presence of high-calcium wehrlite garnets (~10%) in the sample, indicates a significant degree of lithospheric reworking by carbonatite melts/fluids. When reconstructing the paleohoterm using the calculated P-T parameters of garnets, the heat flow value was 35.3 mW/M², and the thickness of the lithosphere was about 250 km, the thickness of the diamond window was about 40 km. However, an ambiguous situation arises in which the method of calculating the “Y edge” (the depleted boundary of the lithosphere, according to Griffin, 1995) may not work correctly. Since the sample almost completely lacks high-titanium garnets (TiO₂>0.5%), indicating the transformation of lithospheric mantle rocks by silicate metasomatic agents, the “Y edge” determined at a depth of about 160 km may also indicate the absence of garnet-bearing rocks below this boundary. Also, the “diamond window” can extend to great depths.

1. Введение

Проблемы поиска и оценки коренных алмазоносных месторождений за последние два десятилетия приобрели особую актуальность в алмазодобывающей индустрии. За этот период значительно сократилось количество обнаруженных алмазоносных кимберлитовых тел, что наводит на мысль о необходимости пересмотра и совершенствования существующих методов и подходов их поиска.

Для разработки более эффективных методов поиска и оценки месторождений алмаза важно понимать процессы, при котором образовались не только эти месторождения, но и сами алмазы. В настоящее время достоверно известно, что генезис большинства алмазов из кимберлитов, связан с субконтинентальной литосферной мантией, их образование происходит

при высоких давлениях, на глубинах 150-250 км и температурах 900-1400°C, а сами кимберлиты являются лишь транспортерами алмаза к земной поверхности.

Кимберлитовая трубка им. XXIII съезда КПСС относится к Мирнинскому кимберлитовому полю (Мало-Ботуобинский район, Сибирский кратон). Трубка характеризуется уникальными по качеству и цвету алмазами и в настоящее время полностью отработана. Среди алмазов преобладали октаэдры (более 75 %), 6 % составляли ромбододекаэдры и около 20 % кристаллы комбинационных форм [1]. В ранних работах по датированию методом треков по цирконам, возраст трубки определен как 433 ± 16 млн. лет [2], однако в настоящее время эти данные ставятся под сомнение. По аналогии с остальными кимберлитовыми телами Мирнинского поля предполагается, что кимберлиты трубки им. XXIII съезда КПСС также внедрялись в среднепалеозойскую эпоху (D_3-C_1).

Геотермальный режим и мощность литосферной мантии под Мирнинским кимберлитовым полем ранее исследованы по составам минералов спутников алмаза трубок Мир, Интернациональная, Таежная и Амакинская [3], тепловой поток составил 35 мВт/м^2 , а мощность литосферы около 190 км, однако в данной работе использовалась устаревшая модель геотермы (Pollack, Chapman (1976) [4]). В работе [5] приводятся новые исследования термального режима литосферной мантии под трубкой Мир, с использованием “прямой” модели геотермы (Hasterok, Chapman (2011) [6]), тепловой поток составил 37 мВт/м^2 , а мощность литосферы около 210 км.

В данной работе исследованы геотермальный режим, мощность литосферы и мощность “алмазного окна” трубки им. XXIII съезда КПСС, по результатам исследования состава гранатов, отобранных после термохимического разложения кимберлитовых проб.

Химический состав гранатов определялся методом РСМА на приборе Jeol JXA 8100 в ОЛО ГРП (ЦАЛ) (г. Мирный). Определение содержания редких элементов в гранатах проводилось методом масс-спектрометрии с использованием квадрупольного масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой XSERIES2 (Thermo Scientific), объединенного с устройством лазерного пробоотбора с длиной волны 213 нм (New Wave Research, Nd:YAG твердотельный лазер) в НГУ (г. Новосибирск). Для определения РТ условий образования гранатов использовались Ni-in-Gar геотермометр и Cr-in-Gar геотермобарометр [7].

2. Результаты исследования состава гранатов кимберлитовой трубки им. XXIII съезда КПСС.

Исследованы составы 339 гранатов из концентрата тяжелой фракции, полученные после термохимического растворения кимберлитовых проб трубки имени XXIII съезда КПСС. Все исследованные гранаты имеют размерность -1+0,5.

Среди изученных гранатов значительная часть (более 90%) представлена гранатами перидотитового парагенезиса. По классификации (Schulze, 2003 [8]) 2 граната (0,6 %) относятся к мегакристовой ассоциации. Среди перидотитовых гранатов преобладают зерна гарцбургит-дунитового парагенезиса (176 зерен, 51,9%), к лерцолитовым гранатам относится 101 (29,8%) зерно, к верлитовым 33 (9,7%) зерна. При этом из 310 перидотитовых гранатов 220 зерен (71%) имеют содержания $\text{Cr}_2\text{O}_3 > 5 \text{ мас. \%}$ (рисунок 1 а).

В поле включений в алмазах (алмазная ассоциация по Соболев, 1974 [9]), попадают 52 граната (16,8 % от перидотитовых). Также обнаружено 27 (8%) гранатов эклогитового состава, из них (по классификации Coleman et al., 1965) 19 гранатов попадают в поле эклогитов группы А, 8 в поле эклогитов группы В. Из эклогитовых гранатов 23 зерна (85%) имеют содержания $\text{Na}_2\text{O} > 0,07 \text{ мас. \%}$ сформировались (по Gurney, 1993) в поле стабильности алмаза.

По классификации (Ramsay, 1993 [10]) резко преобладают гранаты с низким содержанием титана – гранаты из зернистых перидотитов (312 зерен, 92%), три зерна граната попадают в область характерную для деформированных перидотитов, пять зерен гранатов – в область мегакристов (Рисунок б). Среднее содержание TiO_2 в перидотитовых гранатах составляет 0,27 мас. % (медиана 0,29 мас. %) (рисунок 1 б).

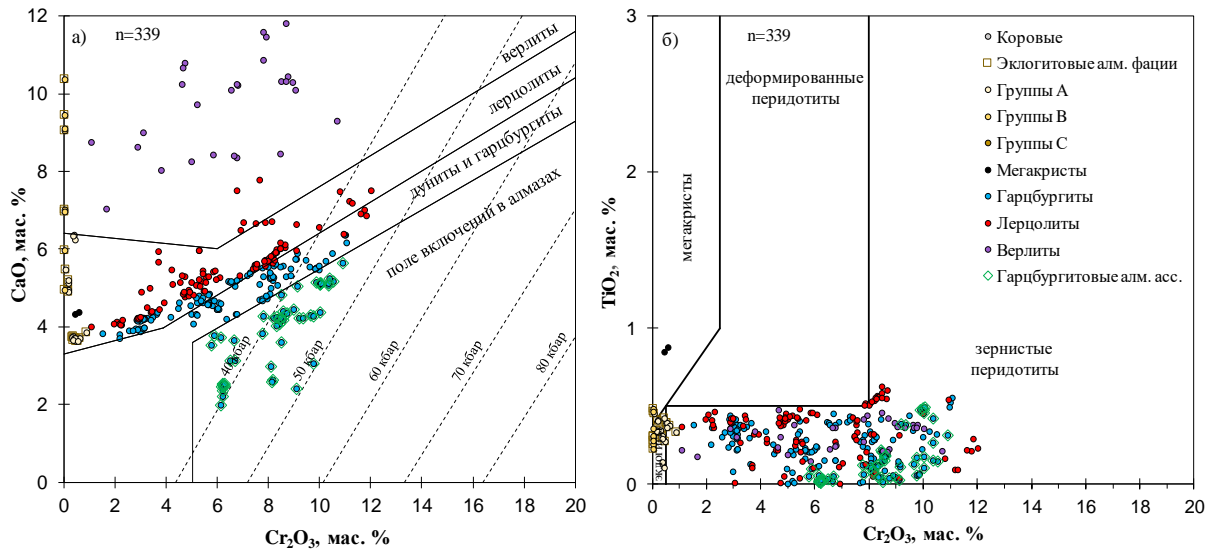


Рисунок 1 – Особенности химического состава гранатов кимберлитовой тр. им. XXIII Съезда КПСС. Цветом обозначена парагенетическая классификация по (Schulze, 2003); а) классификация перидотитов CaO-Cr₂O₃ по (Соболев, 1974), изобары Cr-в-гранате рассчитаны для геотермального градиента 38 мW/m² (Grütter et al., 2006); б) классификация TiO₂-Cr₂O₃ по (Ramsay, 1993).

Исследован редкоземельный и редкоэлементный состав гранатов. При описании редкоземельного и редкоэлементного состава гранатов использовалась парагенетическая классификация по (Griffin, 1995), в выборке выделено 134 гарцбургитовых граната, из которых 14 относятся к низкокальциевым гарцбургитовым, 140 лерцолитовых, 34 верлитовых и 31 низкохромистый (Cr₂O₃<1,5 мас.%) гранат (эклогитовые/пироксенитовые).

Для гарцбургитовых гранатов, как правило, характерны синусоидальные спектры распределения REE с повышенными содержаниями LREE и пониженными содержаниями MREE. Такие распределения REE отражают воздействие карбонатитового метасоматического агента, обогащенного LREE, и характерны для минеральных включений перидотитовых гранатов в алмазах. Однако для гранатов кимберлитовой тр. имени XXIII Съезда КПСС лишь ~60% гарцбургитовых гранатов имеют такие спектры, при этом для всех низкокальциевых гарцбургитовых гранатов характерны синусоидальные спектры распределения REE (рисунок). Для гранатов с синусоидальными спектрами наблюдаются различные степени обогащения LREE, что можно заметить по смещению пика обогащения от Ce до Eu. Для остальных ~40% гарцбургитовых гранатов характерны спектры распределения редкоземельных элементов, типичные для гранатов из фертильной мантии (высокие содержания MREE и HREE и обеднение LREE с La/Yb<1), либо спектры с незначительным понижением содержаний MREE. Такое соотношение можно объяснить высокой пропорцией “переходных” гранатов, расположенных вблизи границы гарцбургиты/лерцолиты на диаграмме CaO-Cr₂O₃ (рисунок 2).

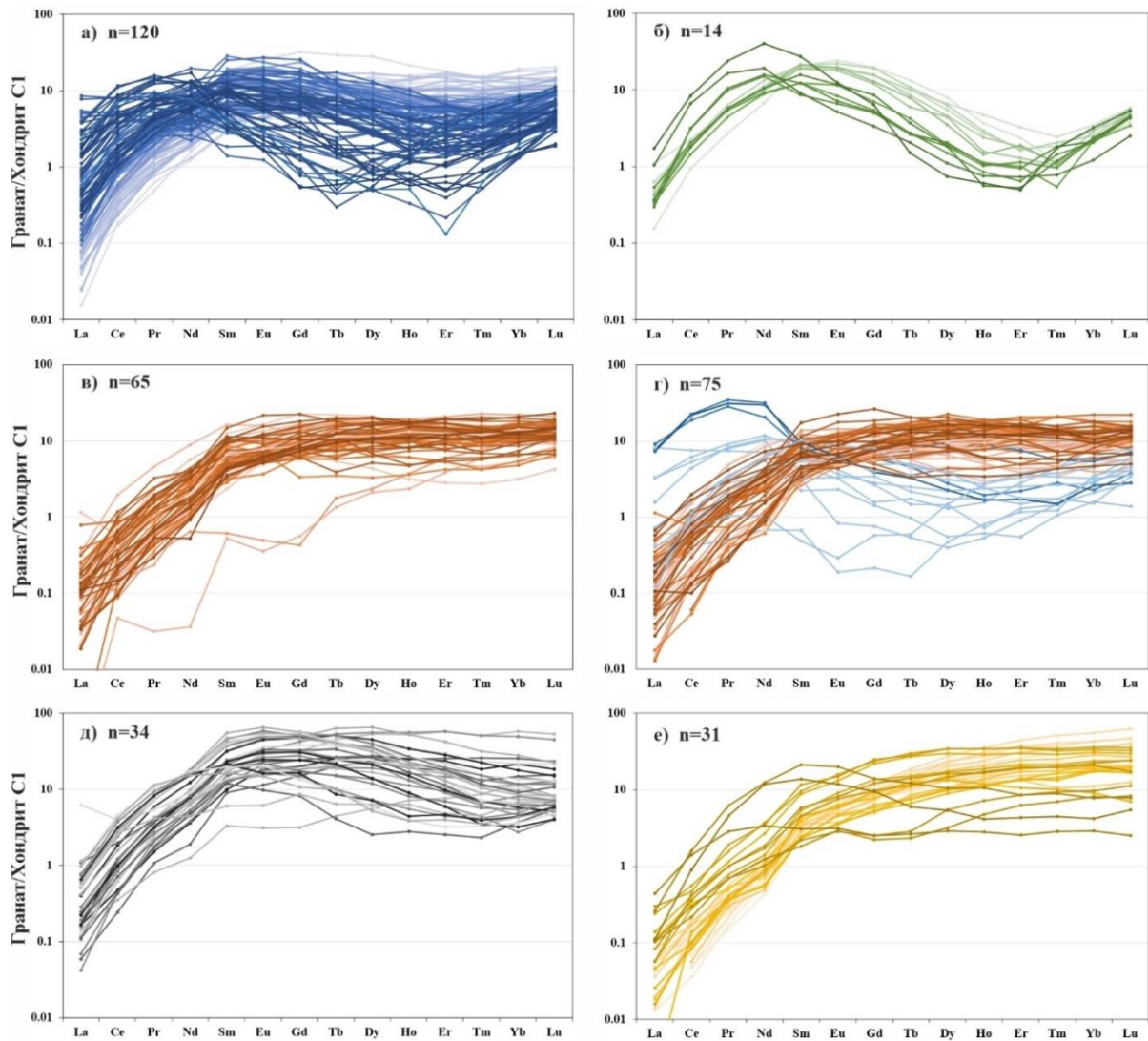


Рисунок 2 – Спектры распределения REE для различных групп генетических типов гранатов (по Griffin, 1995) тр. имени XXIII съезда КПСС: а) гарцбургитовые, б) низкокальциевые гарцбургитовые, в) лерцолитовые гранаты с содержаниями $\text{Cr}_2\text{O}_3 < 5$ мас.%, г) лерцолитовые гранаты с содержаниями $\text{Cr}_2\text{O}_3 > 5$ мас.%, д) верлитовые, е) низкохромистые (эклогитовые/пироксенитовые).

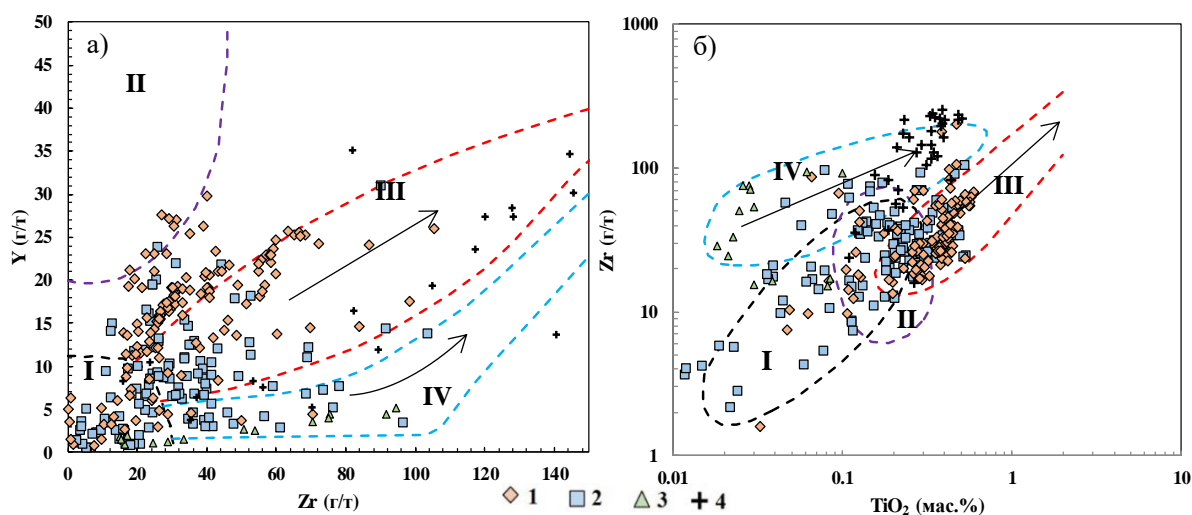
Для лерцолитовых гранатов характерны спектры REE типичные для гранатов из фертильной мантии, однако для лерцолитовых гранатов с содержаниями $\text{Cr}_2\text{O}_3 > 5$ мас. % наблюдаются также синусоидальные спектры REE (около 7% от всех лерцолитовых гранатов), причем для части из них характерны крайне высокие содержания LREE (содержания Pr, Nd превышают хондритовые в 30 и более раз, La и Ce в 9 и 20 раз, соответственно). Это может указывать на крайне высокие степени карбонатитового метасоматоза и отсутствие в системе клинопироксена, кристаллизация которого приводит к значительному снижению содержаний LREE в гранате.

Спектры распределения REE для верлитовых гранатов отражают наивысшие степени обогащения LREE, с пиками на Nd (максимальное значение 20 хондритовых), Sm (максимальное значение 55 хондритовых), Eu (максимальное значение 64 хондритовых). Также для них характерны большие вариации по содержаниям HREE (от 3 до 57 хондритовых). Таким образом для верлитовых гранатов форма спектров REE варьирует от синусоидальных до “нормальных” (типичных для гранатов из фертильной мантии), но при этом наблюдаются высокие степени обогащения как LREE, так и HREE.

Низкохромистые гранаты ($\text{Cr}_2\text{O}_3 < 1,5$ мас. %) в целом имеют “нормальные” спектры REE (обедненные LREE обогащенные HREE), для трех гранатов наблюдается повышение содержания LREE (рисунок 2).

Концентрации и корреляции Zr, Y, Ti в гранатах отображают воздействие различных метасоматических агентов на породы литосферной мантии. Низкие концентрации данных элементов ($\text{Zr} < 10$, $\text{Y} < 15$, $\text{Ti} < 1000$ г/т) в гранатах могут указывать на то, что мантийные перидотиты представляют собой рестит плавления примитивной мантии и, скорее всего, не подвергались воздействию мантийного метасоматоза.

Для трубки имени им. XXIII съезда КПСС характерны гранаты с пониженными (относительно типичных кимберлитовых тел ЯАП) содержаниями TiO_2 (>90% исследованных зерен содержат $\text{TiO}_2 < 0,5$ мас.%). На диаграммах Y-Zr, Zr-TiO₂ преобладающая часть фигуративных точек гранатов лерцолитового парагенезиса (~85%) ложатся в поле, отражающее воздействие силикатных метасоматических агентов, однако их составы смещены в сторону гранатов, характерных для фертильной мантии. Для таких гранатов характерны повышенные содержания Y (>15-20 г/т), умеренные содержания Zr (до 40 г/т), а также низкие содержания TiO_2 (менее 0,3 мас.%). Для гранатов гарцбургитового парагенезиса более характерны пониженные содержания Y, Zr, Ti. Большинство зерен лежат в области деплетированных перидотитов, либо имеют повышенные содержания Zr (>30 г/т), что может указывать на вклад низкотемпературного флогопитового метасоматоза и/или преобразование пород литосферной мантии карбонатитовыми метасоматическими агентами. Особенно такой тренд характерен для низкокальциевых гарцбургитовых гранатов, для которых содержания Y не превышают 5 г/т, а Zr варьируют от 15 до 95 г/т. Для большей части верлитовых гранатов характерны крайне высокие содержания Y и Zr – до 81 и 252 г/т, соответственно. На диаграмме Zr-TiO₂ гранаты верлитового парагенезиса ложатся в область флогопитового метасоматоза, причем высокие содержания в них Zr, Ti (по сравнению с деплетированными гранатами) отражают крайние степени обогащения метасоматическими агентами. Прослеживается четкий тренд от низкокальциевых гарцбургитовых гранатов, для которых наблюдается относительно низкий



вклад метасоматических преобразований, до верлитовых. Наличие такого тренда, а также повышение содержаний Ca в гранате указывают на значительный вклад карбонатитовых расплавов/флюидов в преобразование литосферной мантии (рисунок 3).

Рисунок 3 – Диаграммы распределения Y-Zr (а) и Zr-TiO₂ (б) в гранатах тр. им. 23 съезда КПСС. Поля на диаграммах (по Griffin, 1995): I – деплетированные породы, II – фертильные породы, III – силикатный метасоматоз, IV – флогопитовый метасоматоз. Парагенетическая классификация гранатов (по Griffin, 1995): 1 – лерцолитовые, 2 – гарцбургитовые, 3 – низко-Ca гарцбургитовые, 4 – верлитовые.

По содержаниям Y (г/т) в гранатах и температуре их образования (рисунок 4), полученной с помощью мономинерального гранатового термометра (Griffin, Ryan 1995), можно сделать

вывод, что положение основания деплетированной (относительно неизменной) литосферы («Y край») находится в интервале глубин, соответствующим температурам около 960 °С в пределах Мирнинского кимберлитового поля, однако такой вывод вероятнее всего будет ошибочным, так как для данной кимберлитовой трубки отсутствуют данные по гранатам, расположенным ниже этой границы, а также в выборке практически полностью отсутствуют высокотитанистые гранаты из катаклазированных перидотитов, отражающие преобразование пород литосферной мантии силикатными расплавами в основании литосферной мантии. Это может быть связано с практически полным отсутствием гранатосодержащих пород ниже данной границы в разрезе литосферной мантии под трубкой им. 23 съезда КПСС.

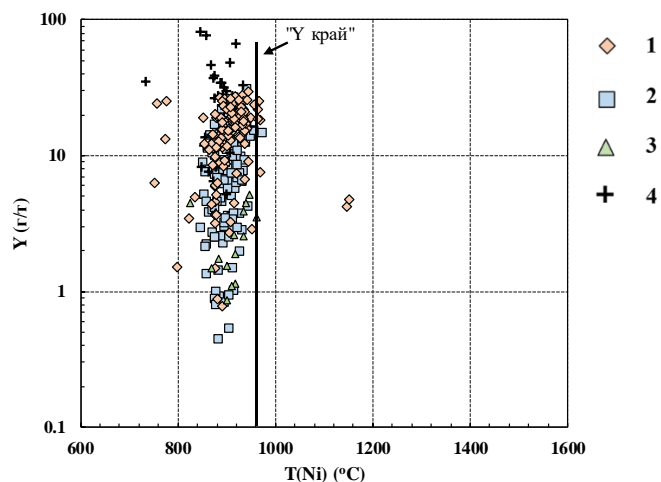


Рисунок 4 – Диаграмма распределение Y в гранатах к рассчитанным температурам их образования. «Y край» нанесен по методике Griffin, 1995. Парагенетическая классификация гранатов (по Griffin, 1995): 1 – лерцолитовые, 2 – гарцбургитовые, 3 – низко Са гарцбургитовые, 4 – верлитовые.

На диаграмме Y/Ga-Zr/Y выделены поля различных типов продуктивных на алмазы геотектонических элементов (по Griffin, 1998): архоны (древнее 2,4 млрд лет), протоны (2,4-1,6 млрд лет) и тектоны (1,6-0,8 млрд лет) (в соответствии с классификацией кратонов по Янсе, 1992 [11]). Фигуративные точки составов гранатов тр. им XXIII съезда КПСС приблизительно в равных частях попадают в области архона и протона. При этом большая часть гранатов гарцбургитового парагенезиса находится в области архона, а наиболее высокие Zr/Y у низкокальциевых гарцбургитовых гранатов. Увеличение Zr/Y без роста Y/Ga отражает влияние низкотемпературного метасоматоза. В область протона в большей степени попадают лерцолитовые гранаты, что соотносится с предположением о росте соотношения Cpx/Grt в породах от области архона до тектона. Верлитовые гранаты имеют повышенные Y/Ga, что указывает на модальное увеличение Cpx+Grt [12] (рисунок 5).

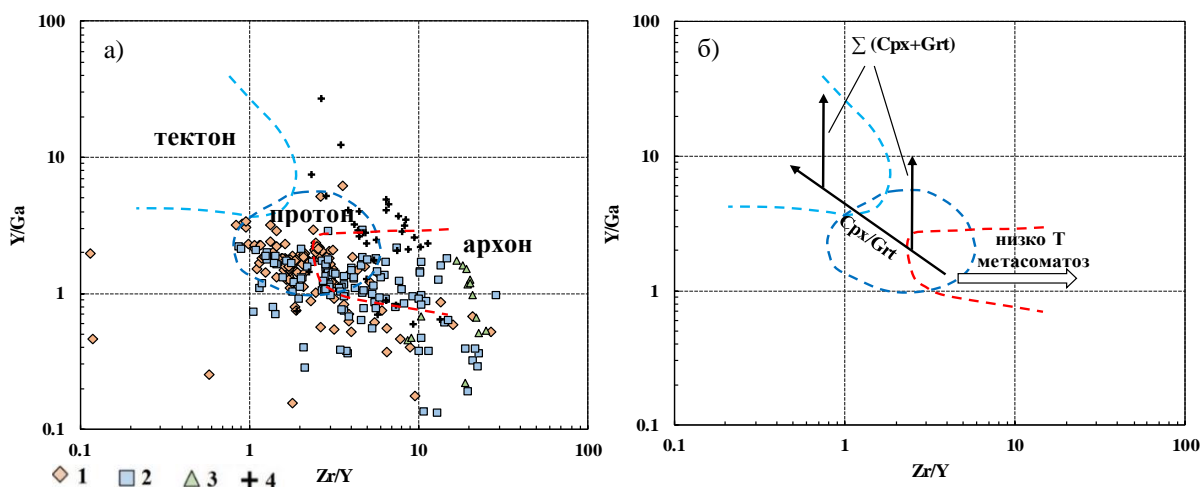


Рисунок 5 – а) Диаграмма распределения $Y/Ga-Zr/Y$ в гранатах кимберлитовой трубки им. 23 съезда КПСС с полями разделения на архон, протон, тектон (по Griffin, 1998). Парагенетическая классификация гранатов (по Griffin, 1995): 1 – лерцолитовые, 2 – гарцбургитовые, 3 – низко Са гарцбургитовые, 4 – верлитовые. б) Интерпретация вариаций составов гранатов на диаграмме $Y/Ga-Zr/Y$ (по Griffin, 1998).

Для модельной реконструкции палеогеотермы под кимберлитовой трубкой им. XXIII съезда КПСС использовались данные по оценкам Р-Т параметров (методом Griffin, 1995) перidotитовых гранатов (n= 305). При этом, непосредственно, для построения самой геотермы использовались лишь данные по Р-Т параметрам низкокальциевых гарцбургитовых гранатов (что связано с ограничениями и особенностями геобарометра Griffin, 1995).

Определение параметров палеогеотермы производилась в программе FITPLOT [13]. Значение теплового потока составило $35,3 \text{ мВт/м}^2$, а мощность литосферы ~ 250 км (рисунок 6). При этом мощность алмазного окна (от границы графит-алмаз до нижней деплетированной границы литосферы) составила около 40 км. Однако при использовании линии перегиба (Kink по методике Griffin, 1995) мощность литосферы будет значительно занижена до 180 км, что может быть связано с некорректным определением “У края” для данной выборки гранатов.

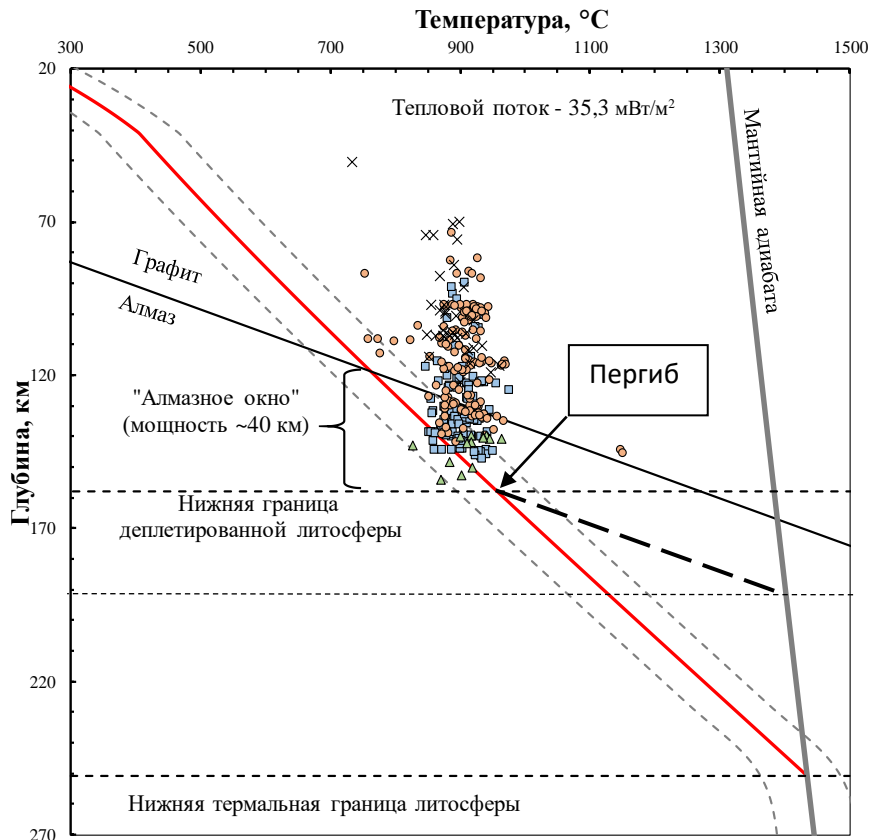


Рисунок 6 – Модельная палеогеотерма, рассчитанная с использованием программы FITPLOT по низкокальциевым гарцбургитовым гранатам трубки им. XXIII съезда КПСС. Красная линия – палеогеотерма и ее доверительные интервалы (серые пунктирные линии). Поля стабильности графита и алмаза по [14], 1976. 1 – гранаты из кальциевых гарцбургитов, 2 – гранаты из лерцолитов, 3 – гранаты из низкокальциевых гарцбургитов, 4 – гранаты из верлитов (по Griffin, 1995).

3. Выводы

Таким образом для трубки им. XXIII съезда КПСС по составам гранатов резко преобладают передотитовые парагенезисы, причем большая пропорция гранатов относится к гарцбургит-дунитовому парагенезису – 51,9% (по содержаниям $\text{CaO-Cr}_2\text{O}_3$). При этом из 310 перidotитовых гранатов 220 зерен (71%) имеют содержания $\text{Cr}_2\text{O}_3 > 5 \text{ мас. \%}$.

Редкоземельный состав гранатов, а также присутствие в выборке высококальциевых верлитовых гранатов (~10%), указывают на значительную степень проработки литосферной мантии карбонатитовыми расплавами/флюидами.

При реконструкции палеотемпературы по рассчитанным Р-Т параметрам гранатов значение теплового потока составило 35,3 мВт/М², а мощность литосферы около 250 км, мощность алмазного окна около 40 км. Однако возникает неоднозначная ситуация, при которой методика расчёта “У края” (деплементированной границы литосферы, по Griffin, 1995) может работать некорректно. Так как в выборке практически полностью отсутствуют высокотитанистые гранаты (TiO₂>0,5%), указывающие на проработку пород литосферной мантии силикатными метасоматическими агентами, “У край” определен на глубине около 160 км свидетельствует об отсутствии гранатосодержащих пород ниже этой границы. Мощность “алмазного окна” также распространяется на большие глубины.

Таким образом термальный режим и мощность деплементированной литосферной мантии под трубкой им. XXIII съезда КПСС требуют дополнительного исследования по другим минералам спутникам алмаза, которые могли находиться в перидотитах ниже границы 160 км.

4. Благодарности

Источники финансирования: собственные средства АК «АЛРОСА» (ПАО), грант РНФ № 22-27-00724.

5. Литература:

- [1] Зинчук Н.Н. Геологическое строение и петрография кимберлитовых трубок. // Збірник наукових праць УкрДГРІ. 2015. № 2, стр. 40-63. (Стр. 47-49)
- [2] Комаров А. Н., Илупин И. П. Геохронология кимберлитов Сибирской платформы по данным метода треков //Геохимия. – 1990. – №. 3. – С. 365-372.
- [3] Griffin W. L. et al. The Siberian lithosphere traverse: mantle terranes and the assembly of the Siberian Craton //Tectonophysics. – 1999. – Т. 310. – №. 1-4. – С. 1-35.
- [4] Pollack H. N., Chapman D. S. Mantle heat flow //Earth and Planetary Science Letters. – 1977. – Т. 34. – №. 2. – С. 174-184.
- [5] Dymshits A. M. et al. Thermal state, thickness, and composition of the lithospheric mantle beneath the Upper Muna Kimberlite Field (Siberian Craton) constrained by clinopyroxene xenocrysts and comparison with Daldyn and Mirny Fields //Minerals. – 2020. – Т. 10. – №. 6. – С. 549.
- [6] Hasterok D., Chapman D. S. Heat production and geotherms for the continental lithosphere //Earth and Planetary Science Letters. – 2011. – Т. 307. – №. 1-2. – С. 59-70.
- [7] Griffin W. L., Ryan C. G. Trace elements in indicator minerals: area selection and target evaluation in diamond exploration //Journal of geochemical Exploration. – 1995. – Т. 53. – №. 1-3. – С. 311-337.
- [8] Schulze D. J. A classification scheme for mantle-derived garnets in kimberlite: a tool for investigating the mantle and exploring for diamonds //Lithos. – 2003. – Т. 71. – №. 2-4. – С. 195-213.
- [9] Соболев Н.В. Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. – Новосибирск: Наука, 1974. – 264 с.
- [10] Ramsay, Robert R. Geochemistry of diamond indicator minerals. Diss. University of Western Australia, 1992.
- [11] Янсе А.Д. Новый подход к классификации кратонов //Геология и геофизика. 1992. №10. С. 12-32.; Изосов Л. А. и др. Перспективы алмазоносности Востока Азии и окраинных морей. – 2000
- [12] Griffin W. L. et al. Secular variation in the composition of subcontinental lithospheric mantle: geophysical and geodynamic implications //Structure and evolution of the Australian continent. – 1998. – Т. 26. – С. 1-26.

- [13] Mather, K. A., Pearson, D. G., McKenzie, D., Kjarsgaard, B. A., & Priestley, K. (2011). Constraints on the depth and thermal history of cratonic lithosphere from peridotite xenoliths, xenocrysts and seismology. *Lithos*, 125(1-2), 729-742.
- [14] Kennedy C. S., Kennedy G. C. The equilibrium boundary between graphite and diamond // *Journal of Geophysical Research*. – 1976. – T. 81. – №. 14. – C. 2467-2470.

ТЕКТОНИКА, ГЕОДИНАМИКА И ЭВОЛЮЦИЯ ЛИТОСФЕРЫ

УДК 564.8

ДИНАМИКА БИОРАЗНООБРАЗИЯ БРАХИОПОД НА РУБЕЖЕ ПОЗДНЕЙ ЮРЫ И РАННЕГО МЕЛА

Валерий Баранов

ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

DYNAMICS OF BRACHIOPOD BIODIVERSITY AT THE LATE JURASSIC AND EARLY CRETACEOUS BORDER

Valeriy Baranov

Geology of Diamond and Precious Metals Institute, Siberian Branch RAS, Yakutsk, 677980 Russia

Abstract. The dynamics of biodiversity of castle brachiopods at the boundary of the Late Jurassic and Lower Cretaceous was studied. It is shown that out of 38 families, 8 families die out at this border, 12 families appear for the first time, and 18 families cross this border. Analysis of the stratigraphic distribution of brachiopod genera in the paleobiogeographical Western European province at this boundary showed that out of 133 genera, 58 genera [44%] disappear in the Late Jurassic, 60 genera [45%] appear in the Early Cretaceous, and only 15 genera or [11%] pass from the Upper Jurassic to the Early Cretaceous.

1. Введение

В истории Земли динамика биоразнообразия живого вещества зависела от совокупной периодичности событий различного масштаба, происходящих в галактике, Солнечной системе и на планете Земля [1–5]. Анализ стратиграфического распространения семейств и родов брахиопод в пограничных отложениях юры и мела показал, что на этом рубеже происходит значительная их диверсификация.

2. Содержание

Анализ стратиграфического распространения семейств замковых брахиопод в пограничных отложениях верхней юры и нижнего мела нашей планеты показал, что из 38 семейств 8 семейств (21%) вымирают на границе нижнего мела, 12 семейств (31,6%) впервые появляются на нижней границе меловой системы и 18 семейств (47,4%) пересекают границу юрской и меловой систем (Табл. 1–3).

Таблица 1 – Семейства замковых брахиопод, проходящие из верхней юры в нижний мел

Семейство	Верхняя юра	Нижний мел
Rhynchonellidae	-----	-----
Norellidae	-----	-----
Thecidellinidae	-----	-----
Bactryniidae	-----	-----
Cyclothyrididae	-----	-----
Tetrahynchiidae	-----	-----
Thecideidae	-----	-----
Nucleatidae	-----	-----

Chlidonophoridae	-----	-----
Zeilleriidae	-----	-----
Gusarellidae	-----	-----
Aulacothyropsidae	-----	-----
Laqueidae	-----	-----
Cancellothyrididae	-----	-----
Chlidonophoridae	-----	-----
Zeilleriidae	-----	-----
Kingenidae	-----	-----
Aulacothyropsidae	-----	-----

Таблица 2 – Семейства замковых брахиопод, вымирающие в поздней юре

Семейство	Верхняя юра	Нижний мел
Lissajousithyrididae	-----	
Lobothyrididae	-----	
Tchegemithyrididae	-----	
Trigonithyrididae	-----	
Eudesiidae	-----	
Enallothecideidae	-----	
Sellithyridida	-----	
Nucleatidae	-----	

Таблица 3 – Семейства замковых брахиопод, появляющиеся на нижней границе мела

Семейство	Верхняя юра	Нижний мел
Capillithyrididae		-----
Gibbithyrididae		-----
Alabushevothyrididae		-----
Clathrithyrididae		-----
Harpotothyrididae		-----
Mametothyrididae		-----
Spaskothyrididae		-----
Dyscoliidae		-----
Inopinatarculidae		-----
Parakingenidae		-----
Praeargyrothecidae		-----
Bouchardiidae		-----

Проведем теперь сравнительный анализ стратиграфического распространения родов замковых брахиопод в пограничных отложениях верхней юры и нижнего мела на уровне провинций в каждой палеобиогеографической надобласти. Наибольшим биоразнообразием в мезозое характеризовался крайний запад Тетической биогеографической надобласти, которой в поздней юре и раннем меле входил в состав Западно-Европейской палеобиогеографической провинция. Она была представлена двумя субпровинциями: Европейской, занимающей ныне территорию современной Западной Европы и, расположенной к югу от нее, Северо-Африканской (Тунис, Марокко, Алжир, Египет). Из общего числа 133 родов, распространенных в морском бассейне Западно-Европейской провинции, 58 родов [44%] исчезают в поздней юре, 60 родов [45%] появляются в раннем меле и только 15 родов или [11%] переходят из верхней юры в ранний мел

3. Заключение

При анализе стратиграфического распространения семейств и родов замковых брахиопод на рубеже поздней юры и раннего мела было установлено, что более значительная диверсификация происходила на родовом уровне, чем на семейственном, хотя в обоих случаях количество появляющихся таксонов преобладало над вымирающими.

4. Благодарности

Исследование выполнено за счет государственного финансирования ИГАБМ СО РАН, проект FUG-2024-0005.

5. Литература:

- [1] Alekseev, A.S. Global biotic crises and mass extinctions in the Phanerozoic history of the Earth // Biotic events at the main boundaries of the Phanerozoic M.: Moscow State University Publishing House, 1989. P. 22-47.
- [2] Garshin, I.K. About the influence of the rotation of the Galaxy on the history of the Earth. // Interdisciplinary almanac-yearbook Evolution 2014: From protostars to singularity? Volgograd: Uchitel Publishing House, 2014. pp. 107-145.
- [3] Lichkov, B.L. Geological periods and evolution of living matter // Journal. General biol. 1945. T.6, No. 3. P. 157-182.
- [4] Jay, A. Yoder. Geomagnetic Polarity Reversal: A Theoretical Modus Operandi of Punctuated Equilibrium Evolution. Department of Biology, The Illinois College, Jacksonville, IL 62650. Bios. 1997. Vol. 68, No. 4, pp. 247-250
- [5] John F. Simpson. Evolutionary pulsations and geomagnetic polarity. Geological Society of America Bulletin, 1966. Vol. 77. P. 197-204.

**ПАЛЕОЗОЙСКИЙ ГРАНИТНЫЙ МАГМАТИЗМ В ЮЖНОЙ ЧАСТИ
ПРИКОЛЫМСКОГО ТЕРРЕЙНА (МАГАДАНСКАЯ ОБЛАСТЬ): НОВЫЕ
ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ**

Екатерина Брусницына^{1,2,3}, Андрей Худoley^{1,2}

1 ФГБУ Всероссийский научно-исследовательский геологический институт
им. А.П. Карпинского, 199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Средний пр-т В.О., 74

2 ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»,
199034, Россия, г. Санкт-Петербург, пер. Декабристов, 16

3 ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

**PALEOZOIC GRANITE MAGMATISM OF THE SOUTHERN PART OF THE
PRIKOLYMA TERRANE (MAGADAN REGION): NEW GEOCHRONOLOGICAL
DATA**

Ekaterina Brusnitsyna^{1,2,3}, Andrei Khudoley^{1,2}

1 Karpinsky Russian Geological Research Institute, 74, Sredny av, St. Petersburg, 199106, Russia

2 Saint-Petersburg State University, 16, per. Dekabristov, St. Petersburg, 199034, Russia

3 Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. The study provides new geochronological data on the U-Pb age of a granite intrusion located in the southern part of the Prikolyma terrane. The obtained data on the age of zircons indicate the Early Devonian (412-419 million years) age of granite. Among the zircon population, a significant number of grains are of Early Proterozoic (~1720 Ma) and Middle-Late Ordovician (~460 Ma) age. We interpret zircons of Early Proterozoic age as inherited from older volcanics of the Khakdon Group, which are of similar age and widespread in the central part of the Prikolyma terrane. The tectonic setting of granite intrusion, as well as the origin of zircons of Middle-Late Ordovician age, are not clear and require further research.

1. Введение

Приколымский террейн сложен породами, варьирующими по возрасту от раннего протерозоя до мезозоя, и обычно рассматривается как фрагмент древней пассивной окраины [1]. Он располагается в пределах Верхояно-Колымской складчатой области, с востока граничит с Омолонским кратонным террейном, а с запада с комплексом пород различного тектонического происхождения, объединяемых в Омулеский террейн [1]. Образования Приколымского террейна несогласно перекрыты вулканогенно-осадочными породами Уядино-Ясачненского вулканического пояса.

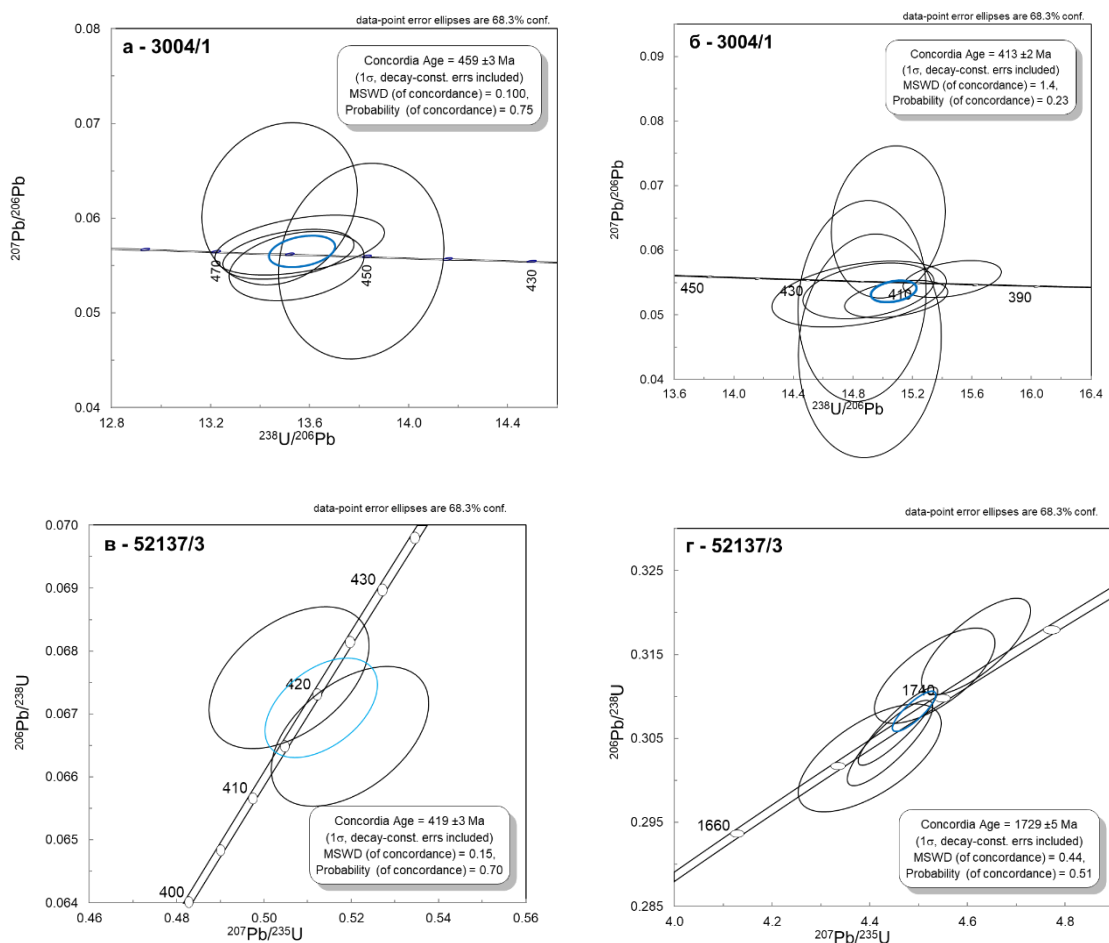
Палеозойская история Приколымского террейна слабо изучена и период времени до среднего-позднего девона рассматривается как амагматичная пассивная окраина [1]. Однако, полученные новые данные о U-Pb возрасте цирконов из гранитов свидетельствуют, что тектоническая эволюция Приколымского террейна была более сложной, чем это считалось ранее. Изучавшийся массив гранитного состава расположен в южной части террейна, имеет треугольную форму и выделяется среди терригенно-вулканогенных образований веринской свиты верхней юры. Прикотактовые изменения в терригенных породах верхней юры отсутствуют. Вероятно, контакт массива или тектонический, или терригенно-вулканогенные породы юры трансгрессивно налегают на магматические породы массива гранитов.

2. Петрографическая характеристика гранитов

Изученный массив имеет однородное строение. Среди магматических пород, слагающих изученных массив описаны в разной степени катаклазированные лейкограниты. Средне-крупнозернистые породы имеют светлую, практически белую окраску. Сложены кислыми плагиоклазами (№15 олигоклаз), кварцем и калиевым полевым шпатом. Темноцветных минералов практически нет (до 1%), чаще они полностью замещены вторичными минералами. Вторичные изменения проявлены в хлоритизации, серицитизации, карбонатизации и эпидотизации пород. Чаще всего, вторичные минералы образуются в виде тонкой вкрапленности среди агрегатов перекристаллизованного кварца. Среди акцессорных минералов установлены гематит, пирит, титанит и циркон.

2.1. Изотопные данные

Для определения возраста гранитов было отобрано три пробы, одна проба из краевой части массива и две из его центральной части. U-Pb датирование цирконов производилось на ионном микрозонде SHRIMP-II в Центре Изотопных Исследований ВСЕГЕИ им. Карпинского. Результаты приведены на рисунке 1. Для образца 3004/1 из краевой части массива получено два конкордатных значения возраста 459 ± 3 и 413 ± 2 млн лет. В пробе 52137/3 получены два конкордатных значения возраста 1729 ± 5 и 419 ± 3 млн лет. Для образца 53140/1 получен конкордатный возраст 1720 ± 4 и один циркон с возрастом 414 ± 4 млн лет. Среди проанализированных цирконов в пробах 52137/3 и 52140/1 установлены несколько (4 и 1 соответственно) цирконов с возрастом около 2016 млн лет.



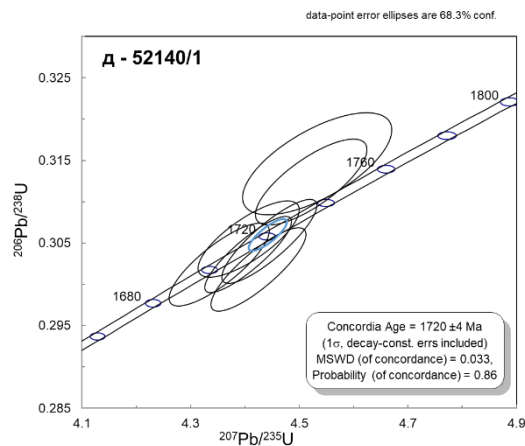


Рисунок 1 – Диаграммы с конкордиями:
а, б - проба 3004/1; в, г – проба 52137/3; д – проба 52140/1.

3. Обсуждение и выводы

По результатам изотопно-геохронологических исследований установлены три генерации цирконов, имеющие раннепротерозойский (рисунок 1 г, д), средне-позднеордовикский (рисунок 1а) и раннедевонский возрасты (рисунок 1 б, в) соответственно. Цирконы раннепротерозойского возраста интерпретируются нами как захваченные из более древних вулканитов хакдонской серии, имеющей возраст около 1720 млн лет и широко распространенной в центральной части Приколымского террейна [2, 3].

Происхождение цирконов палеозойского возраста не столь очевидно. Магматические породы средне-позднеордовикского возраста на территории Приколымского террейна неизвестны. Цирконы средне-позднеордовикского возраста установлены только в одной пробе (3004/1, рисунок 1а) и вряд ли отражают возраст кристаллизации гранитного массива. В то же время, в восточной части Омулёвского террейна полученные данные по возрасту цирконов из гранитоидов, позволили сделать вывод о наличии в ордовике-силуре протяженной островной дуги, протягивающейся вдоль всего террейна и продолжавшейся в сторону Сибирского кратона [4]. Возможно, ордовикские возрасты цирконов в исследованных нами гранитах отражают тектонические события, связанные с эволюцией этой островной дуги.

Цирконы с раннедевонским (412-419 млн лет) возрастом присутствуют во всех трех исследованных образцах. Эта возрастная группа является наиболее молодой во всей датированной популяции, и, вероятно, отражает возраст кристаллизации изученного массива. Для определения тектонической обстановки внедрения этих гранитов, как и происхождения цирконов ордовикского возраста, необходимы дальнейшие исследования, но можно считать установленным, что в ходе палеозойской эволюции южной части Приколымского террейна имело место внедрение интрузий кислого состава.

4. Благодарности

Полевые работы, лабораторно-аналитические и изотопно-геохронологические исследования проводились в рамках темы Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского. Обработка данных частично выполнена при поддержке проекта РФФ № 20-17-00169.

5. Литература:

- [1] Tectonics, geodynamic sand metallogeny of the Sakha Republic (Yakutia). – М.: МАИК «Наука/Interperiodica», 2001. – 571 p.
- [2] Khudoley A. K., Tkachenko V. I., Matukov D. I., Berezhnaya N.G., Sergeev S.A. New age data on Precambrian volcanic rocks of the khakdon group, eastern Kolyma region // Doklady Earth

Sciences. – 2006. – Vol. 411, No. 9. – P. 1357-1361. – DOI 10.1134/S1028334X06090054. – EDN LJYXHP.

- [3] Spikerman V., Brusnicyna E. New scheme for the separation of Proterozoic formations of the eastern Kolyma region // Geology and mineral resources of Northeast Russia: materials of the X All-Russian scientific and practical conference with international participation, Yakutsk, April 08–10, 2020 / North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, Institute of Geology of Diamond and Precious Metals SB RAS, Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Yakut branch of the Russian Mineralogical Society. – Yakutsk: North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosova, 2020. – pp. 159-163. – EDN ZVGPTO.
- [4] Sychev S. N., Khudoley A. K., Lebedeva O. Y., Rogov A. V., Maklashin V. S., Lvov P. A., Sokolov S. D., Chamberlain K. R. Silurian Granitoid Magmatism of the Rassokha Terrane (North-East Russia) // Doklady Earth Sciences. – 2020. – Vol. 494, No. 2. – P. 762-766. – DOI 10.1134/S1028334X20100104. – EDN BBSYTX.

**ОЦЕНКА МОЩНОСТИ ДЕНУДИРОВАННЫХ ПОРОД НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ
СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ И ХАРАУЛАХСКОМ СЕГМЕНТЕ
ВЕРХОЯНСКОГО СКЛАДЧАТО-НАДВИГОВОГО ПОЯСА ПО ДАННЫМ
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГЕОХРОНОЛОГИИ**

Дмитрий Васильев¹, Андрей Прокопьев¹, Виктория Ершова^{1,2,3}, Андрей Худoley²

¹ ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

² ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет» Институт наук о Земле
199034, Россия, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7–9

³ ФГБУН «Геологический институт РАН»,
119017, Россия, г. Москва, Пыжёвский пер., 7

**THICKNESS OF DENUDATED ROCKS IN THE NORTHEAST OF THE SIBERIAN
PLATFORM AND THE KHARAULAKH SEGMENT OF THE VERKHOYANSK
FOLDER-THRUST BELT ACCORDING TO LOW-TEMPERATURE
GEOCHRONOLOGY**

Dmitry Vasiliev¹, Andrei Prokopiev¹, Victoria Ershova^{1,2,3}, Andrei Khudoley²

¹ Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

² Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg State University, 7-9, University nab. St. Petersburg,
199034, Russia

³ Geological Institute of RAS, 7, Pyzhevsky lane, Moscow, 119017, Russia

Abstract. Using low-temperature geochronology methods, the thickness of eroded rocks in the northeast of the Siberian Platform and adjacent areas of the northern front of the Verkhoyansk fold-and-thrust belt was calculated. It has been established that the thickness of eroded rocks increases in the eastern and northern direction from 2–3.3 km in the Lena-Anabar and Priverkhoyansk basins to 6 km in the east in the Central Kharaulakh synclinorium and the Bykov anticlinorium.

1. Введение

Оценка мощности денудированного при орогении материала для северо-востока Сибирской платформы и прилегающих областей севера фронта Верхоянского складчато-надвигового пояса (ВСНП) проводилась в конце 70-х годов прошлого века на основе анализа стратиграфических разрезов [1]. Проведенные нами термохронологические исследования позволили проверить и уточнить эти данные. Методы низкотемпературной геохронологии кроме времени остывания–поднятия–денудации территории позволяют приближенно оценить мощности эродированных при этом пород.

Исследования проводились в Оленекском секторе ВСНП (Усть-Оленекская и Приморская антиклинали), в Хараулахском сегменте ВСНП (Чекуровская и Ютяхская антиклинали, Тасаринская синклиналь, Кенгдейский грабен, Центрально-Хараулахский синклиний и Быковский антиклиний), а также в смежных районах Лено-Анабарского и Приверхоанского прогибов, Оленекского поднятия Сибирской платформы.

2. Материал и методика

Было использовано трековое датирование апатитов и (U-Th)/He датирование цирконов. Метод трекового датирования апатитов (AFT) уже достаточно давно используется в мировой практике как способ оценки времени вывода пород на поверхность (экзгумации), масштабов и скорости

денудации. Он основан на подсчете плотности треков (следов) осколков спонтанного деления ядер ^{238}U , накапливающихся в минерале в ходе геологической истории. Основы метода и примеры его использования наиболее полно изложены в [2–5].

Метод (U-Th)/He датирования цирконов (или датирование по гелию) основан на естественном образовании атомов гелия в результате распада радиоактивных изотопов урана и тория. Материнские изотопы ^{238}U , ^{235}U и ^{232}Th распадаются на дочерние изотопы ^{238}Pb , ^{207}Pb и ^{206}Pb соответственно, освобождая при каждой реакции атомы ^4He (α -частицы), электроны (β -частицы) и энергию. Атомы гелия, произведенные таким образом, задерживаются в кристаллической решетке минералов, поэтому, зная содержание задержанного He и концентрации U и Th, можно определить возраст минерала [6, 7].

Апатиты и цирконы были выделены из проб песчаников пермского – эоценового возраста. Методом AFT продатировано 28 образцов в двух независимых лабораториях: A2Z (ApatiteZircon, Inc, США) и лаборатории минералогии и петрологии Гентского университета (Бельгия) [8, 9]. 36 кристаллов циркона из 6 образцов продатированы (U-Th)/He методом в геохронологическом центре UTChron Департамента наук о Земле Техасского университета в Остине, США.

3. Результаты и выводы

В результате изучения глубины погружения и, соответственно, мощности эродированных толщ установлено, что при удалении от Оленекского поднятия на север и восток в сторону складчатых областей увеличивается величина мощности денудированного материала. Если в Лено-Анабарском и Приверхоянском прогибах денудация колеблется от 2 до 3,3 км, то в прилегающих частях Усть-Оленекской системы складок и Хараулахского сегмента достигает значений от 3 км и больше. В тыловой части Усть-Оленекской системы складок, в Приморской антиклинали, денудация уже больше 4 км, как и в центральной части Хараулахского сегмента (Центрально-Хараулахский синклиорий). Далее на восток, в осевой, субдолготной части Центрально-Хараулахского синклиория, денудация составляет от 4 до 6 км. Еще восточнее, в Быковском антиклинории, она уже больше 6 км.

Полученные нами данные согласуются с результатами работ Г.С. Гусева [1], который также предполагал увеличение мощности эродированных пород от края Сибирской платформы на восток в сторону Хараулахского сегмента. Нами установлено, что это увеличение происходит не только на восток, но и на север. Предположенные Г.С. Гусевым глубины погружения пород также примерно совпадают с полученными нами для Приверхоянского прогиба. Однако далее на восток импредполагались мощности эродированных пород в Хараулахском антиклинории и в западной части Центрально-Хараулахского синклиория от 4 до 6 км, на востоке синклиория от 6 до 8 км, а в Тиксинской антиклинали (осевая часть Быковского антиклинория) – более 8 км. Эти мощности выше рассчитанных нами.

4. Благодарности

Авторы выражают благодарность проф. Д. Стокли, к.г.-м.н. Е.В. Ветрову и Д.А. Застрожнову, а также Г.Г. Казаковой. Исследование поддержано грантом РНФ 20-17-00169 и проектом FUFG-2024-0005.

5. Литература:

- [1] Gusev, G.S. *Folded structures and faults of the Verkhoyano-Kolyma mesozoic system*. Moscow: Nauka, 1979, 208 pp. (in Russian).
- [2] Soloviev, A.V. *The study of tectonic processes in the areas of convergence of lithospheric plates. Methods of fission track and structural analysis*. Proceedings of the Geological Institute of RAS, Issue 577. Moscow: “Nauka”, 2008, 320 pp.
- [3] Vetrov, E.V. *The evolution of thermotectonic events in the Southeastern Altai in the Late Mesozoic and Cenozoic according to Apatite track thermochronology* // Dissertation for the

- degree of Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Moscow, 2016, 200 pp. (in Russian).
- [4] Donelick, R.A., O'Sullivan, P.B., Ketcham, R.A. Apatite-Track Analysis // *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 2005, vol. 58. pp. 49–94.
- [5] Green, P.F., Duddy, I.R. AFTA and low temperature thermochronology: the Geotrack approach // *Thermo 2014. 14th International Conference on Thermochronology*, 2014, pp. 1–69.
- [6] Farley, K.A. (U-Th)/He dating: techniques, calibrations, and applications. In *Noble Gases in Geochemistry and Cosmochemistry // Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2002, 47:819–44.
- [7] Wolfe, M.R., Stockli D.F. Zircon (U-Th)/He thermochronometry in the KTB drill hole, Germany, and its implications for bulk He diffusion kinetics in zircon // *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 295:69–82.
- [8] Vasiliev, D.A., Prokopiev, A.V., Khudoley, A.K., Kazakova, G.G. and Vetrov, E.V. Thermochronology of the Ust-Olenek fold system and the north of the Olenek uplift according to track dating of apatite // *Geology and mineral resources of the North-East of Russia: materials of the VIII All-Russian Scientific and Practical Conference*, Yakutsk: Publishing House of the P.I. Melnikov Institute of Permafrost Studies SB RAS, 2018, vol. 2, pp. 32–36 (in Russian).
- [9] Vasiliev, D.A., Prokopiev, A.V., Khudoley, A.K., Ershova, V.B., Kazakova, G.G. and Vetrov, E.V. Thermochronology of the northern part of the Verkhoyansk fold-and-belt according to apatite fission-track age // *Arctic and Subarctic Natural Resources*, 2019, vol. 24, N 4, pp. 49–66 (in Russian).

**ГРАНИТЫ РАПАКИВИ И АССОЦИИРУЮЩИЙ МАГМАТИЗМ,
КАК ИНДИКАТОРЫ СМЕНЫ ТЕКТОНИЧЕСКОГО РЕЖИМА В ЭВОЛЮЦИИ
НЕОПРОТЕРОЗОЙСКОЙ АКТИВНОЙ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ОКРАИНЫ
(ЕНИСЕЙСКИЙ КРЯЖ, ВОСТОЧНАЯ СИБИРЬ)**

Антонина Верниковская^{1,2,3}, Николай Матушкин^{1,2}, Александр Ларионов⁴,
Алексей Травин⁵, Павел Кадильников^{2,3}, Егор Богданов^{2,3}

¹ ФГБУН «Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука»,
630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3/4

² ФГАОУ ВО «Новосибирский государственный университет»,
630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

³ ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

⁴ ФГБУ Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П.
Карпинского, 199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Средний пр-т В.О., 74

⁵ ФГБУН «Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева»,
630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3

**RAPAKIVI GRANITES AND ASSOCIATING MAGMATISM
AS INDICATORS OF TECTONIC MODE TRANSITION DURING THE
DEVELOPMENT THE NEOPROTEROZOIC ACTIVE CONTINENTAL MARGIN
(YENISEI RIDGE, EASTERN SIBERIA)**

Antonina Vernikovskaya^{1,2,3}, Nikolay Matushkin^{2,3}, Alexander Larionov⁴,
Aleksey Travin⁵, Pavel Kadilnikov^{2,3}, Egor Bogdanov^{2,3}

¹ Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics SB RAS,
3/4, Akademika Koptug ave., Novosibirsk, 630090, Russia

² Novosibirsk State University, 2, Pirogova st., Novosibirsk, 630090, Russia

³ Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

⁴ Karpinsky Russian Geological Research Institute, 74, Sredny av, St. Petersburg, 199106, Russia

⁵ Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS,
3, Akademika Koptyuga av., Novosibirsk, 630090, Russia

Abstract. New and previously published U-Pb data indicates that in the central part of the Tatarka-Ishimba suture zone of the Yenisei Ridge A-type granitoids including rapakivi granites and associating basic and intermediate rocks were emplaced 651–629 Ma, forming the Tatarka active continental margin complex. We report details of the thermochronological history for these rocks and show the similarity of their magmatic sources, which included input from mixed OIB and E-MORB components. We consider the role of the mafic-felsic magmatism in the formation of gold-antimony mineralization. The formation of rapakivi granites and associating rocks was conditioned by oceanic slab failure at the Cryogenian – early Ediacaran development stage of the Siberian craton active continental margin.

1. Введение

В пределах Татарско-Ишимбинской сутурной зоны (ТИСЗ) Енисейского кряжа, заложение которой связано с коллизией Сибирского кратона с Центрально-Ангарским террейном в тонии–криогении, 760–702 млн лет назад [1, 2], размещено большое разнообразие магматических пород, включая гранитоиды, а также сопряженные с ними в пространстве золоторудные объекты. Закрытие океанского бассейна в криогении–эдиакарии вдоль юго-западной окраины

Сибирского кратона привело к формированию зоны субдукции и активной континентальной окраины, магматическая активность которой проявилась в образовании щелочных сиенитов, фойяитов, ийолитов, уртитов, субщелочных долеритов, трахибазальтов, карбонатитов, кварцевых сиенитов и гранитоидов А-типа татарского комплекса активной континентальной окраины (711–629 млн лет) [1, 3, 4]. Новые исследования показывают, что среди гранитоидов А-типа татарского комплекса присутствуют граниты рапакиви, ассоциирующие с мафитовыми породами. Формирование структуры рапакиви связывают с изменениями физико-химических условий их кристаллизации или смешиванием с большим количеством основной магмы [5]. В научной литературе, помимо внутриплитной обстановки, широко обсуждаются условия образования гранитов рапакиви в надсубдукционной обстановке. Так, внедрение штоков гранитов рапакиви (1571 млн лет) южного сегмента Восточно-Гатского складчатого пояса в юго-восточной Индии связано с развитием мезопротерозойской активной континентальной окраины [6]. Гибридная природа магм и широкое распространение структуры рапакиви установлено в порфириновых гранитах складчатого пояса Сиера Гуасаян в Аргентине, образованных в обстановке активной континентальной окраины в позднеэдиакарско–раннепалеозойское время (540–520 млн лет) [7, 8]. На примере изучения гранитов рапакиви Аллах-Юньской тектонической зоны южного фрагмента Верхоянского складчато-надвигового пояса, образованных на аптском этапе эволюции активной континентальной окраины, было показано, что определение природы и возраста этих пород является реперным для реконструкции тектонических трансформаций в эволюции вмещающих их структур, и способствует расшифровке роли магматизма в формировании синхронного с ним золотого оруденения [9].

Для магматических и метасоматических пород центральной части ТИСЗ наиболее ранние тектонотермальные события, связанные с щелочным и субщелочным магматизмом, включая гранитоидный А-типа, татарского комплекса, происходили в криогенийское время в интервале около 711–670 млн лет. Они фиксируются по U-Pb возрасту циркона и титанита (SHRIMP II) из фойяита Среднетатарского массива, соответственно 711 ± 3 и 700 ± 2 млн лет [1], U-Pb возрасту циркона (SHRIMP II) из гранита А-типа и кварцевого сиенита Ягодкинского массива, соответственно 711 ± 10 и 691 ± 10 млн лет [3], гранита А-типа Чистопольского массива – 683 ± 6 млн лет [10], Rb-Sr изохроне по валу и минералам из фойяита Среднетатарского массива 675 ± 6 [11], а также по Re-Os возрасту арсенопирита и $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возрасту серицита из метасоматитов Au-Sb Удерейского месторождения, соответственно 689 ± 28 [12] и 670 ± 6 млн лет [13]. Криогений–эдиакарские магматические и метасоматические тектонотермальные события в центральной части ТИСЗ происходили в интервале около 659–629 млн лет. Они отражены U-Pb возрастом циркона и титанита (SHRIMP II) из субщелочного долерита р-на устья рек Б. Мурожная и Черная, соответственно 652 ± 1 млн лет и 651 ± 6 млн лет [настоящая работа], U-Pb возрастом циркона из гранитов А-типа (SHRIMP II) и граниты А-типа со структурой рапакиви (Finnigan MAT-261) Татарского массива, соответственно 646 ± 8 млн лет [4] и 629 ± 7 млн лет [14, 10]. Они соответствуют $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возрасту амфибола 658 ± 7 млн лет и биотита 637 ± 6 млн лет [настоящая работа], а также флогопита 647 ± 7 млн лет [4] и 638 ± 6 млн лет [15], Rb-Sr возрасту флогопита 650 ± 2 млн лет [16] из карбонатитов района Татарского массива, Rb-Sr возрасту по валу и минералам из мусковитового сиенита Среднетатарского массива 630 ± 4.5 млн лет [11] и, кроме того, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возрасту серицита из метасоматитов $646,5 \pm 4$ и 659 ± 6 млн лет [12, 13] Au-Sb Удерейского месторождения.

В настоящей работе представлено геологическое, U-Pb и $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ геохронологическое и геохимическое исследование субщелочных и щелочных пород татарского комплекса активной континентальной окраины, локализованных в центральной части ТИСЗ, включая субщелочные долериты р-на устья рек Б. Мурожная–Черная, граниты рапакиви и ассоциирующие с ними породы Татарского массива, а также фойяиты Среднетатарского массива. Основываясь на анализе сводки геохронологических данных для пород татарского комплекса показана связь исследуемого магматического события с Au-Sb оруденением этой зоны. Предлагается модель

образования гранитов рапакиви и ассоциирующих с ними пород, и также тектоническая модель криогений–раннеэдиакарской стадии развития активной окраины юго-запада Сибирского кратона. Помимо собранных лично авторами геологических материалов, образцов, шлифов, химических анализов пород и геохронологических данных, в исследовании используется коллекция образцов, петрографических шлифов и геологических материалов В.М. Даценко.

2. Методика

Силикатный анализ содержаний главных элементов основных пород р-на устья рек Б. Мурожная–Черная был проведен рентгенофлуоресцентным (РФА) методом с помощью спектрометров S4 Pioneer и S8 Tiger (Bruker AXS, Германия), а содержаний трейс-элементов методом электронной масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) с использованием масс-спектрометров Agilent 7500ce (Agilent Technologies Inc, США) и Element-2 (Thermo Fisher Scientific, Германия) в ИГХ СО РАН (г. Иркутск). Для пород Татарского массива анализ содержаний главных элементов проведен РФА и фотометрическими методами в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) и в ИГХ СО РАН, а трейс-элементов методом ICP-MS на приборах Element-2 в ИГГД РАН (г. Санкт-Петербург) и на приборе Element (Thermo Fisher Scientific, Германия) в ИГХ СО РАН и в ИГМ СО РАН. U-Pb датирование цирконов из субщелочного долерита р-на устья рек Б. Мурожная–Черная проведено на вторично-ионном микрозонде высокого разрешения SHRIMP-II в Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург). Датирование минеральных фракций из магматических пород Енисейского кряжа выполнено $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методом ступенчатого прогрева в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск).

3. Геолого-тектоническое строение

Гранитоиды Татарского массива локализованы в верховьях рек Б. Пенченга и Татарка в центральной части Татарско-Ишимбинской сутурной зоны. Массив приурочен к горст-антиклинальной структуре, обрамленной дизъюнктивами, оперяющими Татарский разлом. Татарский массив имеет оваловидную вытянутую в субмеридиональном направлении форму, протяженностью около 25 км и шириной, увеличивающейся с юга на север от 2.5 до 10 км. Ширина ореола контактовых изменений вмещающих пород достигает первых сотен метров. В его экзоконтактной зоне установлены андалузитовые роговики и гранат-пироксеновые скарны. Вмещающие породы представлены карбонатно-терригенными отложениями, метаморфизованными в условиях зеленосланцевой и эпидот-амфиболитовой фации, и субпластовыми телами метагабброидов (размеры выходов от 50–400 м до 5 км) индыглинского комплекса. Также вмещающими для гранитоидов являются маломощные дайки габброидов (от толеитовой до щелочной магматических серий) и карбонатитов, сопровождаемых широкими ореолами фенитов. Последние внедрялись по границам литологически неоднородной терригенно-карбонатной толщи и пластовых тел метагабброидов индыглинского комплекса. Массив имеет зональное строение. В центральной части устанавливается тело овальной формы (10×5 км), вероятно наиболее ранних интрузий этого массива, представленных субщелочными диоритами, монцодиоритами и сиенитами, а также неоднородностями в виде мафитовых фрагментов, состоящих из биотитовых габброидов и монцогаббро. Все эти различия окаймляет вытянутая с северо-запада на юго-восток полоса более кислых интрузий, на северо-западе которой выявлены амфибол-биотитовые граниты рапакиви, ассоциирующие с кварцевыми монцонитами. Здесь же на северо-западе они ассоциируют с вытянутой вдоль края массива интрузией субщелочных и нормальной щелочности амфибол-биотитовых лейкократовых гранитов с U-Pb возрастом цирконов ~646 млн лет [4]. Все эти породы прорывают поздние тела биотитовых и амфибол-биотитовых гранитов и лейкократовых гранитов, включая граниты рапакиви с U-Pb возрастом цирконов ~629 млн лет [4], среди которых присутствуют также гранодиориты и кварцевые диориты. Последние, преимущественно кислые интрузии, формируют вытянутую полосу шириной от 2.5 км на юго-западе до 6 км на северо-востоке, представляя наиболее позднюю рапакивисодержащую группу пород Татарского массива.

4. U-Pb и $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ изотопные исследования

U-Pb изотопные исследования проведены для цирконов из субщелочного долерита (проба М-15-1) р-на устья рек Б. Мурожная–Черная, представленных зернами и их обломками, от мутных до прозрачных, с максимальными размерами до 150–200х50 мкм. Целые зерна имеют идиоморфный вид, простой дипирамидально-призматический габитус, плоские грани, указывая, вероятно, на их магматическую природу. Вместе с тем, на оптических изображениях и на КЛ не наблюдается выраженной зональности роста. В мутных зернах присутствуют многочисленные мелкие включения. Несколько зерен имеют ксеноморфный вид (округлые с осцилляторной зональностью) предположительно ксеногенной природы, поэтому не анализировались. Из проведенных 22 анализов цирконов в пробе М-15-1 один результат (8.1) определенно получен по ксенокристаллу, учитывая его мезопротерозойский возраст и существенно меньшее значение Th/U. Большинство цирконов имеет величину Th/U в интервале 1.40–2.87. Величины $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$, измеренные в цирконах соответствует возрастам 731–610 млн лет, причем около 50% результатов группируются в кластер близкий к значению 650 млн лет. Некоторые из рассчитанных единичных «возрастов» положительно коррелируют с концентрациями U и U+Th, что указывает на действие «матричного эффекта». Эти результаты, демонстрирующие разброс, были исключены из расчета, а для проанализированных цирконов средневзвешенное значение $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ соответствует возрасту 652 ± 1 млн лет, что хорошо согласуется с таковым по трем результатам анализа цирконов с $U < 2500$ г/т (651 ± 1 млн лет) и конкордантным возрастом 651 ± 1.3 млн лет.

U-Pb изотопные исследования проведены для зерен титанита из той же пробы субщелочного долерита (проба М-15-1), в основном фрагментированных до размера 100–200 мкм, прозрачных от бесцветных до бледно-розовых, с еще сохранившимися плоскими гранями. BSE-визуализация выявляет низкоконтрастную идиоморфную широкополосную зональность роста с прямыми границами, что указывает на магматическую природу титанита. Анализ титанита в пробе М-15-1 показал его обогащение обыкновенным Pb с содержанием $^{206}\text{Pb}_c$ в диапазоне 3.84–18.75%. Поэтому расчеты возраста проводились либо с использованием отношений без поправки на обычный Pb, либо с поправкой используя ^{207}Pb . При неопределенности возрастов по $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} > 1.5$ –2% (что существенно уменьшает СКВО) результаты без поправки на Pb аппроксимируют к регрессии с фиксированным $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, пересекающей линию конкордии (в координатах Тера-Вассербурга (TW)) в точке 651 ± 6 млн лет. Как ^{207}Pb -, так и ^{204}Pb -корректированные средневзвешенные значения единичных возрастов хорошо согласуются с определением возраста по TW-регрессии и не противоречат результатам локального U-Pb анализа циркона. Анализ цирконов с высоким содержанием U дает результаты с заниженными погрешностями, но эти результаты можно рассматривать как менее достоверные, принимая во внимание высокометамиктное состояние цирконов. Следовательно, определение возраста по титаниту предпочтительнее, а результат 651 ± 6 млн лет можно принять за возраст кристаллизации породы.

В возрастном $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ спектре биотита из фойяита (проба 05-01-9-14) Среднетатарского массива выделяется полноценное плато, характеризующееся значением возраста 638 ± 7 млн лет. В низкотемпературной части спектра амфибола из того же образца фойяита выделилось полноценное плато, характеризующееся значением 569 ± 7 млн лет, в высокотемпературной части выделилось промежуточное плато из трех ступеней, характеризующееся возрастом 658 ± 7 млн лет. По всей видимости, минеральная фракция амфибола оказалась измененной во время позднего наложенного метасоматического воздействия, о возрасте которого говорит значение, рассчитанное для низкотемпературного плато. В то же время, выделенные в высокотемпературной части спектра фракции аргона соответствуют участкам, сохранившим первичную магматическую структуру.

5. Петрография и геохимия

Магматические породы Татарского массива представлены субщелочными и нормальной щелочности гранитами, включая граниты рапакиви, лейкократовыми гранитами, гранодиоритами, кварцевыми диоритами, кварцевыми монцонитами, сиенитами монцонитами и монцодиоритами. В кислых и средних породах массива присутствуют мафитовые включения, представленные биотитовыми габбро и монцогаббро. В районе устья рек Б. Мурожная–Черная изучены дайки субщелочных и нормальной щелочности долеритов и небольшие тела базальтов. *Граниты* субщелочные и нормальной щелочности, *кварцевые монцониты* – розовато-серые и серые породы, состоят из калиевого полевого шпата (до 40 об.%), плагиоклаза (до 30 об.%), кварца (до 30 об.%), биотита (до 15 об.%) и роговой обманки (до 10 об.%). Вкрапленники (до 8 мм, до 40% объема породы) представлены калиевым полевым шпатом, в отдельных из которых, имеющих овальную форму, устанавливается структура рапакиви (ширина каемки плагиоклаза до 2 мм). В основной массе пород находятся темные зерна кварца, биотита (до 2 мм). В породе имеются неоднородности в виде скоплений зерен темноцветных минералов. Акцессорные минералы: апатит, циркон, монацит, флюорит, титанит, алланит, пирита и пироксид.

Переходные разности от монцодиоритов к монцонитам и сиенитам – темно-серые и розовато-серые среднезернистые (размер зерен до 3 мм) породы, состоят из калиевого полевого шпата (45–70 об.%), зеленой роговой обманки (до 30 об.%), плагиоклаза (до 15 об.%), кварца и пироксена (до ~10 об.%). Вкрапленники (размер до 6 мм) представлены калиевым полевым шпатом (ортоклаз, микроклин), зональным плагиоклазом и роговой обманкой. Темноцветные минералы часто образуют скопления зерен. Акцессорные и рудные минералы: титанит, циркон, апатит, ильменит, магнетит и пирит.

Монцогаббро и биотитовое габбро – среднезернистые и крупнозернистые (размер зерен 3–8 мм) зеленовато-розовые и серовато-зеленые породы. Состоят из зеленой роговой обманки и пироксена (каждого 25–50 об.%), а также плагиоклаза (до 25 об.%), биотита (до 15 об.%), микроклина (0–15 об.%) и кварца (до 5 об.%). Отдельные разности имеют порфировидную структуру. Вкрапленники (до 6 мм, до 15 об.% породы) представлены роговой обманкой и пироксеном. Из акцессорных минералов присутствуют сфен, апатит и гранат. Акцессорные и рудные минералы: циркон, монацит, алланит, эпидот, ильменит и магнетит.

Долериты и субщелочные долериты района устья рек Б. Мурожная–Черная имеют офитовую структуру, состоят из клинопироксена (авгита) и плагиоклаза (битовнит, лабрадор и андезин), амфибола (эденит и магнезиальная роговая обманка) (до 10 об.%), биотита (до 5 об.%) и менее калиевого полевого шпата. Ассоциирующие с ними *базальты* имеют порфировую структуру с вкрапленниками оливина (до 2.5 мм) и клинопироксена (до 1 мм). Акцессорные и рудные минералы: титанит, апатит, циркон, редко монацит, ильменит. Вторичные минералы: актинолит, магнезиальный биотит, хлорит, тальк, эпидот, альбит, кальцит и кварц.

Породы Татарского массива имеют широкий разброс содержаний SiO_2 (52.9–76.6 мас.%), отвечая металлюминиевым, субалюминиевым, слабопераллюминиевым и пераллюминиевым разностям, попадающих в поля известковой, известково-щелочной и щелочно-известковой серий. Кислые породы, включая граниты рапакиви имеют промежуточные составы между известково-щелочной и щелочно-известковой серией. Основные и средние породы Татарского массива, как и основные породы района устья рек Б. Мурожная–Черная, соответствуют магнезиальным разностям. Тогда как кислые породы, включая граниты рапакиви, относятся к железистым, соответствуя гранитам А-типа. Вместе с тем последние на диаграммах FeO^*/MgO и $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{CaO}$ vs. $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}$ имеют смешанный состав А-I-S-типа, подобно таковым из надсубдукционных обстановок, отвечающих условиям “Отрыва слэба” (“Slab failure”) [17; 7; 8]. Исследуемые граниты А-типа, включая граниты рапакиви, имеют небольшие положительные и отрицательные аномалии Eu. На РЗЭ и спайдер диаграммах они демонстрируют однотипный характер распределений элементов, близкий с таковым из даек района устья рек Мурожная–Черная, характеризующийся вкладом в их источник мантийных OIB и E-MORB компонент.

6. Дискуссия

Изучение показало, что в пределах Татарского массива татарского комплекса центральной части ТИСЗ Енисейского кряжа присутствуют граниты А-типа, включая граниты рапакиви. Эти породы ассоциируют с монцодиоритами, монцонитами, сиенитами, кварцевыми диоритами, гранодиоритами и лейкократовыми гранитами, а также субщелочными габброидами. Граниты рапакиви Татарского массива имеют подобие геохимических характеристик с субщелочными долеритами и базальтами из даек р-на устья рек Б. Мурожная–Черная этого комплекса. Они имеют смешанный мантийный источник (Е-MORB и OIB). Представленная модель предполагает, что граниты рапакиви образовались вслед за внедрением даек субщелочных долеритов с U-Pb возрастом около 651 млн лет (новые данные по циркону и сфену, SHRIMP-II), и этот кислый магматизм продолжался до 646–629 млн лет назад. Анализ геохронологических данных для магматических пород центральной части ТИСЗ выявил, что тектонотермальные события происходили почти непрерывно в интервале 711–629 млн лет назад. На кривой плотности вероятности U-Pb, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ и Rb-Sr датировок (новые и ранее опубликованные данные) на термохронологической диаграмме для этих пород устанавливаются значимые пики с возрастом 711, 700, 650 и 632 млн лет. Каждой датировке соответствует значение температуры закрытия изотопной системы, либо формирования соответствующей минеральной фазы этих пород. Анализ полученных данных установил, что среднее взвешенное значение возраста синрудных минералов из Au-Sb Удере́йского месторождения этой зоны согласуется с возрастом пика 650 млн лет. Интервал 711–700 млн лет назад связан с развитием щелочного и гранитоидного магматизма А-типа при формировании (заложении) активной континентальной окраины со стороны юго-запада Сибирского кратона. Продолжающаяся субдукция охарактеризована последовательными тектонотермальными событиями, во время которых в интервале 689–670 млн лет назад происходило образование рудных метасоматитов Au-Sb Удере́йского месторождения. Тектонотермальный пик около 650 млн лет назад связан с началом формирования гранитов рапакиви и ассоциирующих с ними мафитовых пород, являющегося триггером развития следующих метасоматических процессов на Au-Sb Удере́йском месторождении. Тектоническая модель рассматривает образование гранитов рапакиви и ассоциирующих с ними пород (651–629 млн лет) центральной части ТИСЗ вследствие отрыва или иного разрушения слэба, происходившего в эволюции активной континентальной окраины юго-запада Сибирского кратона в криогении.

7. Литература:

- [1] Vernikovskiy V.A., Vernikovskaya A.E., Sal'nikova E.B., Berezhnaya N.G., Larionov A.N., Kotov A.B., Kovach V.P., Vernikovskaya I.V., Matushkin N.Yu. and Yasenev A.M. Late Riphean alkaline magmatism in the western margin of the Siberian Craton: A result of continental rifting or accretionary events? // Dokl. Earth Sci. 2008, 419(1), 226–230, [doi:10.1134/S10283334X08020086](https://doi.org/10.1134/S10283334X08020086)
- [2] Vernikovskaya A.E., Vernikovskiy V.A., Matushkin N.Yu., Kadilnikov P.I., Wingate M.T.D., Bogdanov E.A. and Travin A.V. Cryogenian A-type Granites of the Yenisei Ridge – Indicators of Tectonic Transformation in the Southwestern Margin of the Siberian Craton // Russ. Geol. Geophys. 2022, 64(6), 647–668, [doi: 10.2113/RGG20224532](https://doi.org/10.2113/RGG20224532)
- [3] Romanova I.V., Vernikovskaya A.E., Vernikovskiy V.A., Matushkin N.Y. and Larionov A.N. Neoproterozoic alkaline magmatism and associated igneous rocks in the western framing of the Siberian craton: petrography, geochemistry, and geochronology // Russ. Geol. Geophys. 2012, 53(11), 1176–1196, [doi: 10.1016/j.rgg.2012.09.005](https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.09.005)
- [4] Vernikovskaya A.E., Datsenko V.M., Vernikovskiy V.A., Matushkin N.Yu., Laevskiy Yu.M., Romanova I.V., Travin A.V., Voronin K.V. and Lepekhina E.N. Magmatism evolution and carbonatite-granite association in the Neoproterozoic active continental margin of the Siberian craton: Thermochronological reconstructions // Dokl. Earth Sci. 2013, 448(5), 161–167, [doi: 10.1134/S10283334X13020177](https://doi.org/10.1134/S10283334X13020177)

- [5] Müller A. Rapakivi granites. *Geology Today* 2007, 23(3), 114–120. [doi: 10.1111/j.1365-2451.2007.00616.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2451.2007.00616.x).
- [6] Dharma Rao C.V., Santosh M., Zhang Z. and Tsunogae T. Mesoproterozoic arc magmatism in SE India: Petrology, zircon U–Pb geochronology and Hf isotopes of the Bopudi felsic suite from Eastern Ghats Belt // *J. Asian Earth Sci.* 2013, 75, 183–201, [doi: 10.1016/j.jseaes.2013.07.021](https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.07.021)
- [7] Dahlquist J.A., Verdecchia S.O., Baldo E.G., Basei M.A.S., Alasino P.H., Urán G.A., Rapela C.W., da Costa Campos Neto M. and Zandomeni P.S. Early Cambrian U–Pb zircon age and Hf-isotope data from the Guasayán pluton, Sierras Pampeanas, Argentina: implications for the northwestern boundary of the Pampean arc // *Andean Geology* 2016, 43(1), 137–150, [doi: 10.5027/andgeoV43n1-a08](https://doi.org/10.5027/andgeoV43n1-a08)
- [8] Zandomeni P.S., Moreno J.A., Verdecchia S.O., Baldo E.G., Dahlquist J.A., Morales Cámara M.M., Balbis C., Benítez M., Serra-Varela S. and Lembo Wuest C.I. Crystallization conditions and Petrogenetic characterization of metaluminous to peraluminous calc-alkaline orogenic granitoids from mineralogical systematics: The Case of the Cambrian magmatism from the Sierra de Guasayán (Argentina) // *Minerals* 2021, 11(2), 166, <https://doi.org/10.3390/min11020166>
- [9] Vernikovskaya A.E., Fridovsky V.Yu., Rodionov N.V., Matushkin N.Yu., Kadilnikov P.I., Kudrin M.V. and Tarasov Ya.A. Rapakivi granites and associating magmatism during the Aptian development phase of the Siberian Craton active continental margin (Northeast Asia) // *Dokl. Earth. Sci.* 2024, in press, [doi: 10.1134/S1028334X23602869](https://doi.org/10.1134/S1028334X23602869)
- [10] Vernikovskaya A.E., Vernikovskiy V.A., Travin A.V., Sal'nikova E.B., Kotov A.B., Kovach, V.P. and Wingate, M.T.D. A-type leucogranite magmatism in the evolution of continental crust on the western margin of the Siberian craton // *Russ. Geol. Geophys.* 2007, 48(1), 3–16, [doi: 10.1016/j.rgg.2006.12.002](https://doi.org/10.1016/j.rgg.2006.12.002)
- [11] Sazonov A.M., Fedorova A.V., Zvyagina E.A., Leont'ev S.I., Vrublevskiy V.V., Gertner I.F. and Gavrilenko V.V. The Transangara alkaline pluton, Yenisei Range: Rb–Sr and Sm–Nd isotope ages and sources of feldspathoid magmas in Late Precambrian // *Dokl. Earth Sci.* 2007, 413(2), 469–473, [doi: 10.1134/S1028334X07030336](https://doi.org/10.1134/S1028334X07030336)
- [12] Borisenko A.S., Sazonov A.M., Nevolko P.A., Naumov E.A., Tessalina S., Kovalev K.R. and Sukhorukov V.P. Gold deposits of the Yenisei Ridge (Russia) and age of its formation // *Acta Geologica Sinica (English Edition)* 2014, 88(2), 686–687, [doi: 10.1111/1755-6724.12375_4](https://doi.org/10.1111/1755-6724.12375_4)
- [13] Nevolko P.A., Borisenko A.S., Travin A.V. and Romanov A.V. Concerning the age of the ore mineralization of the Yenisei Ridge and its correlation with magmatism // *Otechestvennaya geologiya* 2009, 4, 30–34 (In Russian).
- [14] Vernikovskaya A.E., Vernikovskiy V.A., Sal'nikova E.B., Kotov A.B., Kovach V.P. and Datsenko V.M. A Neoproterozoic anorogenic event in the Yenisei Ridge: new geochemical and isotopic-geochronological data // *Dokl. Earth Sci.* 2005, 403(6), 833–837.
- [15] Vrublevskii V.V., Reverdatto V.V., Izokh A.E., Gertner I.F., Yudin D.S. and Tishin P.A. Neoproterozoic carbonatite magmatism of the Yenisei Ridge, Central Siberia: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Penchenga rock complex // *Dokl. Earth Sci.* 2011, 437(2), 443–448, [doi: 10.1134/S1028334X11040088](https://doi.org/10.1134/S1028334X11040088)
- [16] Sobachenko V.N., Plyusnin G.S., Sandimirova G.P. and Pakhol'chenko Yu.A. Rb–Sr age of the near-fault alkalic metasomatites and granites of the Tatarka–Penchenga zone (Yenisei Ridge) // *Dokl. Akad. Nauk SSSR* 1986, 287, 1220–1224 (In Russian).
- [17] Whalen J.B. and Hildebrand R.S. Trace element discrimination of arc, slab failure, and A-type granitic rocks // *Lithos* 2019, 348–349, 105179, [doi: 10.1016/j.lithos.2019.105179](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.105179)

СРЕДНЕМЕЗОЗОЙСКИЕ ОСАДОЧНЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ ВОСТОКА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ (СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ, ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И СПОСОБЫ ИХ РЕШЕНИЯ)

Виталий Гриненко

ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

THE MIDDLE MESOZOIC SEDIMENTARY FORMATIONS OF THE EAST OF THE SIBERIAN PLATFORM (STATE OF KNOWLEDGE, MAIN PROBLEMS AND WAYS TO SOLVE THEM)

Vitaliy Grinenko

Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. The modern concepts of the dissection and correlation of sedimentary formations of the Middle Mesozoic in the buried depressions of the sedimentary cover of the east of the Siberian platform are presented. Representative reference sections in various structural and facies zones and subordinate areas of the western periphery of the Verkhoyansk-Kolyma folded region are studied. The research is based on a detailed correlation of the Upper Triassic-Jurassic sections of continental and marine genesis developed in depressions and which are promising for the discovery of various minerals. The estimation of the age and stratigraphic framework of the geological bodies of the studied interval is correlated with the general and regional stratigraphic scales.

1. Состояние изученности

В 2000-2010 гг. результаты исследований поздне триасово-юрских отложений, включающие и детальный анализ разрезов ряда районов западной периферии Верхояно-Колымской складчатой области, охваченной площадью листа Q-52 «Верхоянские цепи», нашли отражение в Региональной стратиграфической схеме юрских отложений Восточной Якутии [1]. Основные выводы этих исследований следующие: 1) на восточной окраине Сибирской платформы и в её в складчатом её обрамлении (Бегиджанский, Китчанский и Байбыканский стратиграфические районы) «местные» геологические тела характеризуются преимущественно терригенным составом пород, близкими по своей характеристике комплексами палеонтологических остатков, что свидетельствует о существовании в поздне триасовом-юрском палеобассейне однотипных условий седиментации. Именно здесь нижние слои юры образуют единый литостратон с верхнетриасовой кыбыттыгасской свитой. Все это – свидетельство тесной связи верхнетриасово-нижнеюрских отложений, образующих генетически связанные фациальные ряды в наиболее полных разрезах триасовой и юрской системах; 2) в пределах восточной части Сибирской платформы и в западной периферии Верхояно-Колымской складчатой области отмечается подобная цикличность строения юрских разрезов, обусловленная, вероятно, эвстатическими факторами. Кроме того, выявлен характерный терригенный седиментогенез и тип биоты, анализ которой позволил применить для целей корреляции единую шкалу региональных горизонтов и серию параллельных зональных шкал разработанную по разным группам макро- и микрофауны, применимых на всей территории севера и востока Сибири и в смежных регионах складчатого обрамления платформы; 3) на основании новых данных уточнены границы местных и региональных стратиграфических подразделений и детализированы литостратиграфические порайонные схемы на территории Восточной Якутии; 4) в качестве региональных подразделений для юрских отложений части Восточной Якутии предлагаются «сибирские» региональные горизонты и комбинация параллельных зональных шкал по разным группам макро- и микрофауны. Как показали проведенные исследования [1],

радиус действия «сибирских» региональных горизонтов ограничен на востоке западными крыльями Полоусненского и Иньяли-Дебинского синклиналиев, в пределах площади которых использована шкала региональных горизонтов Средней Сибири и Северо-Востока России [1].

2. Районирование

Позднетриасовые-юрские отложения характеризуют в целом Восточно-Сибирскую структурно-фациальную область (I). В пределах изученной территории, охватывающей часть Восточно-Сибирской структурно-фациальной области, выделены структурно-фациальные зоны и ряд районов, находящихся в подчинении к последним [1, 2]. В качестве смежной области, кратко рассмотрена Северо-Восточная структурно-фациальная область (II), граница которой интерпретируется вдоль западной периферии Полоусненского и Иньяли-Дебинского синклиналиев [3].

Новый материал последних 2-десятилетий (в т.ч., использование результатов целевых программ МПР Роснедра «Стратиграфия и палеонтология России» и «Геологическое изучение и оценка минеральных ресурсов недр территории РФ и её континентального шельфа»), полученный по верхнетриасовым – юрским отложениям исследованного региона, внес существенные коррективы в региональные и корреляционные шкалы стратиграфических основ платформы и складчатой области, поэтому существенные изменения претерпели ниже- и среднеюрские части унифицированных схем юры [1, 2].

В основе региональных стратиграфических шкал юры лежит зональная аммонитовая шкала, разработанная на разрезах морских отложений севера Сибири и соотнесенная с аммонитовым международным стандартом. Важными изменениями в сравнении с прежними схемами являются: палеонтологическое обоснование зонального расчленения верхнего тоара; пересмотр положения границы нижней и средней юры в опорных разрезах Восточной Сибири; пересмотр, в сторону удревнения интервала разреза, ранее относимого к бату и низам келловей; изменения объема среднего отдела за счет включения в него келловейского яруса, который на прежних отечественных стратиграфических схемах рассматривался в составе верхней юры. Все эти новации были синтезированы в работах, вышедших в свет в 2001-2006 г.г. и касающихся стратиграфии юры Восточной Сибири, Западной и Восточной Якутии [1,2]. В работе [2] было показано, что верхнетриасово-нижнеюрский, ниже-среднеюрский и средне-позднеюрский этапы развития палеобассейна принципиально различны, что дало основание разработать новые схемы структурно-фациального районирования и региональные стратиграфические схемы на базе параллельных зональных шкал по группам фауны и флоры отдельно для этих временных интервалов. Полученные данные позволили существенно пересмотреть утвержденную стратиграфическую схему юрских отложений Восточной Якутии, особенно в её составной, для Северо-Востока России, части [1].

С 2013 г. по ныне, завершается третий этап картографирования изученной территории Западной и Восточной Якутии в масштабе 1:1 000 000 и проходят экспертную оценку подготовленные к изданию и изданные листы Государственной геологической карты РФ масштаба 1:1 000 000. Впервые для карт подобного масштаба, охватывающих территорию западной периферии Верхояно-Колымской складчатой области, произведено картографирование расчлененного разреза юры в объеме местных (свиты, серии) стратиграфических подразделений, составляющих сводную легенду отдельного листа. Все стратифицированные подразделения юры с местными географическими названиями скоррелированы с общей стратиграфической шкалой. В легенде приведен вещественный состав местных подразделений, дана их общая палеонтологическая характеристика и определена мощность стратонов.

3. Основные проблемы

Позднетриасовые-юрские отложения, как объект исследований, довольно детально изучены. Из литературных источников следует: предшественники, проводившие изучение этого

стратиграфического интервала, посвятили основное свое внимание решению задач литостратиграфического расчленения и корреляции выделенных подразделений на региональном и межрегиональном уровнях [3, 4 и др.]. Между тем, проведение государственных крупно-, средне- и мелкомасштабных геологических съемок требовало решения этих задач на местном уровне в виде выделения и корреляции конкретных геологических тел локальной размерности. Это, в свою очередь, вызвало необходимость палеоландшафтного и биогеографического обоснования геологических обстановок геологического прошлого. На ослабление и сглаживание сложившегося методического несоответствия, в основном, и были направлены главные усилия в данной работе.

Анализ палеогеографических схем показывает, что в течение всего периода поздне-триасового–юрского осадконакопления, рассматриваемая территория представляла собой единый осадочный бассейн, каждая часть которого имела собственную и отличающуюся от других участков специфику осадконакопления. Поздне-триасово-юрские отложения характеризуются латеральной зональностью и представлены широким спектром разнофациальных терригенных пород. Для западной её части, в пределах востока Сибирской платформы (Вилуйская синеклиза, Алданская антеклиза, Предверхоанский прогиб, Хараулахский, Орулганский, Куранахский и Бараинский антиклинории), для верхнетриасовых–юрских пород характерно наличие морских, прибрежно-морских и континентальных фаций. Эти осадки были сформированы в пределах внутреннего шельфа палеобассейна [5, 6]. Для западной периферии Верхояно-Колымской складчатой области (Полоусненский и Иньяли-Дебинский синклинории), характерным является наличие преимущественно терригенных прибрежно-морских и морских пород. Последние формировались в открытой части внешнего шельфа. Однако, следует отметить, что на фоне этого многообразия фаций и палеобстановок, установлены межрегиональные уровни стабилизации, приуроченные к этапам глинистой седиментации, образовавшиеся в эпизоды максимального эвстатического подъема уровня Арктического супербассейна. Они и послужили в рассматриваемом регионе основой для выделения в едином палеобассейне седиментации естественных этапов эволюции, каждый из которых представлен реперной (трансгрессивной или регрессивной) фацией, маркирующей заполнение аккумулятивных впадин глинистыми или песчаными осадками. Эти «реперы» составили основной каркас новой двусторонней региональной стратиграфической схемы поздне-триасовых – юрских отложений изученного региона. Эти новации изменили представления о палеогеографии верхнетриасовых–юрских образований в бореальных морях востока Средней Сибири и условиях их седиментации, что позволило в 2007 г. выделить Восточно-Сибирский осадочный бассейн (ВСОБ) и рассмотреть стадии формирования осадочных толщ в пределах исследованной части палеобассейна [7, 8].

Среди верхнетриасовых – юрских геологических тел, вовлеченных в анализ, фигурируют подразделения стратиграфические (свиты, серии) и литостратиграфические (толщи). Их возраст базируется на определениях, выполненных по многочисленным фаунистическим и флористическим находкам, реже стратиграфическая корреляция выполнена с учетом положения геологических тел “под” или “над” фаунистически охарактеризованными подразделениями. Их палеонтологическая изученность достаточно высокая. Часть подразделений рассмотрена и утверждена МСК и РМСК, фигурирует в легендах нового поколения и региональных (корреляционных и унифицированных) схемах. Некоторая часть подразделений охарактеризована палеонтологически и палеоботанически в публикациях открытой печати. Большинство геологических тел прошло апробацию геологической съемкой и картографированы на макетах разномасштабных карт государственной аккредитации [5, 6].

4. Методы

Ведущими методами в исследованиях изученного интервала в пределах западной периферии Верхояно-Колымской складчатой области и сопредельной территории Сибирской платформы выступают те методы, посредством которых можно расшифровать глубинные процессы,

явления и диагностировать специфику осадконакопления в палеобассейне, что позволит определить генезис геологических тел.

В основном этапе изучения был выполнен лито–стратиграфический анализ поздне триасовых–юрских отложений в контексте разработок В.Г. Князева с соавторами [9]. Также, диагностика разрезов опиралась на общепринятые правила, изложенные Н.Н. Предтеченским [10]. При этом, в основу познания структуры разрезов геологических тел были положены стратиграфический и палеонтологический методы. Они, по мере необходимости, дополнялись литолого–фациальным, фациально–циклическим и секвенс–стратиграфическим методами анализа [11]. Таким образом, на изученной территории были выполнены общие исследования специфики и общего генезиса фаций в сложной, по набору пород в вертикальной структуре разрезов, а также при диагностики взаимных переходов генетически различных, но одновозрастных отложений верхнего триаса–юры по площади их распространения. При лабораторных исследованиях были построены результирующие профили, схемы и модели, основывающиеся на изложенных выше вспомогательных рабочих методиках палеогеографического анализа [12, 13].

5. Основные результаты

Верхнетриасовые–юрские отложения, развитые в западной периферии Верхояно–Колымской складчатой области (ВКСО) и сопредельной территории Сибирской платформы формируют в изученной части Восточно–Сибирского осадочного бассейна (ВСОБ) лаптевский подкомплекс верхоянского терригенного комплекса (ВТК), который охватывает по времени формирования верхний подъярус рэтского яруса – нижневожжский подъярус вожжского яруса. Выделение в составе ВТК лаптевского подкомплекса обусловлено оконтуриванием на изученной территории палеобассейна местных геологических тел, связанных единой спецификой и историей формирования, скоррелированных между собой и ранжированных в вертикальном диапазоне на основе «сибирских» реперных горизонтов. Рассмотренные отложения подкомплекса входят в состав Восточно–Сибирской структурно–фациальной области, в пределах которой выделено 5 структурно–фациальных зон и, находящихся в подчинении к последним, 16 районов [14].

В Вилюйской синеклизе толщи среднего мезозоя залегают несогласно на триасовых отложениях и повсеместно перекрыты мощным плащом образований мелового возраста (Лено–Алданская СФЗ). В центральной части Предверхоаянского прогиба в составе лаптевского подкомплекса ВТК прослеживаются переходные (в основании имеются слои рэтского возраста) поздне триасовые–юрские отложения, которые повсеместно ложатся на подстилающие отложения с региональным перерывом (Предверхоаянская СФЗ). В изученной части ВКСО отложения лаптевского подкомплекса развиты ограничено, слагая узкие полосы в бассейнах верхний р. р. Бытангай, Дулгалах, Сартанг, Адыча и Индигирка. Здесь, базальные слои подкомплекса нередко залегают как согласно, так и трансгрессивно на подстилающих триасовых толщах и, представлены в большинстве своем, морскими фациями (Западно–Верхоаянская и Южно–Верхоаянская СФЗ). Биостратиграфической основой расчленения и корреляции мощных разнофациальных толщ лаптевского подкомплекса является ангарская макрофлора в совокупности с комплексами морской раковинной макро– и микрофауны, в которых преобладают двустворчатые моллюски, а также присутствуют родовые сообщества других, не менее важных фоссилей: фораминифер, белемнитов, криноидей, брахиопод и аммонитов. Степень изученности отложений подкомплекса в пределах исследованной части ВСОБ (восток Сибирской платформы, в Хараулахском, Орулганском антиклинориях и Сартангском синклинории) различная. Наиболее полно они охарактеризованы фаунистически, флористически или же палеоботанически и изучены средне– и крупномасштабными геологическими, а также тематическими работами в Вилюйской синеклизе и Предверхоаянском прогибе. В Сартангском синклинории отложения подкомплекса обоснованы наиболее полными и непрерывными разрезами нижней и средней юры, насыщенных остатками ископаемой фауны.

Весьма важным достоинством лаптевского подкомплекса является наличие в его составе типов разрезов, сформированных в палеобассейне проградирующими (с запада на восток изученной территории) осадками дельт двух крупных речных систем: палео-Вилуя и палео-Алдана [14, 15]. Морфология геологических тел в типовых разрезах речных палеосистем близка к осадочным призмам дельтовой платформы. Они выделяются в разрезах по количественному набору породных ассоциаций, включающих как отдельные свиты континентального генезиса, так и более крупные их подразделения – серии. В структуре типов разрезов стратиграфические подразделения представлены фациями континентального, морского генезиса, перемежающихся с прибрежно-морскими и континентальными осадками; прослеживаются слои прибрежно-морские и образования континентальные, часто угленосные, а так же установлено сочетание континентальных (безугольных) толщ, чередующихся с прибрежно-морскими породами. На востоке исследованной территории наблюдаются морские отложения, сменяющиеся прибрежно-морскими и вулканогенно-осадочными образованиями [16].

Изучив в каждой структуре разрезов налегающие друг на друга фациальные разновидности пород, автор тем самым выявил их стратиграфическую и латеральную последовательность, при этом было установлено, что в разрезах могут чередоваться и, несогласно перекрывать собой подстилающие осадки только те геологические фации, которые в структурах разрезов наблюдаются по латерали в непосредственном соседстве. Каркас лаптевского подкомплекса изученной части палеобассейна (с запада на восток) объединяет 16 районов, каждому из которых отвечает определенный тип разреза. Представительность в разрезах макро-, и микрофаунистических, а также флористических и палеоботанических остатков [1] позволила увязать в пределах каркаса новой региональной схемы местные, локально распространенные тела подкомплекса складчатой области и чехла платформы на основе «сибирских» реперных стратиграфических уровней [14]. Предложенное расчленение лаптевского подкомплекса на свиты и серии Восточно-Сибирского осадочного бассейна (ВСОБ) было увязано [14] с региональными стратиграфическими схемами юры [2] и, с материалами глубокого колонкового бурения по Восточной Сибири, а также, - с региональной (унифицированной) стратиграфической схемой юры Северо-Востока России [17] и региональной стратиграфической схемой Восточной Якутии [1].

Таким образом, путем ранжирования геологических тел и комплексной увязки их по двум крупным сегментам земной коры на основе «сибирских» реперных стратиграфических уровней, была создана новая региональная стратиграфическая основа, которая на современном уровне знаний раскрывает стратификацию геологических тел, специфику седиментогенеза и историю верхнетриасового-юрского осадконакопления изученной территории и, в составе ВТК был выделен лаптевский подкомплекс ВСОБ [15]. Конструкция этой схемы определяет латеральные и вертикальные параметры лаптевского подкомплекса – стратифицированного геологического тела с упорядоченной совокупностью осадочных образований. На становление и эволюцию ВСОБ повлияли: талассократический (доминирующий режим Арктического супербассейна) и геократический (вспомогательная роль режима Тихоокеанского супербассейна) факторы. В пределах изученной территории тела сформировались в течение трех стадий седиментации и трех кратковременных эпох (фаз) глобальной активизации тектонических движений, проявившихся в эволюции ВСОБ: древнекиммерийской, данлапской и новокиммерийской [14].

6. Заключение

Изложены современные представления о расчленении и корреляции осадочных образований среднего мезозоя в погребенных депрессиях осадочного чехла востока Сибирской платформы. Изучены представительные опорные разрезы в различных структурно-фациальных зонах и подчиненных им районах западной периферии Верхояно-Колымской складчатой области. На изученной территории исследования базируются на детальной увязке верхнетриасово-юрских разрезов континентального и морского генезиса, развитых в депрессиях и являющихся перспективными на обнаружение различных полезных ископаемых. Оценка возраста и

стратиграфического объема геологических тел изученного интервала скоррелирована с общей и региональной стратиграфическими шкалами. Выполненное исследование имеет определяющее значение для решения ключевых вопросов возрастного расчленения, датирования местных осадочных подразделений (свит, серий), их порайонной и межрегиональной корреляции, повышения достоверности палеогеографических реконструкций и усиления степени надежности минерагенического прогноза западной периферии Верхояно-Колымской складчатой области и сопредельной территории Сибирской платформы.

7. Благодарности

Работа выполнена по государственному заданию ИГАБМ СО РАН (проект FUFГ-2024-0005) и профинансирована Минобрнауки России.

8. Литература:

- [1] Knyazev V.G., Grinenko V.S., Devyatov V.P., Shurygin B.L., Nikitenko B.L., Meledina S.V., Dzyuba O.S. Regional Stratigraphic Scheme of Jurassic Deposits of Eastern Yakutia // Russian Geology, 2002, № 4. pp. 73-80.*(in Russian)*
- [2] Shurygin B.N., Devyatov V.P., Zakharov V.A., Knyazev V.G., Ilyina V.I., Meledina S.V., Nikitenko B.L., Grinenko V.S. Stratigraphy of the Jurassic of Eastern Siberia // Bulletin of the State Committee of Geology. Materials on geology and minerals of the Republic of Sakha (Yakutia). 2001, № 1. Yakutsk: Yakutian Branch of Publishing House SB RAS, 2001. pp.112–129.*(in Russian)*
- [3] Geological Map of the Siberian Platform and Adjacent Territories on a Scale of 1:1500 000 / Authors-compilers: N.S. Malich, E.P. Mironyuk, E.V. Tuganova, V.I. Avdeeva, S.P. Alekseev, A.M. Anokhin, V.V. Bezzubtsev, Yu.S. Glukhov, V.S. Grinenko, etc. (Editor-in-chief N.S. Malich, VSEGEL. St. Petersburg: St. Petersburg Kartfabrika VSEGEL, 1999.*(in Russian)*
- [4] 1:500000 Scale Geological Map of Yakutia. Central Yakut Block. Sheets: R-51-A,B; R-51-B,G; R-52-A,B; R-52-B,G / authors-compilers: V.S. Grinenko, V.A. Kamaletdinov, Yu.L. Slastenov, etc. (Editor of the block: V.S. Grinenko, SUE "YAPSE"). St. Petersburg: St. Petersburg kartfabrika VSEGEL, 2000.*(in Russian)*
- [5] Geological Map. Q-52 (Verkhoyansk chains). Verkhoyano–Kolyma Series / Authors-Compilers: V.S. Grinenko, A.M. Truschelev, L.I. Smetannikova, A.P. Kropachev, O.I. Shcherbakov // State Geological Map of the Russian Federation scale 1:1,000,000 (third generation). St. Petersburg: St. Petersburg Kartfabrika VSEGEL, 2008.*(in Russian)*
- [6] Geological Map. R-51 (Jardjan). Anabaro–Vilyuiskaya Series / Authors-Compilers V.S. Grinenko, L.A. Yuganova, A.M. Truschelev, Yu.A. Malanin, L.I. Smetannikova, V.G. Knyazev, A.V. Prokopyev, G.G. Kazakova, R.I. Protopopov // State Geological Map of the Russian Federation Scale 1:1000000 (Third Generation). St. Petersburg: St. Petersburg kartfabrika VSEGEL, 2013.*(in Russian)*
- [7] Grinenko V.S., Knyazev V.G., Devyatov V.P., Nikitenko B.L., Shurygin B.N. A new Regional Stratigraphic Scheme of Upper Triassic-Jurassic Deposits of the East of the Siberian Platform and Folded Framing // Paleontology, Stratigraphy and Paleogeography of the Mesozoic and Cenozoic Boreal Regions: Materials of Scientific Research. Sessions (April 18-22, 2011): in 2 Volumes / Edited by B.N. Shurygin, N.K. Lebedeva, A.A. Goryacheva. Vol. 1. Mesozoic. Novosibirsk: INGG SB RAS, 2011. pp. 65-70.*(in Russian)*
- [8] Grinenko V.S., Knyazev V.G., Devyatov V.P., Shurygin B.N., Meledina S.V., Nikitenko B.L., Dzyuba O.S. Features of the Jurassic Stage of Formation of the East Siberian Sedimentary Basin // Jurassic System of Russia: Problems of Stratigraphy and Paleogeography. The Second All-Russian Meeting. Scientific Materials. Yaroslavl: Publishing House of Yaroslavl State Pedagogical University, 2007. pp. 46-48.*(in Russia)*

- [9] Knyazev V.G., Devyatov V.G., Shurygin B.N. Stratigraphy and Paleogeography of the Early Jurassic of the East of the Siberian Platform. Yakutsk: IG SB of the USSR Academy of Sciences, 1991. 100 p.*(in Russian)*
- [10] Predtechensky N.N. Tasks and Rules for the Study of Reference Stratigraphic Sections. L.: MSK, VSEGEI, 1983. 33 p.*(in Russian)*
- [11] Preobrazhensky M.B. Sequence-Cyclostratigraphy: An Introduction to the Circle of Concepts // Sequence-Stratigraphy of Oil and Gas Basins of Russia and the Countries of the NSG.: Abstracts of Reports of the International Conference. St. Petersburg, 1995. pp. 101-105.*(in Russian)*
- [12] Grinenko V.S., Knyazev V.G., Devyatov V.P. Paleogeography of the Late Triassic and Jurassic East of the Siberian Platform and Folded Framing // Bulletin of the State Committee of Geology. Materials on Geology and Minerals of the Republic of Sakha (Yakutia). № 1 (11). Yakutsk: LLC "Dani Almas Company", 2012. pp. 63-79.*(in Russian)*
- [13] Grinenko V.S., Knyazev V.G., Devyatov V.P., Nikitenko B.L., Shurygin B.N. Stages of Formation and Paleogeography of the Laptev Subcomplex of the East Siberian Sedimentary Basin (Late Triassic-Jurassic) // Bulletin of the State Committee of Geology. Materials on Geology and Minerals of the Republic of Sakha (Yakutia). № 1 (10). Yakutsk: Goskomgeologiya RS (Ya), 2011. pp. 63-70.*(in Russian)*
- [14] Grinenko V.S. The History of the Formation of Upper Triassic-Jurassic Sediments of the East Siberian Sedimentary Basin (east of the Siberian platform and folded framing). Abstract of the Dissertation for the Degree of Candidate of Geological and Mineralogical Sciences. Irkutsk, 2010. 19 p.*(in Russian)*
- [15] Grinenko V.S. Aldansky type of Jurassic Section: State, Problems of Dissection and Correlation (East of the Siberian Platform) // Jurassic System of Russia: Problems of Stratigraphy and Paleogeography. The Second All-Russian Meeting. Scientific Materials. Yaroslavl: Publishing House of the Yaroslavl State Pedagogical University. University, 2007. pp. 43-45.*(in Russian)*
- [16] Grinenko V.S., Goryacheva A.A. Typical Sections of the Lower-Middle Jurassic of Poleo-Vilyui and Paleo-Aldan According to Drilling Data: Correlation and their Palynological Characteristics (east of the Siberian Platform) // Micropaleontology: Fundamental Problems and Contribution to the Regional Geological Study of the Subsurface (Dedicated to the Memory of A.I. Zhamoyda). Proceedings of the XVIII All-Russian Micropaleontological Meeting (St. Petersburg, October 30-November 3, 2023) / chief ed. M.A. Tkachenko; rev. ed. A.S.Alekseev, V.S. Vishnevskaya, E.L. Grundan, T.Y. Tolmacheva. – St. Petersburg: VSEGEI Publishing House, 2023. pp. 301-305.*(in Russian)*
- [17] Decisions of the Third Interdepartmental Regional Stratigraphic Meeting on the Precambrian, Paleozoic and Mesozoic of the North-East of Russia (St. Petersburg, 2002) / Ed. T.N. Koren, G.V. Kotlyar. St. Petersburg: VSEGEI Publishing House, 2009. 286 p.*(in Russian)*

ОСНОВНЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ТЕЛА ИЗ РАЗРЕЗОВ ВЕРХНЕГО ТРИАСА-НИЖНЕЙ ЮРЫ ЗАПАДНОЙ ПЕРИФЕРИИ ВИЛЮЙСКОЙ СИНЕКЛИЗЫ

Виталий Гриненко, Мария Ощепкова

ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

THE MAIN GEOLOGICAL BODIES FROM SECTIONS OF THE UPPER TRIASSIC-LOWER JURASSIC OF THE WESTERN PERIPHERY OF THE VILYUI SYNECLISE

Vitaliy Grinenko, Mariya Oshchepkova

Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. Norian-Hettangian kaolinic weathering crust, – The Boidomonskaya formation, is represented by yellow, yellow-whitish and white sands and clays, it is located in the western periphery of the Vilyui syncline; unconformably occurs, according to the data of mapping, prospecting and exploration core drilling, on diamonds on the carbonate basement of the Paleozoic in depressions of the middle and upper reaches of the ancient Paleo-Vilyui with different morphology. Its analogues, according to deep core drilling for oil and gas, are determined in a sedimentary cover under younger formations, in a buried relic of continental genesis, in the bottom of the Lower Jurassic Kyzylsyr formation of the Khapchagay stratigraphic region of the Lena-Aldan structural-facial zone. Along the western periphery of the Vilyui syncline, in its central framing, in natural sections of the Jurassic, The Hettangian-Lower Plinsbach deposits of continental genesis have been identified, which unconformably occur on the Norian-Hettangian kaolinic weathering crust, overlain by a thick mass of marine and coastal marine rocks of the upper Plinsbach, Toarcian and lower Aalenian. Here, in the western periphery of the syncline, these sediments are covered unconformably higher up in the section by continental Aalenian formations of the Chonskaya formation of the Chonskaya -Tunguska depression, thus marking the reference section of the paleo-Vilyui in the upper part of the river system. In its middle and lower parts, this river system is identified by the presence of the Yakutskaya formation – a typical representative of continental sediments from the vast landscapes of the paleobasin, designated by the Lena-Vilyui stratigraphic region of the Lena-Aldan structural and facial zone. These geological bodies dominate the reference sections of the Paleo-Vilyui, being the basic ones for the sections, characterizing the basal layers of the bottom of this river system, as well as the lithostratons controlling its top in this system.

1. Основные геологические тела

1.1. Триасовая система, верхний отдел – юрская система, нижний отдел нерасчлененные Бойдомонская свита (T_3-J_1bd) распространена в Укугут-Мурбайской подзоне. Выделена в 1978 г. Ю.А. Дукардтом и М.М. Одинцовой и утверждена МСК СССР в 1981 г. с норийско-рэтским возрастом [1]. Ранее, в 1970-1975 гг. свита выделялась как нижняя пачка иреляхской свиты (T_3-J_1ir). Её стратотипической местностью является бассейн верхнего течения р. Оччугуй-Ботуобуйа, где разрез вскрыт скважинами колонкового бурения №№ 811, 902, 1042 и др. Название дано по руч. Бойдомоон – левому притоку р. Оччугуй-Ботуобуйа. Свита выполняет эрозионно-тектонические депрессии. Подстилаются глинисто-щебнистой корой выветривания и породами нижнего палеозоя. По литологическому составу свита делится на две пачки.

Первая пачка ($T_3-J_1bd^1$) представлена алевролитами, аргиллитами с углистыми прослоями и линзами песков, песчаников, песчано-гравийных с галькой и щебнем подстилающих пород в

основании. Пески и песчаники тонко-мелкозернистые серые, светло-серые, кварцевые. Алевролиты в неравномерном переслаивании с песчаниками и аргиллитами. В аргиллитах – обилие тонко распыленного углефицированного детрита. Отложения плохо сортированные. Мощность 0–20 м.

К краевым частям депрессий происходит постепенное выпадение из разреза нижних горизонтов пачки и уменьшение её мощности до полного выклинивания.

Вторая пачка ($T_3-J_1bd^2$) представлена алевролитами в неравномерном переслаивании с аргиллитами, глинами, песками, песчаниками. Алевролиты серые, светло-серые тонкослоистые, часто содержат мелкие обломки аргиллитов. Аргиллиты серые, зеленовато-серые, иногда зеленые с линзовидными прослоями и мелкими гнездами песка, с обломками алевролитов, редким гравием. Пески мелкозернистые кварцевые слюдистые. Иногда в разрезе присутствуют брекчии, представленные обломками алевролитов и мергелей с глинистым цементом. Для всего разреза характерна насыщенность углефицированным растительным детритом. Мощность 0-50 м. В краевых частях депрессий отложения второй пачки залегают непосредственно на нижнепалеозойском основании.

Бойдомонская свита нерасчлененная (T_3-J_1bd) представлена алевролитами, аргиллитами, песчаниками, глинами с галькой, с прослоями песчаников. В основании – брекчии осадочных пород с примесью гравия, иногда маломощные конгломераты. Мощность 0-50 м.

Свита охарактеризована флористическими остатками *Neocalamites aff. carcinoides* Harr., *N. cf. careri* (Zeil) и др., а также спорово-пыльцевым комплексом, в котором доминируют *Alisporites*, *Disaccites*, *Steriosporites*, *Protoconiferus*. На основании определений флоры, спор и пыльцы установлен поздне триасовый (норий-рэт) – раннеюрский (геттанг) возраст бойдомонской свиты.

1.2. Юрская система, нижний отдел

Юлегирская свита (J_1jul) распространена в пределах Центрально-Ботубинской структурно-формационной подзоны. Выделена в 1988 г., в процессе подготовки рабочей опорной легенды Ботубинской серии масштаба 1:50 000 (Легенда..., 1989 г., фонды ТГФ).

На раннем этапе геологических исследований района (Н.В. Кинд, 1956 г., фонды ТГФ) изученный интервал разреза картировался как укугутская свита нижней юры (J_1uk); с 1961 г. – этот же разрез именовался уже как иреляхская свита (T_3-J_1ir) со стратотипом в карьере «Водораздельные галечники» и обозначался на картах разного геологического содержания на левобережье р. Иирэлээх (Ирелях) аббревиатурой «ВГ» [2]. В геологическом обиходе среди исследователей алмазной тематики стала фигурировать проблема диагностики «водораздельных галечников». В дальнейшем, было установлено несоответствие объема картируемой «иреляхской свиты» и положения её верхней границы первоначальному стратотипу. В 1980 г. Ю.А. Дукардт [1] предложил исключить иреляхскую свиту из региональной стратиграфической схемы и вновь вернуться к геологическому телу с названием «укугутская свита». Этот раннеюрский геологический литостратон и его стратиграфические рубежи формирования прочно вошли в обиход мелкомасштабного регионального картосоставления [3 и др.]. При этом верхняя часть бывших, выделенных ранее, – иреляхской и укугутской свит, была объединена в оруктахскую свиту, которой соответствовал первоначально выделенный стратотип иреляхской свиты (бывший новый стратотип «водораздельных галечников», с аббревиатурой – «ВГ»).

Выделяемая юлегирская свита Центрально-Ботубинской подзоны соответствует по стратиграфическому объему укугутской (J_1uk) и верхней части бойдомонской (T_3-J_1bd) свит Укугут-Мурбайской подзоны. Стратотипической местностью принят бассейн руч. Юлээгиир (Юлегир) – левого притока р. Оччугуй-Ботубуа, где разрез свиты вскрыт многочисленными скважинами (120/30, 122/30, 130/38, 132/36 и др.).

Юлегирская свита залегает на эродированной поверхности нижнепалеозойских пород и выполняет локальные депрессии северо-западного склона Ангаро-Вилойского прогиба.

Перекрывается оруктахской свитой. Представлена смешанным типом отложений – делювиально-аллювиального и озеро-болотного генезиса. В свите значительная роль принадлежит продуктам дезинтеграции местных пород и переотложенных кор выветривания. По литологическому составу свита делится на две пачки.

Первая пачка (J_{1jul}^1) представлена карбонатными глинами, алевролитами, углистыми глинами, аргиллитами с прослоями и линзами бурых глей. В основании глинисто-карбонатные брекчии и гравелито-брекчии. Отмечаются редкие прослои разнозернистых песков и песчаников. Мощность 0–35 м.

Вторая пачка (J_{1jul}^2) представлена алевролитами, аргиллитами, песками. Имеет более выдержанный по простиранию литологический состав в сравнении с первой пачкой. Алевролиты серые, темно-серые до черных, часто углистые, глинистые с прослоями бурых углей, с галькой, гравием, щебнем алевролитов и обломков бурого угля. Аргиллиты темно-серые до черных углистые с прослоями бурых углей, алевролитов, редкие прослои среднезернистых песков с гравием и обломками бурого угля. В основании – пески грубозернистые с галькой преимущественно местных пород. Мощность 0–25 м.

Юлегирская свита нерасчлененная (J_{1jul}) состоит из алевролитов, глин, углистых глин с включениями гальки, гравия, щебня, с прослоями песков, бурых углей. Мощность 0–50 м.

В глинах и углистых глинах обнаружены растительные остатки *Equisetitesibiricus* Pryn., *E. exgr. ferganensis* Sev., *Cladophlebisaktaschensis* Tur.-Ket., *Czenowskiarigida* Heer., *Phoanicosisanquistifolia* Heer. В спорово-пыльцевых комплексах доминируют *Protoconiferusfinaricus* Naum., *Dipterellaoblatinoides* Mal., *Bennettites* sp. и др. На основании определений флоры, спор и пыльцы принят раннеюрский (геттанг-синемюр) возраст юлегирской свиты.

Укугутская свита (J_{1uk}) выделена в 1954 году А.А. Арсеньевым и В.А. Ивановой в бассейне среднего течения р. Вилюй. Стратотипом является обнажение, расположенное на левом берегу р. Вилюй, выше устья р. Огогуут (Укугут). В данном обнажении отсутствует верхняя часть свиты и перекрывающие её отложения. Полные разрезы свиты вскрыты многочисленными скважинами колонкового бурения в бассейне рек Аппайа и Вилючаны, Нелби (скв. 33 4002-40013, 13/20, 17/260 и др.), которые и являются гипостратотипом укугутской свиты. Её мощность, судя по изученным разрезам нижней юры в междуречьях бассейнов Вилюй-Лена и Лена-Алдан заметно изменяется [4].

До 1980 г. укугутская свита выделялась в объеме геттанг-нижний плинсбах (карикский подъярус). После пересмотра объема укугутской свиты выделено самостоятельное геологическое тело – оруктахская свита раннеплинсбахского возраста, а укугутская свита осталась в объеме геттанг-нижний плинсбах. Данные подразделения были утверждены МСК СССР в 1981 г. [1, 5 – 11].

В западной периферии Вилюйской синеклизы укугутская свита распространена в пределах Укугут-Мурбайской структурно-формационной подзоны. Здесь она залегает со стратиграфическим и угловым несогласием на глубоко эродированной поверхности палеозойских пород и, также, она диагностирует и проявление на бойдомонской свите перерыва с размывом регионального характера. Здесь геологическое тело с названием оруктахская покрывается уже укугутской свитой [4].

Установлено, что свита представлена типично аллювиальными отложениями, для которых характерно ритмичное строение [9, 11 – 13]. Песчано-гравийно-галечные образования и конгломераты переслаиваются с разнозернистыми песками, гравелитами, алевролитами. Для всего разреза характерна насыщенность крупными обломками древесены и углистым детритом. Цвет пород серый, пепельно-серый, буроватый. Грубообломочный материал галечников и конгломератов представлен кварцем, кремнями, изверженными породами, и составляет до 70% объема конгломератов и галечников. Цемент песчаный, песчано-глинистый, известковистый, иногда известковисто-железистый. Пески граувакково-кварц-полевошпатовые серые,

желтовато-серые, часто косослоистые. Алевролиты светло-серые тонкогоризонтально-слоистые. Мощность 0–60 м.

Возраст свиты (геттанг-нижний плинсбах) принят на основании определений растительных остатков: флоры *Equisetitesaff. arenaceus*(Laeg.), Schenk., *Neocalamitescf. careri* (Zeil.), *N. pinitoides*Tur.-Ket. и др., а также спорово-пыльцевого комплекса с доминантами *Coniferales*, *Ginkgoales*, *Benettites*и др.

Оруктахская свита (J_{1or}) распространена в Центрально-Ботубинской и Укугут-Мурбайской подзонах. Выделена в 1980 г. Ю.А. Дукардтом и М.М. Одинцовой в связи с пересмотром объема укугутской свиты. Утверждена МСК СССР в 1981 г. Стратотипической местностью принято правобережье р. Оччугуй-Ботубуя в бассейне её притоков рр. Оруктах и Эргэ-Юрях, где разрез свиты вскрыт скважинами 2002 и 4026 и др. Свита залегает согласно или с внутрiformационным размывом на породах укугутской и юлегирской свит и трансгрессивно с размывом на породах нижнего-верхнего палеозоя, а также установлены её реликты, залегающие на трапах нижнего триаса.

В Укугут-Мурбайской подзоне свита имеет существенно песчаный состав с маломощными прослоями алевролитов, песчаников, часто с галечниками и гравелитами в основании. Пески кварц-полевошпатовые серые, желтовато-серые средне-мелкозернистые с включениями слабоокатанных обломков алевролитов. Алевролиты серые, темно-серые тонкослоистые, иногда массивные с включениями гравия и мелкой гальки. Мощность 20–70 м.

В Центрально-Ботубинской подзоне в составе свиты преобладают алевролиты с прослоями аргиллитов, углистых глин, бурых углей. Пески и песчаники имеют, в основном, подчиненное значение. Мощность 20–65 м.

Формирование оруктахской свиты происходило в прибрежных условиях опресненного морского бассейна, в заливах и лагунах, дельтах рек. Раннеплинсбахский возраст свиты установлен по находкам флоры: хвощей *Equisetitesferganensis*Pryn и спорово-пыльцевому комплексу, в котором доминируют *Coniferales*, *Disaccites*, *Podocarpidites*. По заключению МСК оруктахская свита соответствует карикскому подъярису плинсбахского яруса.

Вакунайкинская свита (J_{1vk}) выделена М.М. Одинцовой и В.Д. Рыбаковым в 1978 г. в стратиграфическом объеме верхний плинсбах-тоар. Стратотипической местностью является бассейн р. Чоны между рр. Ичода и Вакунайка. Свита утверждена МСК СССР в 1981 г. и принята в стратиграфической схеме Ботубинского района, т.к. здесь развиты аналогичные по составу, объему и возрасту отложения. Свита с размывом залегает на отложениях оруктахской свиты или на эродированной поверхности палеозойских образований и на долеритах нижнего триаса. По литологическому составу и содержанию фаунистических остатков свита разделяется на две подсвиты.

Нижняя подсвита (J_{1vk_1}) сложена отсортированными желтовато-серыми, бурыми песками с прослоями и линзами галечников и известковистых песчаников в нижней части разреза, алевролитов. Верхняя часть разреза сложена тонкозернистыми песчаниками, алевролитами, глинами, постепенно переходящими в аргиллиты верхней подсвиты. В галечниках и конгломератах крупнообломочный материал (кварц, кремни, изверженные породы) составляет до 60% объема породы. Отмечается присутствие уплощенной гальки подстилающих глинисто-алевритовых пород. Цемент, в основном, песчано-глинистого состава. Пески кварц-полевошпатовые слоистые мелко-среднезернистые зеленовато-серые. Иногда с примесью гравийно-галечного материала. Алевролиты зеленовато-бурые, зеленовато-серые, темно-серые с прослоями песчаников и тонких прослоек темно-серых глин. По всей толще углефицированный растительный детрит. Мощность 20–40 м.

Слоистость пород горизонтально-волнистая прерывистая. Генезис морской – прибрежно-морские и лагунные фации.

Подсвита охарактеризована фауной, определяющей её принадлежность к домерскому подъярису плинсбахского яруса: *Harpaxterguemi*Desl., *H. sp.*, *Meleagrinnellatiungensis*Petr., *Pleuromyaliasica*Kosch., *P. galathea*Ag. и др., а также флорой *Cladophlebisdenticulatei*и спорово-

пыльцевым комплексом, в котором доминируют *Osmundaacidites* spp. и *Coniferales*. Кроме того, подсвита перекрывается фаунистически охарактеризованной толщей верхней подсвиты (тоарский ярус).

Верхняя подсвита (J_1vk_2) сложена аргиллитами, глинами, алевролитами с прослоями песков и песчаников в нижней части разреза. Верхняя часть разреза сложена песками, песчаниками с прослоями известняков, алевролитов и глин. Пески полевошпатово-кварцевые мелко-среднезернистые серые, желтовато-серые, иногда с примесью гравия. Алевролиты зеленовато- и желтовато-серые, желтовато-бурые на известковистом цементе горизонтально-косослоистые. Известняки алевролитистые, часто пиритизированные. На породах нижней подсвиты залегание согласное. Мощность 35–65 м.

Генезис отложений морской. Подсвита охарактеризована многочисленной фауной, определяющей её принадлежность к тоарскому ярусу: *Ledajacutica* Petr., *L. acuminata* Petr., *L. sp. Dacriomya inflata* Petr., *D. jacutica* Petr., *Tancredia stubendorfi* Schmidt., *Pleuromya liassica* Kosch., *Nannobelus pavlovi* Krim. Этот фаунистический комплекс может коррелироваться с подобными себе по возрасту комплексами морских фаун, датирующих алевролито-аргиллитовую толщу глинистого флюидоупора Виллойской синеклизы верхним лейасом, как в пределах Большого Якутска, так и в Предверхоянской структурно-фациальной зоне [14, 15, 16]. На Якутском погребенном сводовом поднятии посредством комплекса микрофауны, прослеживается береговая линия морского седиментогенеза, позволяющая диагностировать и проследить в пространстве присутствие уже континентальных среднеюрских образований кровли речной системы палео-Виллюя с якутской свитой и, к востоку от неё, сугджинской свиты, которая характерна для кровли речной системы палео-Алдана в междуречье Амга-Алдан [17].

1.3. Средний отдел

Чонская свита (J_2cn) выделена М.М. Одинцовой в 1967 году. Стратотипическая местность – устье р. Марха (приток р. Чоны). Свита утверждена МСК СССР в 1981 году, возраст её ранний аален [13] 1. Залегает с размывом на отложениях верхневакунайкинской подсвиты. Сложена песками, песчаниками с прослоями алевролитов, аргиллитов, реже углей. В основании разреза свиты часто присутствуют конгломераты. Верхняя граница – эрозионная, связана с размывом. Мощность до 30 м. Свита распространена в пределах Тунгусско-Чонской депрессии на её крайнем западе. Сопоставляется с верхней частью сунтарской свиты (J_{1-2sn}) Виллойской синеклизы. Её возраст определен по спорово-пыльцевому комплексу, в котором доминируют: *Cyathidites minor* Coup., *Osmundacidites jurassicus*, *Ginkgoales*, что не противоречит датированию свиты нижним ааленом.

2. Заключение

Оценивая значимость процессов в формировании геологических тел осадочного генезиса и преобразовании в осадочном чехле полезных ископаемых в западной периферии Верхояно-Колымской складчатой области и сопредельной территории Сибирской платформы, можно заметить, что во многих случаях решающую роль в их концентрации в существующем виде сыграли пострудные (преимущественно экзогенные) процессы, в результате которых первоначально сформированные рассеянные скопления полезных ископаемых (алмазоносные трубки, золоторудные жилы и другие локальные объекты) были подвергнуты неоднократным преобразованиям, сопровождавшимся изменениям концентраций, масштабов локализации и перемещением полезных компонентов, иногда на большие расстояния от коренных источников. В связи с этим, для выяснения закономерностей размещения таких видов полезных ископаемых, как концентрированные углеводороды, горючие каустобиолиты, фосфориты, древние россыпи золота и алмазов (промежуточные коллекторы), роль литолого-стратиграфического фактора становится важнейшей, а продуктивные на локализацию в них объекты (свиты, серии по отдельности или в совокупности) слагают минерогенетические

подразделения разного ранга и картографируются на планшетах геологических, металлогенических и других карт разного геологического содержания.

В результате комплексных исследований установлена закономерная смена фаций верхнего триаса – нижней юры в западной периферии Верхояно-Колымской складчатой области и на востоке Сибирской платформы, при этом, выявлена аналогичная Западной Сибири, так называемая «арктическая» направленность эволюции седиментационных процессов и развитие комплексов биоты, состоящих из общих групп фоссилей, что свидетельствует о единстве эволюции Восточно-Сибирского бореального осадочного бассейна. Это обстоятельство явилось основанием для использования разработанных в Западной Сибири региональных стратиграфических подразделений и расширена зона их действия в западной периферии относительно молодой Верхояно-Колымской складчатой области и древней платформы. С единых позиций проведен бассейновый фациальный анализ изученной территории, на базе результатов которого выполнено структурно-фациальное районирование. Полученные результаты крайне важны для оперативного расчленения и корреляции нижней части разреза юрских континентальных, континентально-пресноводных и морских осадков в пределах Якутского погребенного сводового поднятия и сопредельных территорий Предверхоянского краевого прогиба.

3. Благодарности

Работа выполнена по государственному заданию ИГАБМ СО РАН (проекты FUFГ-2024-0005; FUFГ-2024-0007) и профинансирована Минобрнауки России.

4. Литература:

- [1] Decisions of the 3rd Interdepartmental Regional Stratigraphic Meeting on the Development of Unified Stratigraphic Schemes of the Precambrian, Paleozoic and Quaternary Systems of Central Siberia. Novosibirsk, 1978 Novosibirsk, 1981. 90 p. *(in Russian)*
- [2] Odintsovo M.M. Stratigraphy of Continental Lower Jurassic Sediments and Problems of Diamond bearing of Early Mesozoic Sediments of the Central Part of the Siberian Platform // Materials on Geology and Minerals of the Yakut ASSR. Issue IX. M.: Gosgeoltekhizdat, 1962. pp. 3-26. *(in Russian)*
- [3] Geological Map of the Siberian Platform and Adjacent Territories on a Scale of 1:1500 000 / Authors-compilers: N.S. Malich, E.P. Mironyuk, E.V. Tuganova, V.I. Avdeeva, S.P. Alekseev, A.M. Anokhin, V.V. Bezzubtsev, Yu.S. Glukhov, V.S. Grinenko, etc. (Editor-in-chief N.S. Malich, VSEGEI. St. Petersburg: St. Petersburg Kartfabrika VSEGEI, 1999. *(in Russian)*
- [4] 1:500 000 Scale Geological Map of Yakutia. Central Yakut Block. Sheets: R-51-A,B; R-51-B,G; R-52-A,B; R-52-B,G / authors-compilers: V.S. Grinenko, V.A. Kamaletdinov, Yu.L. Slastenov, etc. (Editor of the block: V.S. Grinenko, SUE "YAPSE"). St. Petersburg: St. Petersburg kartfabrika VSEGEI, 2000. *(in Russian)*
- [5] Grinenko V.S., Knyazev V.G., Devyatov V.P. Paleogeography of the Late Triassic and Jurassic East of the Siberian Platform and Folded Framing // Bulletin of the State Committee of Geology. Materials on Geology and Minerals of the Republic of Sakha (Yakutia). № 1 (11). Yakutsk: LLC "Dani Almas Company", 2012. pp. 63-79. *(in Russian)*
- [6] Grinenko V.S., Knyazev V.G., Devyatov V.P., Nikitenko B.L., Shurygin B.N. Stages of Formation and Paleogeography of the Laptev Subcomplex of the East Siberian Sedimentary Basin (Late Triassic-Jurassic) // Bulletin of the State Committee of Geology. Materials on Geology and Minerals of the Republic of Sakha (Yakutia). № 1 (10). Yakutsk: Goskomgeologiya RS (Ya), 2011. pp. 63-70. *(in Russian)*
- [7] Grinenko V.S., Knyazev V.G., Devyatov V.P., Shurygin B.N., Meledina S.V., Nikitenko B.L., Dzyuba O.S. Features of the Jurassic Stage of Formation of the East Siberian Sedimentary Basin // Jurassic System of Russia: Problems of Stratigraphy and Paleogeography. The Second All-

- Russian Meeting. Scientific Materials. Yaroslavl: Publishing House of Yaroslavl State Pedagogical University, 2007. pp. 46-48. (*in Russian*)
- [8] Knyazev V.G., Grinenko V.S., Devyatov V.P., Shurygin B.L., Nikitenko B.L., Meledina S.V., Dzyuba O.S. Regional Stratigraphic Scheme of Jurassic Deposits of Eastern Yakutia // Domestic Geology, 2002, No. 4. pp. 73-80. (*in Russian*)
- [9] Knyazev V.G., Devyatov V.P., Kiselman, Shurygin B.N., Grausman V.V. Main Sections of the Marine Jurassic of the Vilyui Hemisyncline // Geology and Oil and Gas Potential of the Mesozoic Sedimentation Basins of Siberia. Tr. IGI. Issue 532. Novosibirsk: Nauka Publishing House, SB of the USSR Academy of Sciences, 1983. pp. 29-44. (*in Russian*)
- [10] Knyazev V.G., Devyatov V.G., Shurygin B.N. Stratigraphy and Paleogeography of the Early Jurassic of the East of the Siberian Platform. Yakutsk: IG SB of the USSR Academy of Sciences, 1991. 100 p. (*in Russian*). (*in Russian*)
- [11] Shurygin B.N., Devyatov V.P., Zakharov V.A., Knyazev V.G., Ilyina V.I., Meledina S.V., Nikitenko B.L., Grinenko V.S. Stratigraphy of the Jurassic of Eastern Siberia // Bulletin of the State Committee of Geology. Materials on geology and minerals of the Republic of Sakha (Yakutia). 2001, № 1. Yakutsk: Yakutian Branch of Publishing House SB RAS, 2001. pp.112–129. (*in Russian*)
- [12] Grinenko V.S. The History of the Formation of Upper Triassic-Jurassic Sediments of the East Siberian Sedimentary Basin (east of the Siberian platform and folded framing). Abstract of the Dissertation for the Degree of Candidate of Geological and Mineralogical Sciences. Irkutsk, 2010. 19 p. (*in Russian*)
- [13] Grinenko V.S., Knyazev V.G., Devyatov V.P., Nikitenko B.L., Shurygin B.N. A new Regional Stratigraphic Scheme of Upper Triassic-Jurassic Deposits of the East of the Siberian Platform and Folded Framing // Paleontology, Stratigraphy and Paleogeography of the Mesozoic and Cenozoic Boreal Regions: Materials of Scientific Research. Sessions (April 18-22, 2011): in 2 Volumes / Edited by B.N. Shurygin, N.K. Lebedeva, A.A. Goryacheva. Vol. 1. Mesozoic. Novosibirsk: INGG SB RAS, 2011. pp. 65-70. (*in Russian*). (*in Russian*)
- [14] Slastenov Yu.L., Grinenko V.S., Zinchenko V.N., Urzov A.S. New data on the stratigraphy of the Triassic and Jurassic of the Preverkhoyansk trough // Stratigraphy, Tectonics and Minerals of Yakutia. Yakutsk: Publishing House of YSU, 1992. pp. 3-23. (*in Russian*)
- [15] Slastenov Yu.L., Grinenko V.S., Petrov V.B., Prokopyev A.V. Stratigraphy of the Upper Triassic, Lower and Middle Jurassic of the Baibykan River Basin (Preverkhoyansky trough) // Regional Geology and Minerals of Yakutia. Yakutsk: Publishing House of YSU, 1991. pp. 65-73. (*in Russian*)
- [16] Slastenov Yu.L., Grinenko V.S., Petrov V.B., Sapyanik V.V. New Data on the Stratigraphy of Marine Jurassic Sediments of the Leno-Aldan Interfluvium // Geology and Geophysics, 1989, No. 11. pp. 139-142. (*in Russian*)
- [17] Grinenko V.S., Goryacheva A.A. Typical Sections of the Lower-Middle Jurassic of Poleo-Vilyui and Paleo-Aldan According to Drilling Data: Correlation and their Palynological Characteristics (east of the Siberian Platform) // Micropaleontology: Fundamental Problems and Contribution to the Regional Geological Study of the Subsurface (Dedicated to the Memory of A.I. Zhamoyda). Proceedings of the XVIII All-Russian Micropaleontological Meeting (St. Petersburg, October 30-November 3, 2023) / chief ed. M.A. Tkachenko; rev. ed. A.S. Alekseev, V.S. Vishnevskaya, E.L. Grundan, T.Y. Tolmacheva. – St. Petersburg: VSEGEI Publishing House, 2023. pp. 301-305. (*in Russian*)

ГЕОХИМИЯ И ВОЗРАСТ ЦИРКОНА ИЗ АККРЕЦИОННОЙ ОЛИСТОСТРОМЫ ХАПЧАНСКОЙ СЕРИИ АНАБАРСКОГО ЩИТА

Николай Гусев¹, Людмила Романова¹, Сергей Скублов²

¹ ФГБУ Всероссийский научно-исследовательский геологический институт
им. А.П. Карпинского, 199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Средний пр-т В.О., 74

² ФГБУН «Институт геологии и геохронологии докембрия РАН»,
199034, Россия, г. Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2

GEOCHEMISTRY AND AGE OF ZIRCON FROM KHAPCHAN ACCRETIONAL OLISTOSTROM OF ANABAR SHIELD

Nikolay Gusev¹, Liudmila Romanova¹, Sergey Skublov²

1 Karpinsky Russian Geological Research Institute, 74, Sredny av, St. Petersburg, 199106, Russia

2 Institute of Precambrian Geology and Geochronology RAS, 2, Makarova emb., St. Petersburg,
199034, Russia

Abstract. Chaotic breccias in carbonate rocks of the Paleoproterozoic Khapchan series of the Anabar Shield were characterized for the first time. Breccias belong to the flysch-carbonate subtype of accretionary olistostrome and confirm the existence of a subduction zone in the Paleoproterozoic in the east of the Anabar Shield. The olistostrome was formed in connection with underwater thrusts during the destruction of an accretionary uplift composed of weakly lithified and loose sedimentary material. The Sm-Nd isotope system of olistostrome rocks indicates a Paleoproterozoic age ($T_{Nd}(DM_2) = 2.34-2.42$ Ga) and a juvenile ($\epsilon_{Nd}(T) = 0.6-1.5$) proximal nature of the rock source. U-Pb dating of zircon from detrital material and olistostrome matrix constrains the lower temporal boundary of the accretionary stage in the Khapchan Belt. Based on detrital zircon from the carbonate matrix of the olistostrome, the age of accretion is no older than 2009 ± 11 Ma. Granulite metamorphism with an age of 1898 ± 5 Ma is caused by collision events that followed accretion.

1. Введение

Фрагмент Хапчанского палеопротерозойского орогенного пояса в фундаменте Сибирского кратона вскрывается в восточной части Анабарского щита. В строении Хапчанского пояса участвуют две метаморфические толщи. Нижняя толща представлена метамагматическими породами: мезократовыми и лейкократовыми двупироксеновыми и ортопироксеновыми гнейсами гранулитовой фации метаморфизма. Для некоторых гранулитовых протолитов удалось установить, что они были представлены толеитовыми метадiorитами с возрастом 2095 ± 10 млн лет и известково-щелочными метатоналитами с возрастом 2030 ± 17 млн лет. Магматические образования интерпретируются как часть метаморфизованного ювенильного палеопротерозойского надсубдукционного комплекса [4]. Верхняя толща сложена метаосадочными породами, преимущественно гранатовыми и силлиманитовыми гнейсами (45-55%), известково-силикатными породами (30-40%), мраморами и кальцифирами (5-15%). Чередование карбонатных пород и граувакк в стратиграфических разрезах объясняется поступлением материала из разных источников, что контролировалось тектонической активностью в регионе [8]. Накопление карбоната происходило во время тектонически устойчивых фаз и сопровождалось поступлением мелкой терригенной примеси из дистальных источников. Режим тектонической активизации сопровождался обильным поступлением незрелого терригенного материала из проксимальных источников. Для метаосадочных пород хапчанской серии характерна тонкая слоистость с элементами ритмичности. Геохимические особенности парагнейсов хапчанской серии указывают, что их протолитами были граувакки,

подобные накапливающимся в палеозое на активных или пассивных континентальных окраинах [2, 8].

2. Геологическая характеристика олистостромы.

Карбонатные породы наиболее широко распространены в нижней части осадочной толщи, где образуют ряд пластов линзовидного строения, достигающих мощности 100-250 м. Они представлены диопсид-скаполитовыми, форстеритовыми кальцифирами и мраморами. Мраморы образуют среди кальцифиров линзы шириной до 100 м и протяженностью до 1 км. По данным [8] мраморы и известково-силикатные породы образуют горизонты мощностью от нескольких метров в нижней части хапчанской серии, до нескольких сотен метров в ее средней части. На основе корреляции разрезов хапчанская серия содержит пять метакарбонатных пачек. Четыре пачки слагают нижнюю часть хапчанской серии, тогда как пятая пачка, состоящая из однородных гранатовых гнейсов с редкими прослоями метакарбонатных пород, представляет верхнюю часть серии.

Кальцифиры и мраморы различаются только процентным содержанием силикатных минералов. Внешне это светло-серые и желтовато-серые средне- и крупнозернистые массивные, слоистые и неясно полосчатые породы. Выделяются две группы кальцифиров: салит-скаполитовые и форстеритовые. Преобладают салит-скаполитовые кальцифиры, переслаивающиеся с салитовыми плагиогнейсами и салит-скаполитовыми породами. Породы этой ассоциации состоят из кальцита (50–80 %), доломита (2–15%), салита (10–40%), скаполита (5–15 %). Нередко присутствуют сфен, флогопит, апатит, сульфиды. Форстеритсодержащие кальцифиры – крупнозернистые белые породы с порфиробластической структурой. Кальцифиры сложены кальцитом (20–80 %), доломитом (15–80 %), форстеритом (1–15 %), шпинелью (1–15 %). Иногда встречаются диопсид (до 7 %), хондродит (до 8 %), флогопит (до 7 %), графит и апатит.



Рисунок 1 – «Замусоренные» мраморы и осадочные хаотические брекчии хапчанской серии.

a – мраморы, замусоренные обломками силикатных пород; *б, в* – крупнообломочные осадочные брекчии. На рис. 2: 1 – крупный обломок калишпатизированных кристаллосланцев (пр. 355Г); 2 – брекчия (пр. 355 д). Цемент брекчии представляет собой желтовато бурый мрамор, «замусоренный» обломками силикатных пород, рельефно выделяющимся на выветрелой поверхности. В обломке серо-зеленых кристаллосланцев (1) красно-розовые струйчатые обособления калиевого полевого шпата не распространяются в цемент брекчии, что может указывать на калишпатизацию пород до попадания обломка в карбонатный осадок.

Несмотря на метаморфизм гранулитовой фации, иногда хорошо различимы первичные структурные и текстурные особенности осадочных пород. В основании разреза осадочных пород часто встречаются осадочные брекчии, в зависимости от размера обломочного материала облик которых варьирует от замусоренных мраморов, часто с остроугольными обломками силикатных пород в карбонатном матриксе, рельефно выделяющимся на выветрелой поверхности (Рисунок 1а), до крупнообломочных брекчий (Рисунок 1б, в). Брекчии имеют стратифицированный карбонатный матрикс, но размещение обломков хаотичное. Пласты брекчий имеют ширину от 5-10 до 20 м, протяженность – десятки и сотни метров. Границы с мраморами и кальцифирами, не содержащими обломков, постепенные. Преобладают обломки метаосадочных пород, размером от долей сантиметра до 0.5 м и более. Форма обломков неправильные, часто комковатая, присутствуют удлиненные обрывки пластов слаболитифицированных осадочных пород (рис. 1в). Брекчии интерпретируются как олистострома - осадочные отложения, состоящие из хаотичной массы разнородного материала, который попал в карбонатные илы в виде обломков разного размера и фрагментов пластов в результате подводного гравитационного скольжения и осаждения неуплотненных отложений.

3. Sm-Nd изотопная систематика, U-Pb датирование и геохимия циркона.

Sm-Nd изотопная система валового состава как обломков, так и матрикса брекчий характеризуется низким отношением $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}=0.1058-0.1103$ и положительными величинами $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$ (таблица 1) указывающими на ювенильный характер пород в области денудации, что исключает для бассейна накопления осадков обстановку пассивной континентальной окраины. При расчете на возраст 2000 млн лет породы характеризуются палеопротерозойским модельным возраст протолита по двухстадийной модели 2.34 и 2.42 млрд, указывающим на палеопротерозойский возраст пород в области денудации.

Таблица 1 – Изотопный состав Sm и Nd

№№ проб	Sm, ppm	Nd, ppm	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$	$T_{\text{Nd}}(\text{DM})$ млрд лет	$T_{\text{Nd}}(\text{DM-2St})$ млрд лет
355Г	8.83	42.9	0.1103	0.511529	0.6	2.38	2.42
355д	1.769	10.10	0.1058	0.511520	1.5	2.30	2.34

Для U-Pb датирования был извлечен циркон из обломка кристаллосланцев (пр. 355Г), а также из мраморов цемента брекчий (пр. 355д) путем растворения карбонатного материала.

Циркон из кристаллосланцев (пр. 355Г) представлен в основном бесформенными обломками (рис. 2, левая верхняя часть) розового, коричневатого цвета, прозрачными и полупрозрачными. Размер зерен в поперечнике составляет 134-361 мкм. Католюминесцентное (CL) свечение слабое, в большинстве зерен наблюдается пятнистая зональность, темные (черные) участки образуются в результате изменений по трещинам. По результатам анализа 20 зерен в цирконе содержания $\text{U}=1298-2360$ ppm, $\text{Th}=182-395$ ppm, отношение $\text{Th}/\text{U}=0.08-0.31$. По 8 анализам

получен конкордантный возраст 1898 ± 5 млн лет, близкий к верхнему пересечению линии дискордии 1901 ± 9 млн лет (рис. 2).

Циркон из мраморов (пр. 355д) представлен длиннопризматическими кристаллами (Рисунок 2), обычно характерными для гранитоидов, розоватыми, розовато-желтыми и коричневыми. Длина кристаллов составляет 142-523 мкм, $K_u=1-4$. В катодоллюминесцентном изображении зерна со слабым однородным свечением, большинство со следами грубой зональности, а зерно с точкой 6.1 – с тонкой ритмичной зональностью, характерной для магматического циркона. Содержание в цирконе (ppm) $Th=109$, $U=299$, отношение $Th/U=0.37$. В цирконе отмечаются высокое содержание (ppm) $P=1271$, $Ca=2781$, и легких REE ($\Sigma LREE=300$ ppm), возможно за счет микровключений апатита и монацита, в результате чего спайдерграмма имеет «чайкообразный» профиль, а на рис. 3б фигуративная точка приближена к полю гидротермального циркона. Низкое отношение $(Lu/Gd)_N = 10.2$ предполагает его кристаллизацию в равновесии с гранатом. Возраст циркона по отношению $^{207}Pb/^{206}Pb$ составляет 2002 ± 13 млн лет.

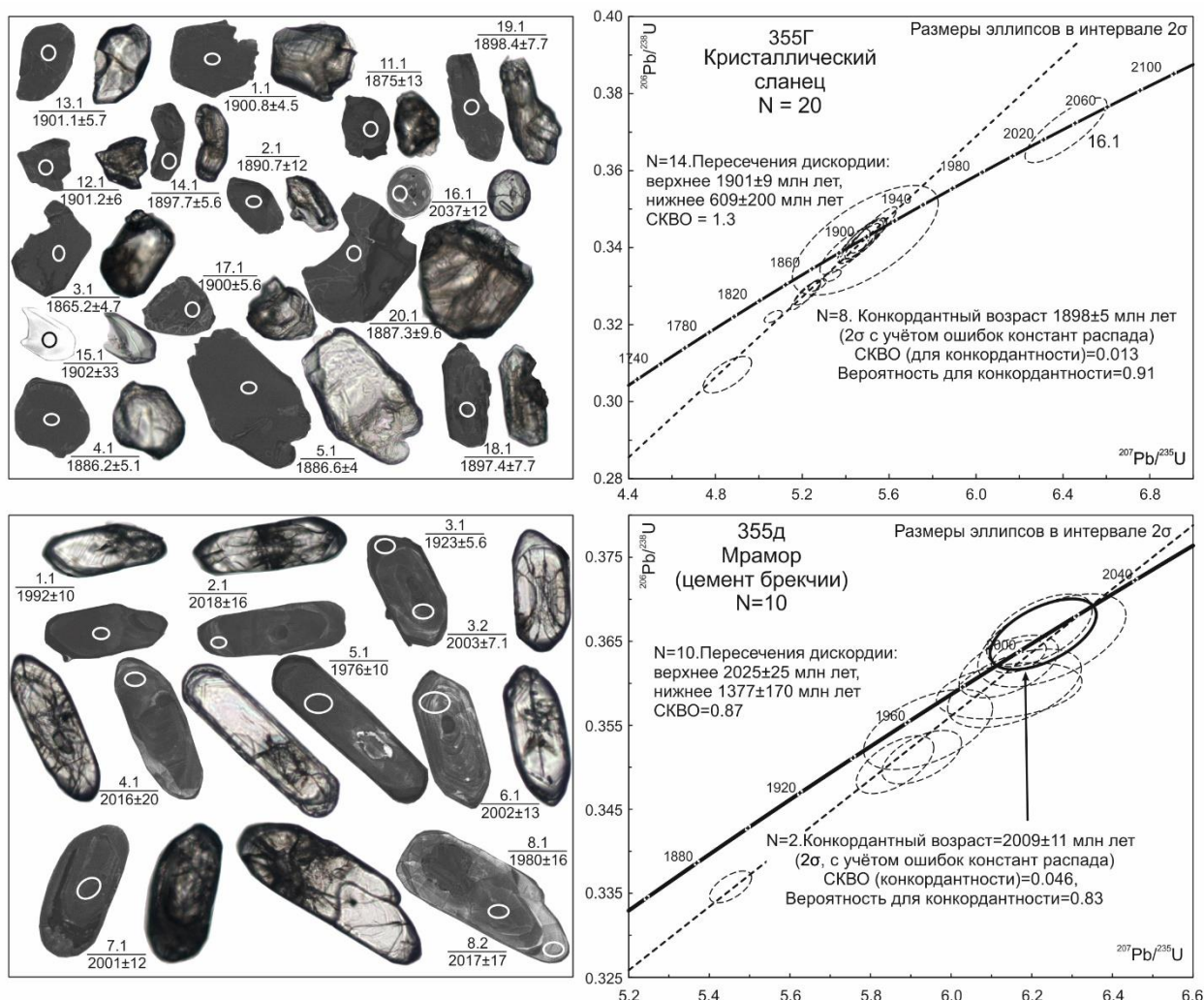


Рисунок 2 – Изображения циркона и результаты U-Pb датирования

В левой части рисунка рядом катодоллюминесцентными показаны оптические изображения тех же зерен. Окружностями обозначены точки измерений, в числителе – номер точки, в знаменателе – возраст в млн лет по отношению $^{207}Pb/^{206}Pb$.

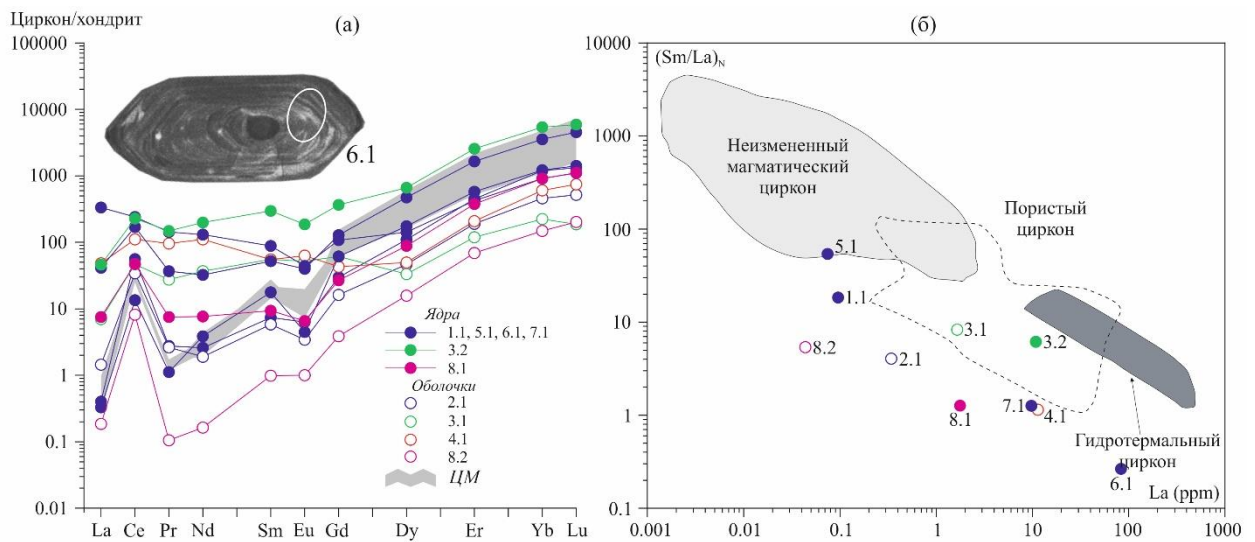


Рисунок 3 – Диаграммы распределения REE в цирконе из мраморов (пр. 355д)

(а) CL изображение циркона с ритмичной магматической зональностью (6.1). Номера точек измерений РЗЭ в цирконе соответствуют показанным на рис. 2. ЦМ – типовой магматический циркон по [6]; б – диаграмма для разделения магматических, пористых и гидротермальных цирконов по [1]. Пористый циркон интерпретируется как измененный посредством растворения-переотложения в присутствии водного флюида магматический циркон [5]. Нормализация содержаний REE по [7].

Темные однородные внутренние части зерен (1.1, 5.1), а также светлая оболочка 2.1 имеют профиль распределения REE (рис. 3а) близкий к магматическому циркону. Причем, только в точке 5.1 соотношение LREE, такое как у неизменного магматического циркона (Рисунок 3б), все остальные зерна являются измененными. Ядра циркона с точками 6.1 и 7.1 обогащены LREE (Σ LREE = 132-300 ppm).

В CL выделяется два типа оболочек и наростов: светлые (точка 8.2) и черные (точка 3.1). Светлые наросты имеют секториальную зональность, характерную для гранулитового циркона и являются наиболее древними, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возраст 2017 ± 17 млн лет. Они характеризуются низким содержанием (ppm) Th=16, U=170 и отношением Th/U=0.10. Эта оболочка наиболее бедна REE (Σ REE = 50 ppm), распределение которых характеризуется положительной Ce аномалией (Ce/Ce*=58), но слабым Eu-минимумом (Eu/Eu* = 0.52). Относительно высокая величина отношения $(\text{Lu}/\text{Gd})_N = 52.6$ указывает что рост оболочки происходил в условиях относительно «сухого» метаморфизма без участия граната.

Зерно с точками 3.1 и 3.2 относится к пористому циркону, наиболее обогащено Th, U, Y, REE. Ядро зерна 3.2 имеет возраст 2003 ± 7 млн лет и характеризуется отношением $(\text{Lu}/\text{Gd})_N = 16$. Оболочка черная (анализ 3.1), несколько обеднена REE, но еще более урановая, имеет отношения Th/U=0.06 и отношение $(\text{Lu}/\text{Gd})_N = 3.04$, что предполагает ее метаморфический генезис и рост в равновесии с кристаллизующимся гранатом. Она имеет самый молодой возраст 1923 ± 6 млн лет.

По двум анализам 6.1 и 8.2 получен конкордантный возраст 2009 ± 11 млн лет, линия дискордии, построенная по всем точкам дает верхнее пересечение 2025 ± 25 млн лет. Можно полагать, что источником детритового циркона в мраморах служили гранитоиды с возрастом 2009 ± 11 . В процессе метаморфизма и вторичных изменений циркон подвергся рекристаллизации в присутствии водного флюида и обогащению LREE, сопровождающейся потерями радиогенного свинца, судя по линии регрессии на диаграмме рис. 2.

4. Обсуждение результатов

Метаматематические образования Хапчанского пояса представляют собой часть метаморфизованного палеопротерозойского надсубдукционного комплекса [4]. Обстановка формирования метаосадочных пород хапчанской серии по геохимическим данным

интерпретировалась как внутрикратонный бассейн или пассивная континентальная окраина. В качестве фундамента бассейна осадконакопления сначала рассматривались архейские гранулиты далдынской и верхнеанабарской серий [2]. После появления данных о Nd-модельном возрасте протолитов пород хапчанской серии, накладывающем ограничения на возраст источника, обстановкой ее накопления стала считаться пассивная окраина палеопротерозойского Биректинского гранит-зеленокаменного террейна [8]. По нашим данным, залегающие на метамагматических образованиях хаотические брекчии в основании разреза осадочных пород хапчанской серии представляют собой олистострому – результат быстрого поступления в бассейн осадконакопления крупных объемов грубообломочного, в том числе слаболитифицированного материала, который отлагался в виде обособленных линз брекчий. Основным поставщиком материала для олистостромы обычно являются тектонические покровы, в данном случае образующиеся в результате деструкции аккреционного поднятия, сложенного, как правило слабосвязанным рыхлым осадочным материалом. Sm-Nd изотопная система пород олистостромы указывает на ювенильный характер пород в области денудации (магматическая дуга) и их палеопротерозойский (не архейский) возраст.

Карбонатный матрикс хапчанской олистостромы дает основание отнести ее к аккреционному флиш-карбонатному подтипу, который формируется в результате разваливания аккреционного поднятия в сторону междугового прогиба [3]. Призматический характер и отсутствие окатанности детритового циркона из карбонатных пород указывает на незначительное расстояние транспортировки до попадания циркона в осадок. Датирование циркона из олистостромы накладывает временные ограничения на аккреционно-коллизийный этап в Хапчанском поясе. Обломки осадочных пород в олистостроме почти не содержат детритового циркона, установлено только одно зерно детритового циркона с возрастом 2037 ± 12 млн лет, поступившее видимо при размыве пород субдукционного комплекса. Остальной циркон с возрастом 1898 ± 5 млн лет является метаморфическим. Нижняя временная граница аккреционного этапа в Хапчанском поясе ограничивается возрастом детритового циркона из карбонатного матрикса олистостромы (не древнее 2009 ± 11 млн лет). Метаморфизм олистостромы с возрастом 1898 ± 5 млн лет вероятно обусловлен последовавшими за аккрецией коллизийными событиями.

5. Выводы

Хаотические брекчии в палеопротерозойской хапчанской серии Анабарского щита относятся к флиш-карбонатному подтипу аккреционной олистостромы. Датирование циркона из обломочного материала и матрикса олистостромы ограничивает нижнюю временную границу аккреционного этапа в Хапчанском поясе возрастом детритового циркона из карбонатного матрикса олистостромы (не древнее 2009 ± 11 млн лет). Гранулитовый метаморфизм с возрастом 1898 ± 5 млн лет, вероятно обусловлен последовавшими за аккрецией коллизийными событиями.

6. Благодарности

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект 23-27-00098).

7. Литература:

- [1] Bouvier, A.-S., Ushikubo, T., Kita, N. et al. Li isotopes and trace elements as a petrogenetic tracer in zircon: Insights from Archean TTGs and sanukitoids // *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2012, vol. 163, pp. 745-768.
- [2] Condie, K.C., Wilks, M., Rosen, O.M., Zlobin, V.L. Geochemistry of metasediments from the Precambrian Hapschan Series, Eastern Anabar Shield, Siberia // *Precambrian Research*, 1991, vol. 50, № 1-2, pp. 37-47.
- [3] Geological mapping of chaotic complexes. M., 1992, 230 p. (in Russian).

- [4] Gusev, N. I., Sergeeva, L. Yu., Skublov, S. G. Evidence of subduction of the Paleoproterozoic oceanic crust in the Khapchan Belt of the Anabar Shield, Siberian Craton // *Petrology*, 2021, vol. 29, №2, pp. 115-135.
- [5] Grimes, C.B., John, B.E., Cheadle, M.J. et al. On the occurrence, trace element geochemistry, and crystallization history of zircon from in situ ocean lithosphere // *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2009, vol. 158, № 6, pp. 757-783.
- [6] Hoskin, P. W. O. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2005, vol. 69, pp 637–648.
- [7] Sun, S., McDonough, W. F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 1989, № 42, pp. 313–345.
- [8] Zlobin, V.L., Rosen, O.M., Abbyasov, A.A. Two metasedimentary basins of the Early Precambrian granulites of the Anabar Shield (Polar Siberia): normative mineral compositions calculated by the MINLITH program and basin facies interpretations. In: *International Association of Sedimentologists Special Publication 33*. Blum M. ed. *Fluvial Sedimentology VII*, 2002, pp. 275–291.

**ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ И ГЕОХРОНОЛОГИЯ МЕЗОЗОЙСКОГО
МАГМАТИЗМА ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ЭВОТИНСКОГО РУДНОГО
РАЙОНА (АЛДАНО-СТАНОВОЙ ЩИТ)**

Алексей Иванов, Евгений Лоскутов, Мичил Иванов, Анатолий Журавлев,
Александр Кравченко, Владимир Тимофеев
ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

**COMPOSITION AND GEOCHRONOLOGY OF MESOZOIC MAGMATISM IN THE
CENTRAL PART OF THE EVOTINSKY ORE DISTRICT (ALDANO-STANOVVOY SHIELD)**

Alexey Ivanov, Evgeny Loskutov, Michil Ivanov, Anatoly Zhuravlev,
Alexandr Kravchenko, Vladimir Timofeev
Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. The paper presents the results of comprehensive petro-geochemical and geochronological studies of Mesozoic igneous rocks of the Evotinsky ore district, which is geographically part of the central part of the Aldan-Stanovoy shield. When interpreting the values of the petro-geochemical composition of the rocks, it was concluded that all magmatic formations belong to the high-potassium calc-alkaline and shoshonite-latitude petrochemical series, as well as the duality of the petro-geochemical compositions due to the presence of both mantle and crustal sources, or most likely mixed mantle-crustal genesis. For the first time, using the SHRIMP-II method, the period of formation of igneous rocks of the Evotinsky ore district was identified using zircons – 122–114 Ma corresponding to the Early Cretaceous (Aptian).

1. Введение

Мезозойский магматизм Алдано-Станового щита отличается спецификой и исключительным многообразием состава изверженных пород, представленных образованиями монзонит-сиенитовой, лейцит-щелочно-сиенитовой, щелочно-базитовой, гранит-гранодиоритовой формаций. Эти породы слагают массивы, штоки, лакколиты, силлы, дайки, жилы, неки и трубки взрыва [1]. Магматическая деятельность этапа мезозойской активизации в различных частях щита протекала синхронно в период от позднего триаса до середины мела 220–100 млн. лет, с периодом максимальной интенсивности в поздней юре – раннем мелу 160–100 млн лет. Комплексные (U-Pb, Rb-Sr и Ar-Ar) изотопно-геохронологические исследования последних лет показали, что этап мезозойского магматизма Алданской магматической провинции соответствует интервалу от 150 до 115 млн лет назад [2].

Несмотря на длительный период изучения мезозойского магматизма Алдано-Станового щита, многие вопросы эволюции и металлогении магматических пород остаются дискуссионными. На территории Центрально-Алданского, Тыркандинского рудных районов с многостадийным мезозойским магматизмом пространственно и генетически ассоциировано оруденение золота и ряда других полезных ископаемых [3]. В пределах Верхне Амгинского рудного района подобные рудопоявления связаны с однофазовыми структурами, каковыми являются интрузивы Хохойского рудного поля [4]. В рассматриваемом Эвотинском рудном районе, многофазовые мезозойские массивы представлены как небольшими интрузивами Медведевским, Таежным и др., так и крупным Эвотинским плутоном. Помимо многофазовых массивов в пределах Эвотинского рудного района получили свое развитие и одноэтапные интрузивы, такие как Михайловский массив, а также малые тела в виде даек и небольших силлов. Целью проведенных исследований являлось установление изотопного возраста, петро-геохимических особенностей магматических пород центральной части Эвотинского рудного района для определения закономерностей их формирования.

2. Основной раздел

Эвотинский рудный район расположен в центральной части Алдано-Станового щита (Рисунок 1А) в пределах Центрально-Алданского супертеррейна. Последний подразделяется на Нимнырский и Сутамский составные террейны, разделенные Сеймским надвигом. В строении района принимают участие докембрийские метаморфические комплексы, терригенные толщи юрского и мелового возраста. Магматические породы представлены докембрийскими и мезозойскими образованиями [5].

Силикатный и спектральный полуколичественный анализы мезозойских магматических пород Эвотинского рудного района проведены в отделе ФХМА ИГАБМ СО РАН (г. Якутск). Определение содержаний трэйс-элементов выполнено с помощью масс-спектрометра ELAN модель DRC-е в лаборатории ООО «ХАЦ «Плазма» (г. Томск). U-Pb датирование цирконов методом SHRIMP-II проведено в Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург).

В результате полевых и петрографических исследований установлено трех фазовое строение Медведевского массива, в котором выделяются следующие группы пород: кварцевые сиениты, пироксен-амфиболовые сиениты, кварцевые монцониты. Двух фазовым строением характеризуется массивы: Таежный – кварцевые монцониты и кварцевые сиениты и Эвотинский – кварцевые сиениты, кварцевые монцониты. Михайловский массив был сформирован в один этап и сложен кварцевыми монцонитами. На территории Эвотинского рудного района присутствуют многочисленные дайки и силлы, сложенные в основном сиенит-порфирами и монцонитами, а также единичные тела бостонитов и вогезитов, прорывающих породы Таежного массива (Рисунок 1Б).

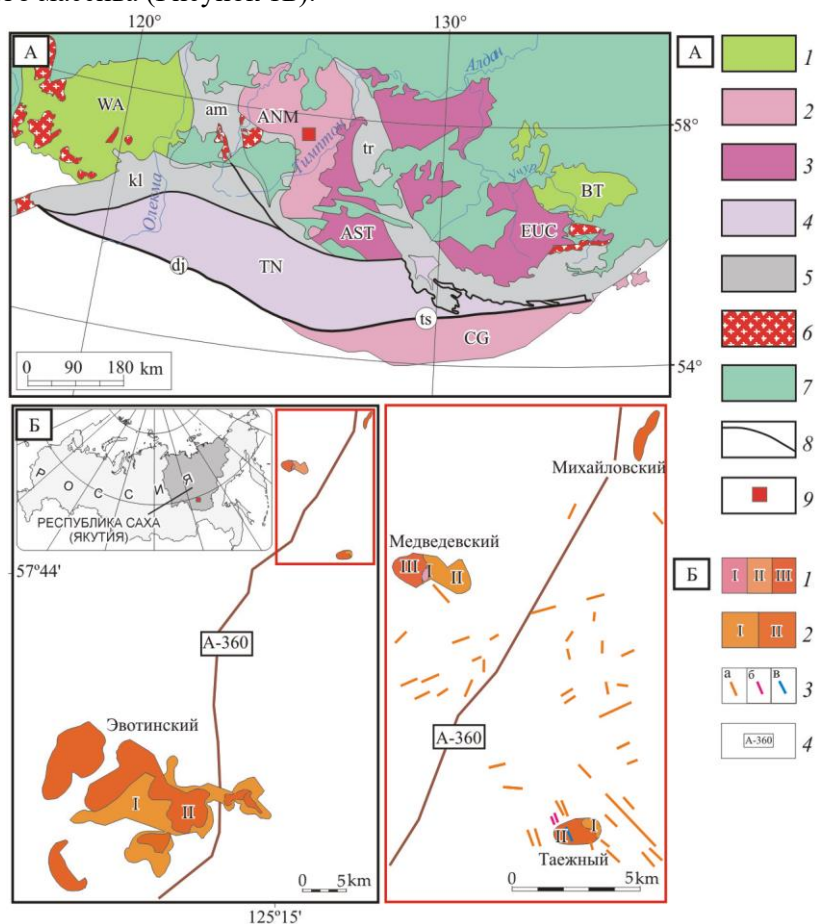


Рисунок 1 – Тектоническая схема Алдано-Станового щита [5]

А. 1 – гранит-зеленокаменные террейны (WA – Западно-Алданский, BT – Батомгский); 2 – гранулит-ортогнейсовые террейны (ANM – Нимнырский, CG – Чогарский); 3 – гранулит-парагнейсовые террейны (AST – Сутамский, EUC – Учурский); 4 – тоналит-грондьемит-гнейсовые террейны (TN – Тындинский); 5 – зоны тектонического меланжа (am – Амгинская, kl – Каларская, tr – Тыркандинская); 6 – сшивающие

раннепротерозойские граниты; 7 – чехол Сибирской платформы; 8 – разломы (dj – Джелтулакский, ts – Таксакандинский); 9 – район работ.

Б - Геологическая схема расположения мезозойских магматических образований центральной части Эвотинского рудного района (по Г.Н. Киселев, 1988, ф с дополнениями авторов). Массивы: 1 – Медведевский: I – кварцевые сиениты, II – пироксен-амфиболовые сиениты, III – кварцевые монцониты; 2 – Таежный: I – кварцевые монцониты, II – кварцевые сиениты; Эвотинский: I – кварцевые сиениты, II – кварцевые монцониты; 3 – дайки и силлы: а – сиенитов и монцонитов, б – бостонитов, в – вогезитов; 4 – федеральная трасса А-360.

По петрохимическим характеристикам мезозойские магматические тела Эвотинского рудного района относятся как к высококалийной известково-щелочной серии [6] кварцевые сиениты, кварцевые монцониты Эвотинского, Таежного массивов, кварцевые монцониты Медведевского массива, дайки кварцевых сиенитов, кварцевых монцонитов силлов, так и в большей мере к шшонитовой петрохимической серии [6] кварцевые сиениты, пироксен-амфиболовые сиениты Медведевского, кварцевые сиениты, кварцевые монцониты Таежного, кварцевые монцониты Михайловского массивов, дайки кварцевых сиенитов, бостонитов и вогезитов.

Установлена близость составов всех магматических образований к производным латитовой серии. На это указывают высокие содержания индикаторных элементов $Sr > 700 \text{ } \mu\text{m}$, $Ba = 1700 \text{ } \mu\text{m}$ и отношений $La/Yb = 12$, $Ce/Yb = 26$ [7], а также специализация пород на литофильные элементы Rb, Ba, Sr, B, Cr, V, Nb, Sc и преобладание в составе пород LREE над HREE [7].

Выявленная двойственность петро- и геохимических характеристик составов пород скорее всего объясняется наличием как мантийного ($Rb/Sr = 0,07$, $K/Rb = 280$, $Ba/Rb = 14$ [8]), так и корового источников ($Nb/La < 1$, $I_0 = 0,706 - 0,707$ [9]), или, наиболее вероятно, смешанного мантийно-корового генезиса $Y/Nb > 1,2$, $Th/U > 1,2$ [8, 10].

По геохронологическим данным (U-Pb, SHRIMP-II, цирконы) определены интервалы формирования магматических пород: 122,0–118,0 млн лет Медведевского, 117,5–114,5 млн лет Таежного и 119,0–114,0 млн лет Эвотинского массивов.

3. Выводы

Таким образом, по результатам комплексных петрологических, геохимических и геохронологических исследований мезозойских магматических пород Эвотинского рудного района установлено:

1. Все магматические образования рудного района относятся к высококалийной известково-щелочной и шшонит-латитовой петрохимической сериям.
2. Для всех пород характерна двойственность петро-геохимических составов, что обусловлено наличием как мантийного, так и корового источников, или, наиболее вероятно, смешанного мантийно-корового генезиса.
3. Впервые установлен период формирования магматических пород центральной части Эвотинского рудного района в интервале 122–114 млн. лет (апт, ранний мел).

4. Благодарности

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИГАБМ СО РАН

5 Литература:

- [1] Maksimov, E.P.; Uytov, V.I.; Nikitin, V.M. Central-Aldan Gold-Uranium Ore Magmatogenic System (Aldano-Stanovoy Shield, Russia). *Russ. Geol.* 2010, vol. 29, pp. 3-26. (translated from English).
- [2] Prokopyev, I.R., Borisenko, A.S., Ponomarchuk, A.V., Kravchenko, A.A., Ivanov, A.I., Zaitsev, A.I., Kardash, E.A., Rozhkov, A.A. Geochronology and ore mineralization of the Dzheltula alkaline massif (Aldan shield, south Yakutia). *Russ. J. Pacific Geol.* 2018, vol. 12, pp. 34-45.

- [3] Vetluzhskikh, V.G., Kazanskii, V.I., Kochetkov, A.Y., Yanovskii, V.M. Gold-ore deposits of the Central Aldan. *Geol. ore Depos.* 2002, vol. 44, pp. 467-499. (translated from English).
- [4] Ivanov, A.I., Kravchenko, A.A., Kondratyeva, L.A., Loskutov, E.E., Zhuravlev, A.I., Ivanov, M.S. Genesis of Mesozoic alkaline intrusions of the Khokhoi ore field according to the petrographic and petrochemical data (Upper Amga gold mining district, Aldan Shield, North Asian Craton) // *World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium (WMESS-2019)* 362 pp.
- [5] Parfenov, L.M., Kuzmin, M.I. (Eds.) *Tectonics, Geodynamics, and Metallogeny of the Territory of the Sakha Republic (Yakutia)* (in Russian); Nauka/Inte.; MAIK "Nauka"/ Interperiodika: Moscow, Russia, 2001. 571 pp. (translated from English).
- [6] Peccerillo, A., Taylor, S.R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey // *Contr. Miner. Petrol.*, 1976, vol. 58, № 1, pp. 63-81
- [7] Tauson, L.V.; Gundobin, G.M.; Zorina, L.D. *Geochemical Fields of Ore-Magmatic Systems*; Nauka: Novosibirsk, Russia, 1987. 202 pp. (translated from English).
- [8] Sklyarov, E.V., Gladkochub, D.P. *Interpretation of geochemical data*. M.: Internet engineering. 2001. 288 pp. (translated from English).
- [9] Rudnick, R.L., Gao, S. Composition of the Continental Crust. In *Treatise on Geochemistry*; Elsevier Inc.: Amsterdam, The Netherlands, 2003; Volume 3-9, pp. 1-64, ISBN 9780080548074.
- [10] Balashov, Y.A. *Geochemistry of Rare-Earth Elements*; Nauka: Moscow, Russia, 1976. 267 pp. (translated from English).

**ТИПОМОРФИЗМ ПЛАГИОКЛАЗОВ МЕДВЕДЕВСКОГО И ТАЕЖНОГО
МАССИВОВ ЭВОТИНСКОГО РУДНОГО РАЙОНА
(АЛДАНСКИЙ ЩИТ, ЮЖНАЯ ЯКУТИЯ)**

Мичил Иванов, Алексей Иванов, Евгений Лоскутов, Анатолий Журавлев
ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

**TYPOMORPHISM OF PLAGIOCLASES OF THE MEDVEDEVSKY AND
TAYOZHNY MASSIFS OF THE EVOTINSKY ORE FIELD
(ALDAN SHIELD, SOUTH YAKUTIA)**

Michil Ivanov, Aleksey Ivanov, Evgeniy Loskutov, Anatoliy Zhuravlev
Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. The paper presents the results of studies of the chemical composition of plagioclases from Mesozoic igneous rocks of the Medvedev and Taiga massifs. Which are represented by two generations, the early – porphyry individuals, the late – microcrystals of the groundmass. Plagioclases in the magmatic formations of the Medvedevsky massif from early to late phases of intrusion change from albite to andesine with an increase in crystallization temperature and an increase in reducing conditions in the final stages. In plagioclases of the Taiga massif, a reverse variability of chemical composition (a decrease in An) is observed with a similar drop in the crystallization temperature and log fO_2 (to oxidative ones) values as the massif evolves.

1. Введение

Плагиоклаз является одним из основных породообразующих минералов раннемеловых магматических пород Эвотинского рудного района. Большой температурный интервал кристаллизации и типоморфные свойства минерала в той или иной степени позволяют фиксировать различные этапы и условия образования магматических пород изученных массивов.

Медведевский и Таежный массивы расположены в центральной части Нимнырского террейна Алдано-Станового щита (Рисунок 1).

Массив Медведевский интродуцирует раннедокембрийские и карбонатные породы венда-кембрия. Массив имеет трехфазовое строение и сложен кварцевыми сиенитами, пироксен-амфиболовыми сиенитами и кварцевыми монцонитами. Установленный по датированию цирконов (U-Pb, SHRIMP-II) [1] интервал образования пород массива 122,0–118,0 млн. лет.

Массив Таежный также прорывает раннедокембрийские кристаллические породы разного состава и карбонатные породы венда-кембрия. Полевыми наблюдениями и петрологическими исследованиями было установлено, что массив имеет двухфазовое строение: породы первой фазы – кварцевые монцониты; второй – лейкократовые сиениты. Время кристаллизации пород массива варьирует от 117,5 до 114,5 млн. лет (U-Pb, SHRIMP-II, цирконы) [1].

2. Полученные результаты

В составе кварцевых сиенитов (первая фаза) *Медведевского массива* плагиоклазы ранней генерации выделяются в виде крупных, зачастую идиоморфных таблитчатых кристаллов до 3–5 см с характерным полисинтетическим двойникованием, несущих следы серицитизации и оплавлений (периферические части, что характерно для всех пород ранних фаз рассматриваемых массивов). На классификационной диаграмме Ab-Or-An точки составов (здесь и далее по [3]), располагаются на границе альбита и олигоклаза (An₅₋₂₀) (Рисунок 2). Параметры кристаллизации (здесь и далее расчеты выполнены по программе

COMAGMATv3.75 [4]): $T = 1384,38 - 1112,18^{\circ}\text{C}$ (среднее $1169,54^{\circ}\text{C}$); $\log f\text{O}_2 -9,16 \dots -6,29$ (-8,49 среднее) (таблица 1). Плагиноклазы поздней генерации – мелкие, гипидиоморфные включения в краевых частях КПШ первой генерации и основной массы. По химическому составу они отвечает альбиту ($\text{An}_{0,8}$) (Рисунок 2). Температуры кристаллизации варьируют от $1174,75$ до $1095,98^{\circ}\text{C}$ (среднее – $1128,55^{\circ}\text{C}$), $\log f\text{O}_2$ от $-9,36$ до $-8,4$ (-8,96 среднее) (таблица 1).

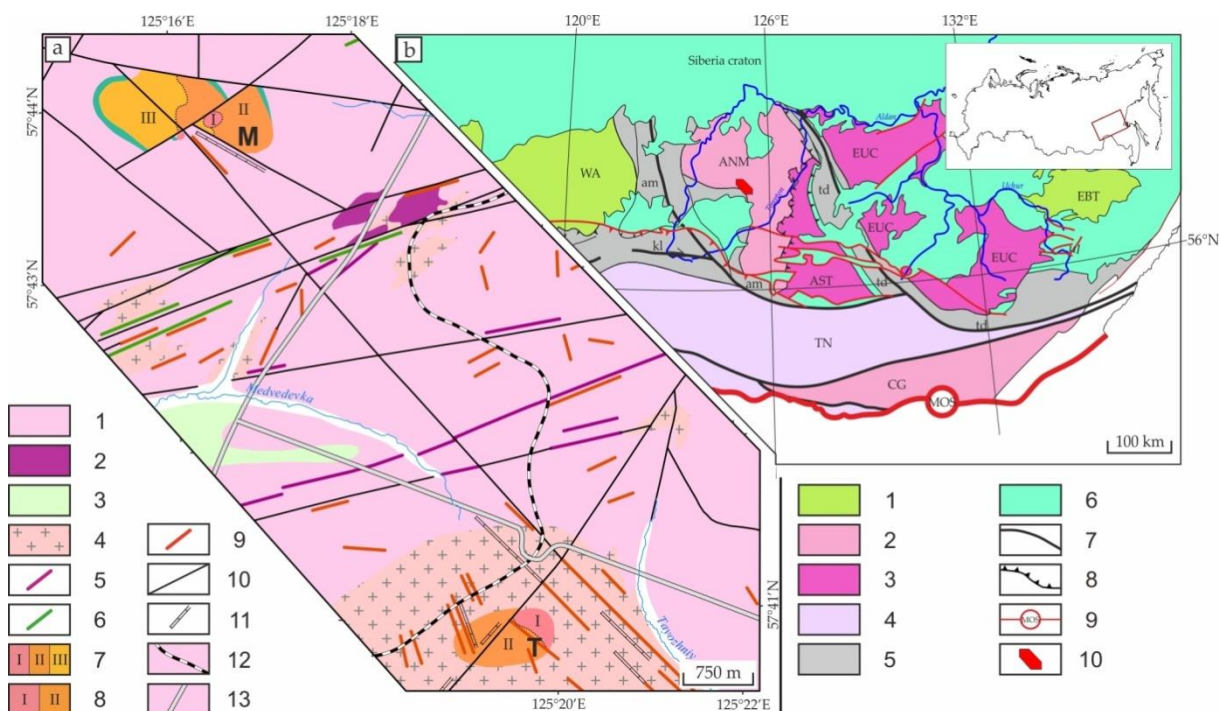


Рисунок 1 – а. Геологическая схема участка (по материалам Г.Н.Киселева и др. 1988ф, с изменениями и дополнениями); б. Тектоническая схема Алданского щита [2].

а. – 1 – докембрийский фундамент; 2 – докембрийские ультраосновные породы; 3 – докембрийские основные породы; 4 – протерозойские граниты; 5 – дайки докембрийских ультраосновных пород; 6 – рифейские дайки долеритов; 7 – Медведевский массив (М); 8 – Таежный массив (Т); 9 – дайки различного состава (МЗ); 10 – разломы; 11 – кварцевые жилы; 12 – железнодорожные пути; 13 – автомагистраль.

б. – 1 – гранит-зеленокаменные террейны; 2 – гранулит-ортогнейсовые террейны; 3 – гранулит-парагнейсовые террейны; 4 – тоналит-трондьемит-гнейсовые террейны; 5 – зоны тектонического меланжа; 6 – чехол Сибирской платформы; 7 – разломы; 8 – надвиги; 9 – Монголо-Охотская сутура (MOS); 10 – район исследования.

Аббревиатуры: WA – Западно-Алданский, ЕВТ – Батомский, ANM – Нимнырский, CG – Чогарский, AST – Сугамский, EUC – Учурский, TN – Тындинский террейны; am – Амгинская, kl – Каларская, td – Тыркандинская зоны тектонического меланжа.

Плагиноклазы из пироксен-амфиболовых сиенитов (вторая фаза) также, как и в породах предыдущей фазы, имеют две генерации: первая – крупные кристаллы правильной прямоугольной формы до 1 см, с полисинтетическим двойникованием и/или с зональным строением. Последние несут следы серицитизации и каолинитизации. В зональных разностях изменения отмечаются в основном в периферийных частях кристаллов плагиноклазов. По химическому составу они отвечают альбиту и олигоклазу ($\text{An}_{5,32}$) (рисунок 2). Параметры кристаллизации: $T = 1389,55 - 1115,89^{\circ}\text{C}$ (среднее – $1220,08^{\circ}\text{C}$); $\log f\text{O}_2 -9,11 \dots -6,25$ (-7,94 среднее) (таблица 1). Минерал второй генерации, как правило, меньших размеров, имеет неправильные, вытянутые и прямоугольные формы кристаллов. По химическому составу отвечает альбиту ($\text{An}_{0,16}$) с расчетными параметрами кристаллизации: $T = 1182,93 - 1113,77^{\circ}\text{C}$ (среднее – $1142,84^{\circ}\text{C}$); $\log f\text{O}_2 -9,14 \dots -8,31$ (-8,78 среднее) (таблица 1).

В кварцевых монцонитах (третья фаза) первая генерация представлена идиоморфными, зональными кристаллами прямоугольной и призматической форм в виде полисинтетических двойников. По химическому составу они отвечают олигоклазу и андезину (An_{10-38}) (рисунок 2) с температурами кристаллизации от 1475,31 до 1150,49°C (среднее – 1341,43°C), $\log fO_2$ -8,69 ... -5,63 (-6,73 среднее) (таблица 1). Вторая генерация – прямоугольные, призматические, с неправильными очертаниями кристаллы с полисинтетическим двойникованием присутствует в основной массе наряду с КПШ второй генерации и в качестве включений в краевых частях индивидов ранней генерации. По химическому составу они относятся к альбиту (An_{0-18}) (рисунок 2). Параметры кристаллизации: $T = 1239,26 - 1079,6^\circ\text{C}$ (среднее – 1152,23°C); $\log fO_2$ -9,58 ... -7,69 (-8,67 среднее) (таблица 1).

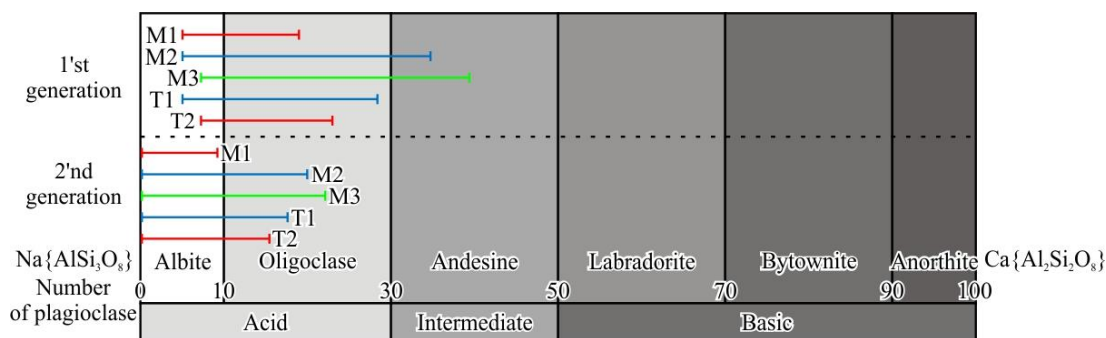


Рисунок 2 – Классификационная диаграмма плагиоклазов [3]

Медведевский массив: M1 – первая фаза, M2 – вторая фаза и M3 – третья фазы внедрения; Тажный массив: T1 – первая фаза и T2 – вторая фазы внедрения.

Таблица 1 – Средние значения химического состава плагиоклазов

Massif and phase Generations		M1		M2		M3		T1		T2	
		PI1	PI2	PI1	PI2	PI1	PI2	PI1	PI2	PI1	PI2
SiO ₂	values	60,52 – 70,28	62,46 – 69,31	57,72 – 70,66	61,8 – 70,55	58,13 – 66,87	61,97 – 78,88	61,03 – 68,6	60,86 – 90,04	61,75 – 68,82	64,68 – 70,91
	average values	66,03	67,14	64,94	67,10	61,25	66,38	64,24	67,85	64,67	67,52
Al ₂ O ₃	values	15,9 – 26,15	18,46 – 21,5	19,14 – 24,2	18,44 – 21,6	21,19 – 27,38	12,34 – 23,61	19,09 – 24,95	4,86 – 23,65	19,7 – 23,75	18,28 – 21,96
	average values	21,05	20,47	22,01	20,47	24,97	20,90	22,24	20,24	22,20	20,50
CaO	values	0 – 5,64	0 – 1,54	0 – 6,38	0 – 3,56	2,15 – 8,09	0 – 3,65	0 – 5,44	0 – 3,35	0 – 4,12	0 – 2,67
	average values	1,97	0,58	3,19	1,49	5,72	1,81	3,38	1,46	3,04	1,01
Na ₂ O	values	7,08 – 12,14	8,92 – 11,45	6,62 – 11,94	8,32 – 12,18	6,33 – 10,62	6,35 – 11,96	7,99 – 11,43	3,48 – 12,3	7,25 – 12,2	8,74 – 12,99
	average values	10,15	10,58	9,04	10,71	8,03	10,24	9,32	9,73	8,78	10,31
K ₂ O	values	0 – 2,35	0 – 2,36	0 – 1,5	0 – 1,14	0 – 1,23	0 – 3,84	0 – 2,69	–	0 – 1,2	–
	average values	0,13	0,42	0,45	0,10	0,34	0,36	0,24	–	0,43	–
Cr ₂ O ₃	values	0 – 5,32	0 – 6,72	0 – 2,74	0 – 1,49	0 – 1,76	0 – 4,42	0 – 3,94	–	0 – 5,08	0 – 2,85
	average values	0,18	0,48	0,13	0,06	0,01	0,15	0,18	–	0,05	0,04
Total	values	98,03 – 101	98,01 – 101,23	97,34 – 101,44	97,21 – 101,91	97,13 – 101,98	97,02 – 103,56	97,16 – 101,89	97,74 – 101,52	94,94 – 101,65	97,02 – 101,82
	average values	99,53	99,67	99,76	99,93	100,33	99,84	99,60	99,27	99,17	99,38
№ Pl	values	5,29 – 30,42	0 – 7,82	5,43 – 31,64	0 – 16,22	10,06 – 38,16	0 – 18,41	4,92 – 27,34	0 – 16,29	5,66 – 20,55	0 – 14,3
	average values	9,74	2,81	16,05	6,96	27,76	8,70	16,25	7,12	15,67	5,07
Temp °C	values	1384,38 – 1112,18	1174,75 – 1095,98	1389,55 – 1115,89	1182,93 – 1113,77	1475,31 – 1150,49	1239,26 – 1079,6	1334,22 – 1090,36	1258,01 – 1112,29	1310,47 – 1138,12	1223,6 – 1117,66
	average values	1169,54	1128,55	1220,08	1142,84	1341,43	1152,23	1212,77	1162,25	1224,69	1149,24

logfO ₂	values	-6,29...	-8,4...	-6,25...	-8,31 ...	-5,63...	-7,69...	-6,75...	-7,49...	-6,97...	-7,86...
	average	-9,16	-9,36	-9,11	-9,14	-8,69	-9,58	-9,44	-9,15	-8,84	-9,09
	values	-8,49	-8,96	-7,94	-8,78	-6,73	-8,67	-8,01	-8,56	-7,85	-8,71

Примечания: условные обозначения см. на рисунке 2.

В кварцевых монцонитах (первая фаза) *Таежного массива* вкрапленники плагиоклаза ранней генерации образуют призматические, полисинтетически сдвойникованные и зональные индивиды размером до 5 мм. Они нередко серицитизированы, с каймами плавления в периферических зонах кристаллов. По химическому составу отвечают олигоклазу (An₅₋₂₇) (рисунок 2). Параметры кристаллизации: T = 1334,22 – 1090,36°C (среднее – 1212,77°C); logfO₂ -9,44 ... -6,75 (-8,01 среднее) (таблица 1). Вторая генерация представлена мелкими серицитизированными прямоугольными и призматическими кристаллами альбит-олигоклаза (An₀₋₁₆) в основной массе. Расчетные температуры кристаллизации: 1258,01 – 1112,29°C (среднее – 1162,25°C), logfO₂ -9,15 ... -7,49 (-8,56 среднее) (таблица 1).

Плагиоклаз ранней генерации в лейкократовых сиенитах второй фазы – порфиновые, призматической формы кристаллы. Характерны полисинтетические двойники и зональные разности. Нередко серицитизирован (центральные части). По химическому составу относится к олигоклазу (An₆₋₂₁). Параметры кристаллизации: T = 1310,47 – 1138,12°C (среднее – 1224,69°C); logfO₂ -8,84 ... -6,97 (-7,85 среднее) (таблица 1).

Поздняя генерация наблюдается в основной массе в качестве мелких призматических, полисинтетически сдвойникованных кристаллов альбит-олигоклаза (An₀₋₁₄) с параметрами кристаллизации: T = 1223,6 – 1117,66 °C (среднее – 1149,24 °C), logfO₂ -9,09 ... -7,86 (-8,71 среднее) (таблица 1).

3. Выводы

Таким образом, на основании проведенных кристаллооптических исследований плагиоклазов из магматических образований Медведевского и Таежного массивов можно сделать один из основных выводов: во всех рассмотренных породах выделяются ранние и поздние генерации плагиоклаза. Для минералов первой генерации характерны следы оплавлений, что скорее всего связано с последовательностью внедрения фаз массивов. Антидромный характер кристаллизации пород Медведевского массива прослеживается не только в уменьшении количества лейкократовых минералов в магматических образованиях от ранних к поздним (количественное), но и в химическом составе плагиоклазов от альбита к андезину (качественное). В Таежном массиве прослеживается обратная изменчивость химического состава плагиоклазов по мере его эволюции. В установленных интервалах температур кристаллизации плагиоклазов отмечен рост этого параметра от ранней к поздней фазе внедрения в породах Медведевского массива со снижением значений logfO₂, то есть от окислительных к более восстановительным условиям в завершающих фазах. Обратная зависимость этих показателей кристаллизации наблюдается в породах Таежного массива. Это подтверждает сделанные ранее выводы [1] по результатам петрографических, петро- и геохимических исследований о разности составов фаз внедрений и эволюции магматизма данных массивов.

4. Благодарности

Работа выполнена в рамках Государственного задания НИР ИГАБМ СО РАН.

5. Литература:

- [1] Ivanov, A.I., Loskutov, E.E., Ivanov, M.S., Zhuravlev, A.I. Petrography, Geochemical Features and Absolute Dating of the Mesozoic Igneous Rocks of Medvedev and Tazhniy Massifs (Southeast Russia, Aldan Shield). // Minerals. 2022, vol.12.Iss.3.Art.1516. <https://doi.org/10.3390/min12121516>.

- [2] Parfenov L.M., Kuz'min M.I. Tectonics, geodynamics and metallogeny of the territory of the Republic of Sakha (Yakutia). Moscow: MAIK "Nauka/Interperiodika", 2001, 571 pp.
- [3] Deer, W. A., Howie, R. A., Zussman, J.An. Introduction to the Rock forming Minerals.London: Longman,1992, 506 pp.
- [4] Ariskin A.A., Barmina G.S. (2004). COMAGMAT: Development of a magma crystallization model and its petrological applications // Geochemistry International 2004, vol 42, pp. 1–157.

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В НИЖНЕРИФЕЙСКИХ ПЕСЧАНИКАХ ЮГО-ВОСТОКА АНАБАРСКОГО ЩИТА

Глеб Карпинчик¹, Александр Савельев^{1,2}

1 ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет» Институт наук о Земле
199034, Россия, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7–9

2 ФГБУ Всероссийский научно-исследовательский геологический институт
им. А.П. Карпинского, 199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Средний пр-т В.О., 74

FEATURES OF MICROELEMENT DISTRIBUTION IN LOWER RIPHEAN SANDSTONES OF THE SOUTHEASTERN ANABAR SHIELD

Gleb Karpinchik¹, Alexander Saveliev²

1 Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg State University, 7-9, University nab. St. Petersburg,
199034, Russia

2 Karpinsky Russian Geological Research Institute, 74, Sredny av, St. Petersburg, 199106, Russia

Abstract. The article presents the results of petrographic and lithochemical studies of Late Precambrian terrigenous deposits of the Labaztakh Formation of the Mukun Group in the southeast of the Anabar Shield. The data obtained made it possible to identify epigenetic transformations of the studied rocks and establish that the provenance was acidic igneous rocks, and one of the most likely sources could be granitoids of the Anabar, Billakh and Magan plutonic complexes, which are widespread within the Anabar shield.

1. Введение

Анабарский щит представляет собой выход фундамента Сибирской платформы и сложен высокометаморфизованными раннедокембрийскими породами, которые по периферии перекрываются платформенными образованиями. Платформенный чехол начинают нижнерифейские песчаники и гравелиты мукунской серии, перекрывающей отложения фундамента с резким угловым несогласием.

Цель работы: анализ новейших геохимических и петрографических данных, в том числе распределения редкоземельных элементов (РЗЭ), в мукунских нижнерифейских терригенных породах, залегающих на площади листа R-49-XXIII, XXIV (Куонамская площадь) Государственной геологической карты масштаба 1:200 000, для определения состава возможных источников сноса и выявления петрографических характеристик этих песчаников. Такие исследования позволяют провести палеорекострукции условий формирования нижнерифейских пород мукунской серии и дать прогнозные заключения на россыпное золото. Такие варианты оруденения на территории Анабарского щита обсуждаются в последние годы [1, 2].

2. Методика исследования

На территории юго-востока Анабарского щита (Восточно-Анабарского бассейна), в междуречье Большая Куонамка-Куранах, из коренных и элювиальных выходов пород, обнажающихся в руслах рек и ручьев (Рисунок 1), автором в составе Анабарской партии Института Карпинского (бывш. «ВСЕГЕИ») в 2022 г. было отобрано 9 проб песчаников. Знаки золота были зафиксированы автором во время полевых работ в шлиховых пробах из аллювия нижнего течения реки Большая Куонамка. По литературным данным [2] золото содержится в мукунских песчаниках, выступающих коллекторами материала фундамента.

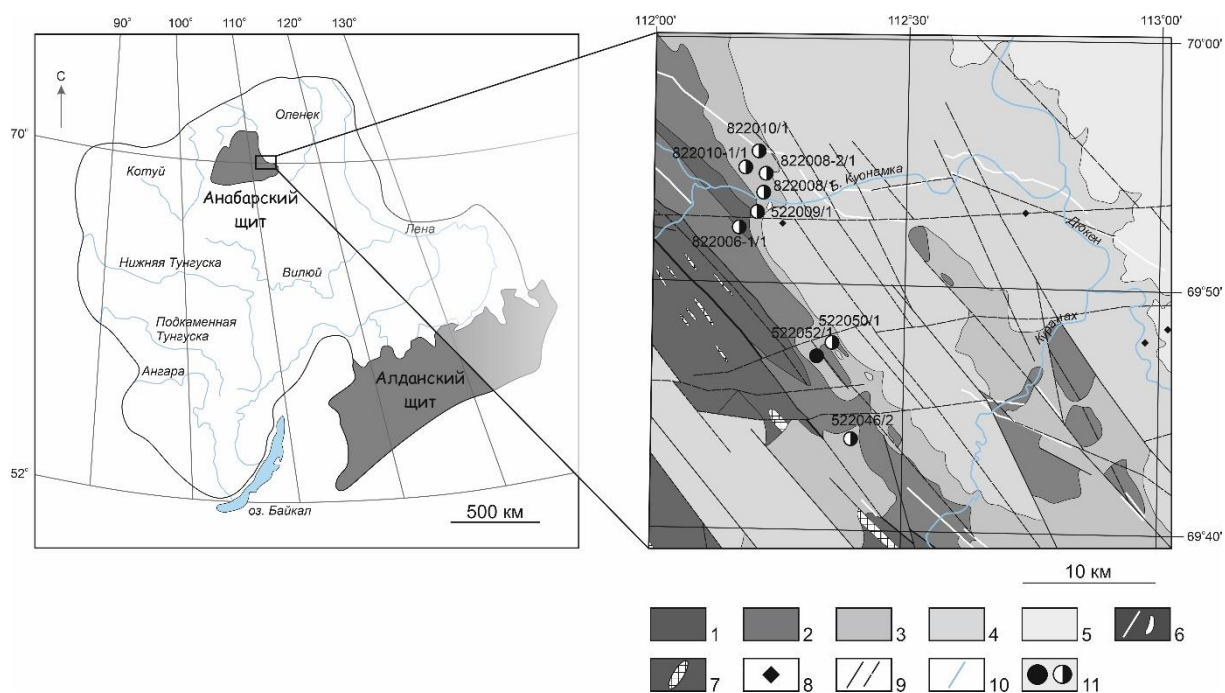


Рисунок 1 – Карта-схема Сибирской платформы с отмеченным районом исследования и вставка-врезка с геологическим строением участка работ. Врезка составлена по материалам карты первого поколения [3] и листа R-49 анабаро-вилуйской серии государственной геологической карты РФ масштаба 1:1 000 000 [4].

Условные обозначения: 1-2 – AR-PR метаморфиты: 1 – верхнеанабарской серии, 2 – хапчанской серии; 3-5 – RF осадочные отложения: 3 – лабазтахской свиты, 4 – котуйкансой свиты, 5 – некуюээхской и чурбукской нерасчлененных свит; 6 – дайки и силлы долеритов и габбродолеритов (RF₁); 7 – линзы и жилы аляскитов и пегматитов (PR₁); 8 – трубки взрыва (MZ); 9 – разломы достоверные и предполагаемые; 10 – реки; 11 – места отбора проб из коренных и элювиальных выходов для петрографических и геохимических исследований.

Содержания петрогенных малых элементов определялись в лаборатории Института Карпинского в Санкт-Петербурге в 2023 г. Определение петрогенных окислов проводилось XRF-методом, для определения содержаний малых элементов использовалась масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой ICP-MS, для определения содержаний золота использовалась атомно-абсорбционная спектрометрия.

3. Результаты петрографического и химического анализов

Породы представлены пестрыми, красноцветными, рыжими, бежевыми песчаниками и гравелитами. Образцы из элювиальных выходов характеризуются полосчатостью, из коренных – горизонтальной слоистостью либо отсутствием таковой. В ходе петрографического изучения было установлено, что породы представлены преимущественно кварцевыми песчаниками средней сортировки и окатанности с полиминеральным цементом. Преобладающий размер зерен мелкий. Породообразующим минералом является кварц, однако в некоторых образцах встречаются обломки микрокварцитов и в разной степени пелитизированных калиевых полевых шпатов. В соответствии с литохимической классификацией [5] породы попали в поля кварцевых аренитов и субаркозовых аренитов (Рисунок 2). Кроме того, присутствуют образцы (822010-1/1, 522009/1), которые по своим геохимическим характеристикам не могут быть отнесены к конкретному литотипу (Рисунок 2, 3). По минерально-петрокластическим характеристикам данные образцы можно отнести к кварцевому и олигомиктовому песчанику соответственно [6].

Кварцевые разности характеризуются конформными и инкорпорационными структурами либо развитым кварцевым регенерационным цементом, залечивающим все пустотное пространство. Для субаркозовых аренитов характерно несколько типов цемента, наиболее проявленным из

которых является цемент замещения, представленный продуктами пелитизации калиевых полевых шпатов.

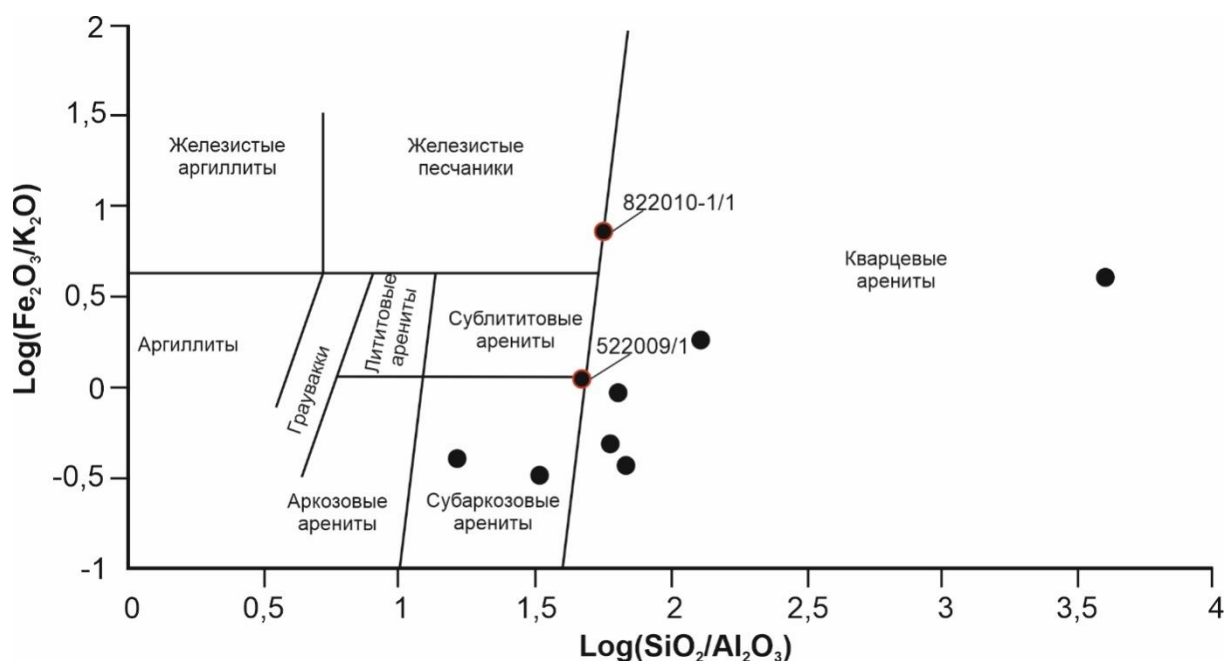


Рисунок 2 – Положение фигуративных точек нижнерифейских песчаников мукунской серии с Куонамской площади (R-49-XXIII, XXIV) на литохимической классификационной диаграмме по [5]. Красным цветом выделены переходные точки (образцы 822010-1/1 и 522009/1).

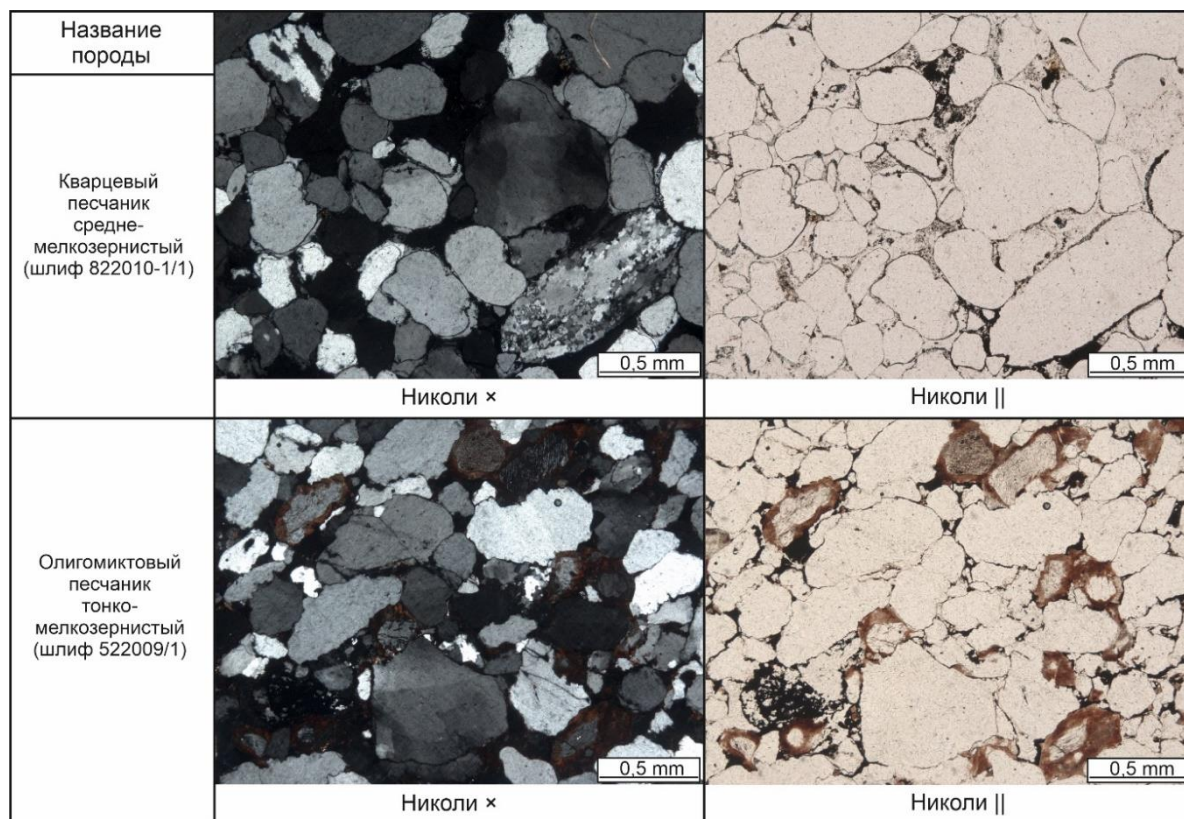


Рисунок 3 – Микрофотографии шлифов переходных образцов.

Для анализа характера распределения РЗЭ были построены графики нормированных содержаний (Рисунок4). В данной работе нормирование произведено на хондрит С1 [7]. В целом для изученных образцов наблюдается схожая картина в распределении РЗЭ –

преобладание легких редкоземельных элементов (ЛРЗЭ) и отрицательная европиевая аномалия, отмечается практическое отсутствие цериевой аномалии (в среднем Ce/Ce^* составляет 0.97). Значения Eu/Eu^* находятся в диапазоне 0.46–0.96, что указывает на кислый состав питающих провинций. Для определения породного состава источников сноса также использовались дополнительные методы (Рисунок4), включающие парные диаграммы La/Sc-Th/Co [8] и Cr/Th-Th/Sc [9]. Точки образцов на диаграмме La/Sc-Th/Co характеризуются высокими числовыми значениями и концентрируются в поле, характерном для магматических пород кислого состава. Доля участия пород среднего и основного состава совсем незначительна (примерно менее 10 %, [9]), что подтверждается локализацией точек на диаграмме Cr/Th-Th/Sc.

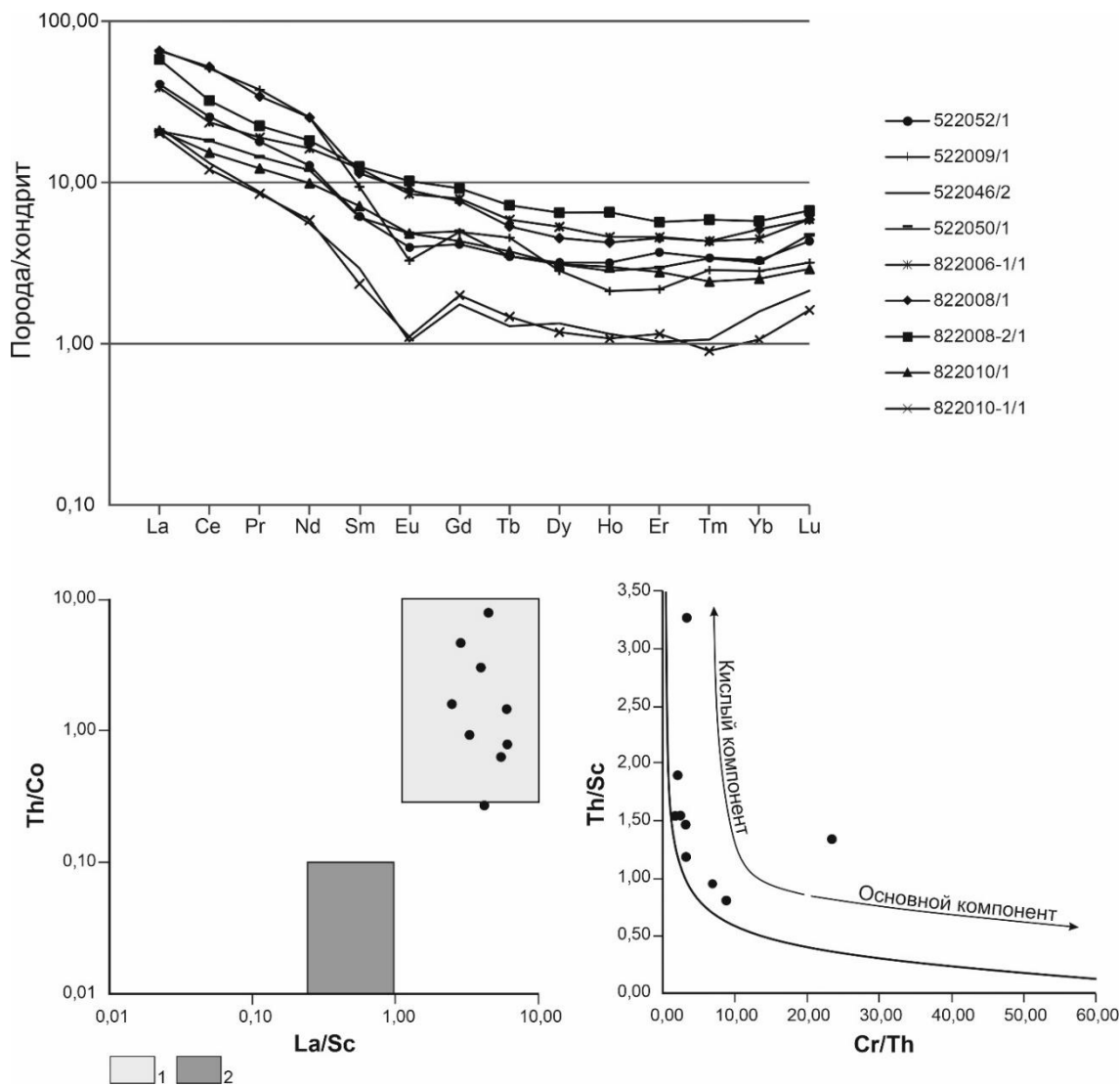


Рисунок 4 – Возможные источники сноса для изученных терригенных отложений с Куонамской площади (R-49-XXIII, XXIV): сверху – спектры распределений РЗЭ в песчаниках, снизу – породный состав питающих провинций на диаграмме La/Sc-Th/Co по [8] и доля участия компонентов различного состава в формировании песчаников по [9].

Условные обозначения: 1 – поле значений, характерное для магматических пород кислого состава; 2 – поле значений, характерное для магматических пород основного состава.

На основе полученных геохимических данных были построены графики распределения элементов типовой геохимической ассоциации золотоносных систем (рисунок5). При малых содержаниях Au в пробах прослеживается ассоциация с элементами-спутниками, что говорит о неслучайном проявлении Au в этих пробах.

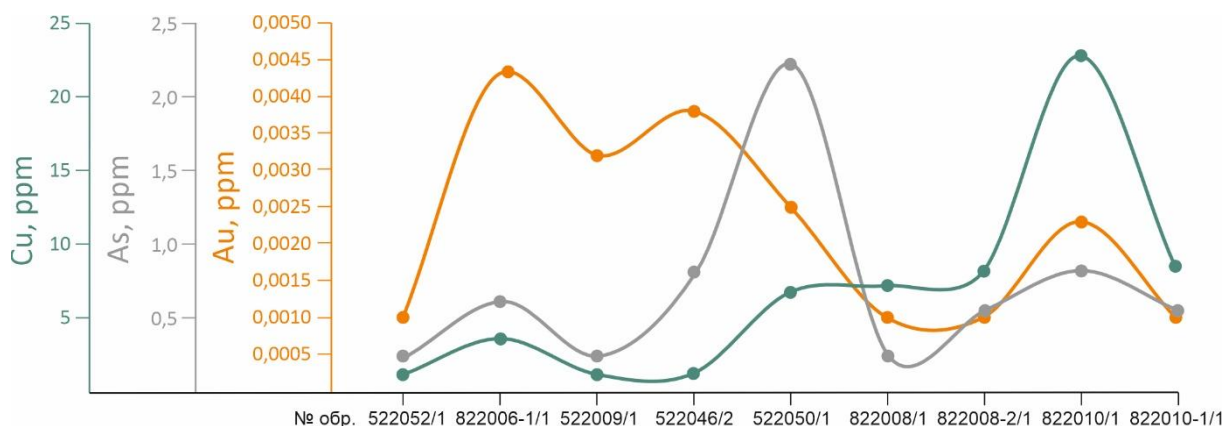


Рисунок 5 – Графики распределения Au, As, Cu в верхнепротерозойских песчаниках юго-восточной части Восточно-Анабарского бассейна (R-49-XXIII, XXIV).

4. Обсуждение результатов и выводы

Результаты работы сводятся к следующему:

1. Спектры РЗЭ имеют однотипный характер распределения, но довольно сильный числовой разброс. Проявленный отрицательный тренд графиков и значения Eu/Eu^* указывают на размыв кислых материнских пород, поставивших терригенный материал для формирования песчаников. В пределах изученной площади такими питающими провинциями могли выступать кислые породы Анабарского, Билляхского и Маганского плутонических комплексов.
2. Кислый состав материнских пород для изученных песчаников можно рассматривать как положительный фактор при прогнозировании золотого оруденения в коренных породах. В целом можно говорить о коррелированном изменении содержаний золота и ассоциирующих элементов (As, Cu), что может указывать на участие, возможно, золотоносных метасоматитов или кварцевых жильных тел в качестве источника терригенного материала для песчаников. Данный вывод согласуется с результатами работы Б. Б. Герасимова [1]. Однако из-за малой выборки говорить о каких-то статистических закономерностях пока рано.

5. Литература:

- [1] Gerasimov B.B., Nikiforova Z.S., Pavlov V.I. Mineralogical and geochemical features of gold placer of the Bolshaya Kuonamka River // Science and Education. – 2014. – № 3. – 5 p.
- [2] Bryukhovetsky O.S., Mastepanov N.I., Sharov G.N. and others. Geological report on object No. 130/11 «Substantiation of the gold content of Proterozoic conglomerates of the Anabar shield and its Framing». Report on the contract with the State educational institution of higher professional education Russian State Geological University (RGGRU). – Moscow, 2011. – 266 p.
- [3] State geological map of the USSR with a scale of 1:200 000. Anabarskaya series, R-49-XXIII, XXIV. Comp. by Lopatin B.G., Tabunov S.M. – M. 1965.
- [4] State geological map of the Russian Federation with a scale of 1:1 000 000. Anabar-Vilyui series, R-49. Comp. by Gusev N.I., Pushkin M.G. – St. Petersburg: VSEGEI cartographic factory. 2016.
- [5] Herron M.M. Geochemical classification of terrigenous sand and shales from core or log data // Journal of Sedimentary Petrology. – V. 58, № 5. – 1988. – P. 820–829.
- [6] Shvanov V.N. Petrography of sand rocks (component composition, systematics and description of mineral species). – L., 1987. – 269 p.
- [7] Sun S.-s., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. – Geological Society, London, Special Publications. – V. 42. – 1989. – P. 313-345.
- [8] McLennan S.M., Hemming S., McDaniel D.K., Hanson G.N. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. – Geological Society of America. – 1993. – V. 284. – P. 21–40.

О ВЫДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕКСИКОЦЕРАСОВЫХ СЛОЕВ В ЧАНСИНСКОМ ЯРУСЕ ВЕРХНЕЙ ПЕРМИ ЮЖНОГО ВЕРХОЯНЬЯ

Афанасий Килясов, Руслан Кутыгин

ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

ABOUT THE IDENTIFICATION OF PARAMEXICOCERAS BEDS OF THE UPPER PERMIAN CHANGHSINGIAN STAGE IN THE SOUTHERN VERKHOYANIE

Afanasiy Kilyasov, Ruslan Kutigyn

Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. In the lower part of the Nekuchan Formation of the Dyba River basin, an accumulation of *Paramexicoceras aldanense* shells was discovered. The discovery of *Paramexicoceras aldanense* in the Changhsingian Stage of the Dyba River basin radically changes ideas about the age and stratigraphic position of this species, and also sheds light on the solution to the global Late Permian extinction of biotas. This find allowed the question of the settlement of ammonoid communities during the period to attribute the indicated cyclolobids to the Changhsingian Stage, and to isolate the host sediments into layers with *Paramexicoceras aldanense*, underlying the *Otoceras concavum* zone.

1. Введение

Нижняя часть некучанской свиты в Южном Верхоянье относится к отоцерасовым слоям. Впервые представители рода *Otoceras* были обнаружены здесь в 1955 г. В.И. Коневцевым и С.В. Домохотовым. Тогда же С.В. Домохотовым была построена первая детальная схема расчленения нижнего инда, в которой была выделена зона *Otoceras* [1]. В зоне *Otoceras* он выделил - подзону *Otoceras boreale*, подзону не охарактеризованную цефалоподами, содержащую *Episageceras aff. Dalailamae* Диеги подзону *Glyptophiceras pascoei*. Немного позже Ю.В. Архиповым отоцерасовые слои были разделены на слои с *Otoceras* sp., слои *O. indigirensis* и слои *O. ex gr. boreale-Episageceras dalailamae*, а вышележащие слои он отнес к новой зоне *Glyptophiceras extremum* [2]. В дальнейшем А.С. Дагисом совместно с коллегами [3], в схеме расчленения отоцерасовых слоев в зоне *Otoceras boreale* были выделены подзоны *concavum* и *indigirensis*, которые в последующем были разделены на зоны *concavum boreale* [4]. В основании некучанской свиты ранее рассматривалась зона *Otoceras concavum*, где пограничные отложения имтачанской и некучанской свит в Южном Верхоянье отражают важное седиментологическое событие, связанное со сменой регрессии на трансгрессию произошедшее на рубеже имтачанского и некучанского времени. Некучанская свита в настоящее время относится к некучанскому региональному горизонту, возраст которого ранее был отнесен к индскому ярусу, сейчас же ее нижняя часть относится к верхней перми. Ранее считалось, что нижняя граница горизонта проводится по появлению вида индекса *Otoceras concavum*. Однако, нами в ходе исследования пограничных пермско-триасовых разрезов в Южном Верхоянье удалось обнаружить в основании некучанской свиты раковины представителей рода *Paramexicoceras*. Сделанная нами находка гониатитов рода *Paramexicoceras aldanense* в бассейне р. Дыбы Южного Верхоянья позволила пересмотреть биостратиграфическое деление нижней части некучанского горизонта. Соответственно основание некучанской свиты нами предлагается рассматривать как слои с *Paramexicoceras aldanense* и относить их не к отоцерасовым слоям, а к парамексикоцерасовым.

2. Результаты исследования и обсуждения

На Северо-Востоке Азии в пермской системе выделяется ряд последовательных аммоноидных комплекса, самый верхний комплекс ранее выделялся в роудском ярусесредней перми [5; 6]. Важным элементом этого комплекса был род *Sverdrupites*, широко распространенный по всему региону [7]. Следующий уровень с аммоноидеями устанавливался в нижней части некучанского горизонта в Южном Верхоянье, где появляются представители рода *Otoceras*, ранее считавшиеся раннеиндскими [8], а сейчас относимые к верхнему чансину [9, 10]. Следовательно, огромный интервал между комплексами аммоноидей рода *Sverdrupites* и *Otoceras* на Северо-Востоке России не был охарактеризован аммоноидеями. Единственным исключением была находка циклолобид рода *Paramexioceras*, сделанная М.Г. Зиновьевым в аллювии или делювии на р. Имтачан верховьев р. Восточная Хандыга [11]. Однако все попытки исследователей повторить данную находку не увенчались успехом, поэтому стратиграфическая принадлежность обнаруженного М.Г. Зиновьевым и описанного Ю.Н. Поповым [11] голотипа типового вида рода *Paramexioceras* (*P. aldanense* Popow) до последних лет оставалась предметом догадок. По мнению В.Н. Андрианова [5], обсуждаемый экземпляр мог происходить из основания имтачанской свиты (приблизительно в 900 м ниже отоцерасовых слоев). Его возраст по уровню организации лопастной линии, близкой к роду *Mexioceras*, предполагался "казанским" [5], что в современном представлении соответствует вордскому и кепитенскому векам средней перми.

После выхода обзорной работы В.В. Насичука [12], у исследователей существенно возрос интерес к роду *Paramexioceras*, здесь парамексикоцерасы были обнаружены в "Martinia beds" мыса Стош (*Paramexioceras* sp.) и в формации Schuchert Dal на западе Земли Джеймсон (*Paramexioceras* sp. nov.). Эти находки относятся к верхам группы Фолдвик Крик (Foldvik Creek Group), рассматриваемым в качестве биостратона *Changhsingoceras/Paramexioceras* чансинского яруса верхней перми [13].

Гренландские находки позволили расширить интервал вертикального распространения рода *Paramexioceras*, который стал считаться долгоживущим [14], что понизило его корреляционный потенциал. Однако то, что между верхоянскими и гренландскими парамексикоцерасами существует огромный геохронологический разрыв, приходящийся, по меньшей мере, на весь вучапинский век, вызывал сомнения в датировке южноверхоянского *P. aldanense* [12].

Ранее в Южном Верхоянье нами изучались разрезы в верховьях р. Восточной Хандыги, в 2022 году мы впервые посетили басс. р. Дыбы. Здесь, на основе дешифрирования космоснимков, обнаружен ранее неизвестный разрез нижнекучанской подсвиты, расположенный в верховьях р. Палаткачан на руч. Крайнем (1).

Изучение разреза показало, что все нижние пачки (или слои) некучанской свиты, ранее установленные в правобережье р. Сеторым [8; 15; 16], прослеживаются и в разрезе по руч. Крайнему. В основании пачки 3 некучанской свиты здесь, как и в сеторымских разрезах, наблюдается выдержанный горизонт (слой 3В) крупных (до 0.4 м в толщину и до 1.2 м в длину) кремнисто-глинистых конкреций. Непосредственно выше этих конкреций появляются первые представители *Otoceras concavum* Tozer, индексирующие одноименную биостратиграфическую зону верхней части чансинского яруса. Раковины вида-индекса вышезалегающей зоны *Otoceras boreale*, относимой к низам индского яруса [17], на руч. Крайнем обнаружены в интервале 5.4–8.5 м выше подошвы пачки 3.

Во всех сеторымских разрезах ниже горизонта крупных конкреций присутствует 20-см слой аргиллитов (3А), аммоноидеями не охарактеризованный. Мощность этого слоя на руч. Крайнем, по сравнению с р. Сеторым, существенно увеличивается, достигая 1 м. На уровне 20 см выше подошвы слоя 3А встречены скопления сдавленных раковин гониатитов, фрагмоконы которых обладают отчетливой поперечной скульптурой и аммонитовой лопастной линией [18]. По морфологическим признакам гониатиты с руч. Крайнего нами были отнесены к виду *Paramexioceras aldanense* Popow (Рисунок 2).

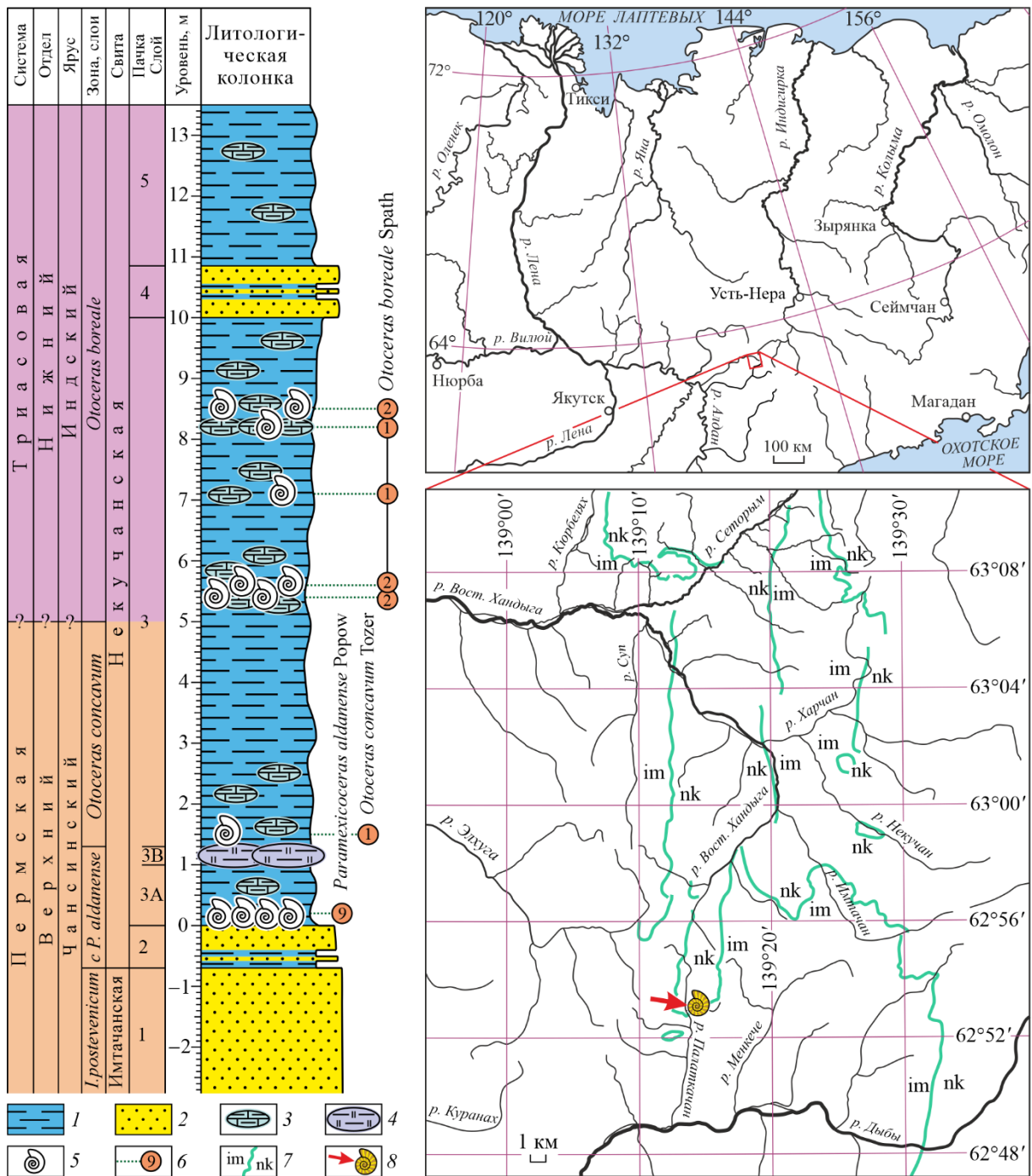


Рисунок 1 – Распределение аммонидей в пограничных пермско-триасовых отложениях по руч. Крайнему (слева) и местоположение находки *Paramexioceras aldanense* Popov (справа). 1 – аргиллиты, 2 – песчаники, 3 – кремнисто-карбонатно-глинистые конкреции, 4 – крупные кремнисто-глинистые конкреции, 5 – аммонидеи, 6 – уровень находки аммонидей и их количество, 7 – граница имтачанской и нечучанской свит, 8 – местонахождение *P. aldanense* (обр. Kr-3-0,2p).

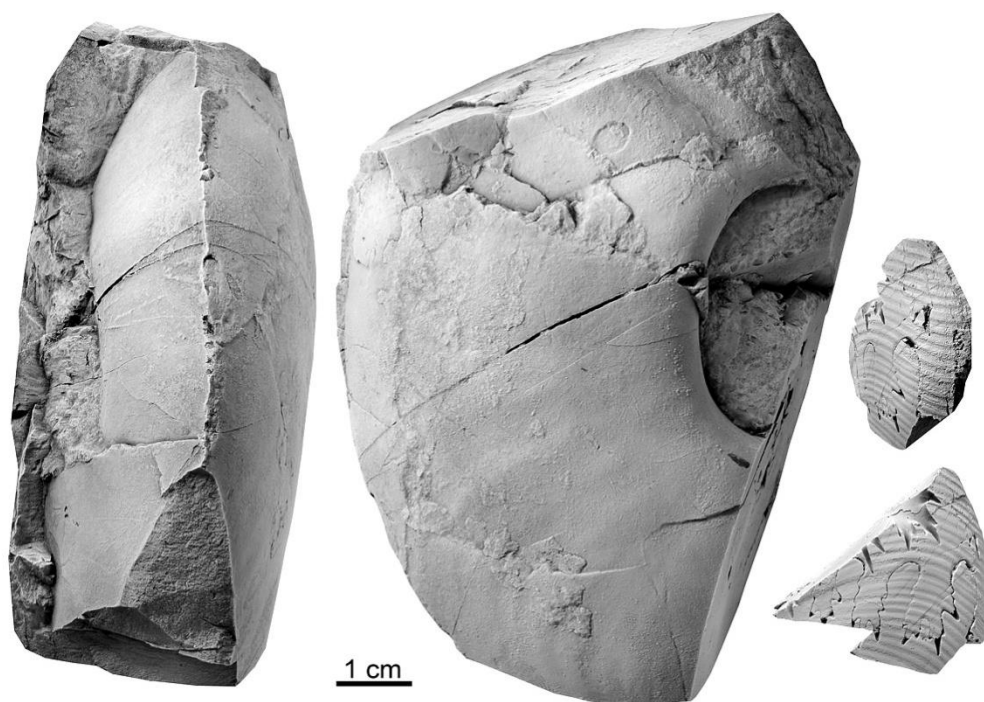


Рисунок 2 – *Paramexiocerasaldanense* Popow (Обр. Кг-3-0,2р - ЮжноеВерхоянье, басс. р. Дыбы, верховьяр. Палаткачан, руч. Крайний).

Это первая на Северо-Востоке России находка гониатитов в чансинском ярусе и первая в Верхоянье находка циклолобид в коренном обнажении. Она проливает свет на ряд вопросов, касающихся эволюции позднепермских гониатитов, биостратиграфии региона и корреляции чансинских отложений. Если ранее В.Н. Андриановым предполагалось наличие мощной (до 900 м) терригенной толщи между уровнем *Paramexioceras* и первыми отоцерасами, то теперь мы выяснили, что осадки, содержащие парамексикоцерасов, непосредственно перекрываются отоцерасовыми слоями, а теоретически даже могут относиться к последним. Ниже конкреционного горизонта (пласт ЗВ) отоцерасы неизвестны, поэтому самый нижний пласт пачки 3 (3А) нами предлагается относить к слоям с *Paramexioceras aldanense*, которые подстилают зону *Otoceras concavum*. Так же соглашаясь с мнением А.С. Бякова [16], что маломощная пачка 2, отражающая начало некучанской трансгрессии, седиментологически ближе к пачке 3 некучанской свиты, чем к пачке 1 имтачанской свиты, мы условно к слоям с *Paramexioceras aldanense* относим и пачку 2.

3. Выводы

В основании некучанской свиты Южного Верхоянья обнаружены циклолобиды вида *Paramexiocerasaldanense* Popow, возраст и стратиграфическая принадлежность которого на протяжении более полувека дискутировались. Эта находка позволила относить указанных циклолобид к чансинскому ярусу, а вмещающие отложения обособить в слои с *Paramexiocerasaldanense*, подстилающие зону *Otoceras concavum*.

4. Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГАБМ СО РАН (FUFG-2024-0005).

5. Литература:

- [1] Domokhotov, S.V. The Induan Stage and the *Otoceras* Zone of the Eastern Verkhoyansk region. *Materialy po geologii i poleznym iskopaemym Yakutskoj ASSR*, 1960, iss. I, pp. 111-120 (in Russian).

- [2] Arhipov, Yu.V. Stratigraphy of the Triassic deposits in East Yakutia. Yakutsk, Knizhnoe izdatel'stvo, 1974, 312 p. (in Russian).
- [3] Dagys A.S., Arhipov Yu.V., Bychkov Yu.M. Stratigraphy of the Triassic system of Northeast Asia. - M.: Nauka, 1979, 243 p. (in Russian).
- [4] Dagys, A.S., Dagys, A.A., Kazakov, A.M., Konstantinov, A.G., Kurushin, N.I. Biostratigraphy of the Lower Induan in the Eastern Verkhoyansk region. Biostratigrafiya mezozoya Sibiri i Dal'nego Vostoka. Novosibirsk, Nauka, 1986, pp. 21–31 (in Russian).
- [5] Andrianov V.N. Permian and some Carboniferous Ammonoids of Northeastern Asia. Novosibirsk: Nauka; 1985. 180 p. (In Russian).
- [6] Reshenija Tret'ego mezhvedomstvennogo regional'nogo stratigraficheskogo soveshhanija po dokembriju, paleozuju i mezozuju Severo-Vostoka Rossii / Red. T.N. Koren, G.V. Kotljarskiy. SPb.: Izd-vo VSEGEI, 2009. 268 pp. (In Russian).
- [7] Kutygin R.V. Spirolegoceratidy (Ammonoidea) Severo-Vostoka Rossii // Paleontol. zhurn. 1996. № 4. pp. 16–23. (In Russian).
- [8] Dagys A.S., Dagys A.A., Ermakova S.P. et al. Triassic fauna of Northeast Asia. Novosibirsk: Nauka; 1996. 232 p. (In Russian).
- [9] Zakharov Y.D., Biakov A.S., Horacek M. Global Correlation of Basal Triassic Layers in the Light of the First Carbon Isotope Data on the Permian–Triassic Boundary in Northeast Asia. Russian Journal of Pacific Geology. 2014; 8 (1). pp. 1–17.
- [10] Zakharov Y.D., Biakov A.S., Horacek M., et al. Environmental control on biotic development in Siberia (Verkhoyansk Region) and neighbouring areas during Permian–Triassic large igneous province activity // J.Guex, Torday J.S., Miller W.B.Jr. (eds.). Morphogenesis, Environmental Stress and Reverse Evolution. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2020. pp. 197–231.
- [11] Popov Yu.N. Ammonoids. Stratigraphy of Carboniferous and Permian deposits of the Northern Verkhoyansk region. Leningrad: Nedra; 1970, pp. 113–140. (In Russian).
- [12] Nassichuk W.W. Permian Ammonoids in the Arctic Regions of the World // The Permian of Northern Pangea. Vol. 1: Paleogeography, Paleoclimates, Stratigraphy. Berlin, Springer, 1995. pp. 210–235.
- [13] Bjerager M., Seidler L., Stemmerik L., Surlyk F. Ammonoid stratigraphy and sedimentary evolution across the Permian-Triassic boundary in East Greenland // Geol. Magazine. 2006. V. 143. № 5. pp. 635–656.
- [14] Furnish W.M., Glenister B.F., Kullmann J., Zhou Z. Treatise on Invertebrate Paleontology. Part L. Mollusca 4. Revised. Volume 2: Carboniferous and Permian Ammonoidea (Goniatitida and Prolecanitida). Lawrence, Kansas: The University of Kansas, Paleontological Institute, 2009. 258 pp.
- [15] Bjakov A.S., Zaharov Yu.D., Horachek M. et al. Novye dannye o stroenii i vozraste terminal'noj permi Juzhnogo Verhojan'ja // Geologija i geofizika 2016. № 2. pp. 91-105. (In Russian).
- [16] Biakov A.S., Kutygin R.V., Goryachev N.A. et al. Discovery of the Late Changhsingian Bivalve complex and two fauna extinction episodes in Northeastern Asia at the end of the Permian. Doklady Biological Sciences. 2018; 480 (1). pp. 78–81. (In Russian).
- [17] Kutygin R.V., Budnikov I.V., Biakov A.S. et al. First findings of Otoceras (Ceratitida) in the Kobyuma Zone of the Southern Verkhoyanie, Northeastern Russia. Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta-Seriya Estestvennye Nauki. 2019; 161 (4). pp. 550–570 (In Russian).
- [18] Kutygin R.V., Kilyasov A.N. Stratigraphic position of the ammonoid Paramexioceras Popov in the Permian-Triassic deposits of the Southern Verkhoyanie, Northeast Russia. Arctic and Subarctic Natural Resources. 2022; 27 (4). pp. 475-485. (In Russian).

**АССОЦИАЦИЯ МИНЕРАЛОВ И ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В
МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ЖЕЛЕЗЕ ИЗ СИБИРСКИХ ТРАППОВ**

Альбина Копылова

ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39**ASSOCIATION OF MINERALS AND INTERMETALLIC COMPOUNDS IN
METALLIC IRON FROM SIBERIAN TRAPS**

Albina Kopylova

Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. On the territory of the Siberian platform, trap intrusions containing large accumulations of native iron nodules are known. In them, the main admixture elements are represented by Ni and Co of a wide range of contents. There are both practically pure iron and intermetallic compounds of iron (Fe_2Ni , FeNi and Fe_2Co) associated with high-nickel camacite. Cohenite, native copper, zinc, graphite, molten and solid-phase separations and extensive sulfide mineralization have been identified as inclusions in native iron.

1. Введение

Масштабные проявления самородного железа в трапповых интрузивах северной части Сибирской платформы (Джалтульский, Хунгтукунский) были предметом активного изучения в конце прошлого века [1,2]. В начале текущего века в Якутии обнаружено новое месторождение (Айхальский силл) металлического железа [3]. Были проведены исследовательские работы на нем и дополнительное изучение материала из предыдущих объектов. Новое исследование показало более широкое распространение интерметаллических соединений, самородной меди и цинка, необычные формы расплавных и силикатных обособлений. Вновь полученные данные приведены в настоящем сообщении. Анализы минералов выполнены в ИГАБМ с использованием микроанализатора Camebax-micro и СЭМ (JSM-6480LV, оснащенный энергодисперсионным и волновым спектрометрами; микроэлементный состав определен методом масс-спектрометрии (ICP-MS) на приборе Elan 6100 DRC (ИМГРЭ, Москва).

2. Основной раздел

В месторождениях самородного железа металл встречается в виде желвакообразных сегрегаций в отдельных участках внутри интрузивных тел. Форма обособлений железа варьируют от рассеянных до массивных весом в десятки и даже сотни килограмм. Содержание металла в отдельных желваках изменяется от 15-20% до 80-90% в самородках. Состав желвакоподобных обособлений включает широкий спектр минералов, образованных в восстановительной обстановке. Доминирующим минералом является металлическое железо, состоящее из различных пропорций FeNi-металла, когенита (Fe_3C), троилита (FeS), самородной меди, графита. Основной примесный элемент в железе никель. Известно четыре минеральных вида самородного железа в зависимости от содержания постоянного его спутника – никеля: феррит с содержанием до 4% Ni, камасит ->4-7 % Ni, тэнит - > 24% Ni и тетратэнит - 48-57% Ni. В Айхальском интрузиве самородная фаза железа представлена ферритом с примесью никеля не превышающей десятые или сотые доли процента. Значительно выше содержание Ni в металле Джалтульского (среднее значение 2,26) и Хунгтукунского (1,76) массивов (Таблица 1). Исследование состава крупных выделений металла в пределах одного обособления показывает равномерное распределение примесей, но в разных сегрегациях содержание элемента изменяется в широком диапазоне концентраций. Например, в двух желваках, собранных на единой площади обнажения Джалтульского интрузива в одном определено 1,65% Ni, а в

другом 6,25% Ni и соответственно 0,70 и 2,71 % Co. Наиболее богато никелем железо Джалтульского интрузива. Именно в этом массиве кроме широко распространенных в желваках металлического железа феррита и камасита (α -Fe,Ni) были установлены две высоконикелистые фазы, известные ранее только в метеоритах – это минерал тэнит (γ -Ni,Fe) с содержанием 20-32 % Ni и интерметаллическое соединение тетратэнит (Fe,Ni), в котором доля никеля увеличивается почти до 50 % (Таблица 1) [1]. Тэнит (γ -Fe,Ni) всегда встречается в виде закономерных сростков с камаситом часто в ассоциации с троилитом. Зерна тэнита, установленного в магнетит-вюститовом агрегате на площади 5x3 мм, имеют субовальную форму размером 4-15 μm или образуют пертитовидную структуру (Рисунок 1а). Мелкие зерна высоко никелистого сплава железа (10-20 μm)- тетратэнита были установлены в обогащенной сульфидами зоне. Более крупное зерно (~30 μm) экзотической формы размером более 30 μm найдено в камасите на границе с троилитом (Рисунок 1б).

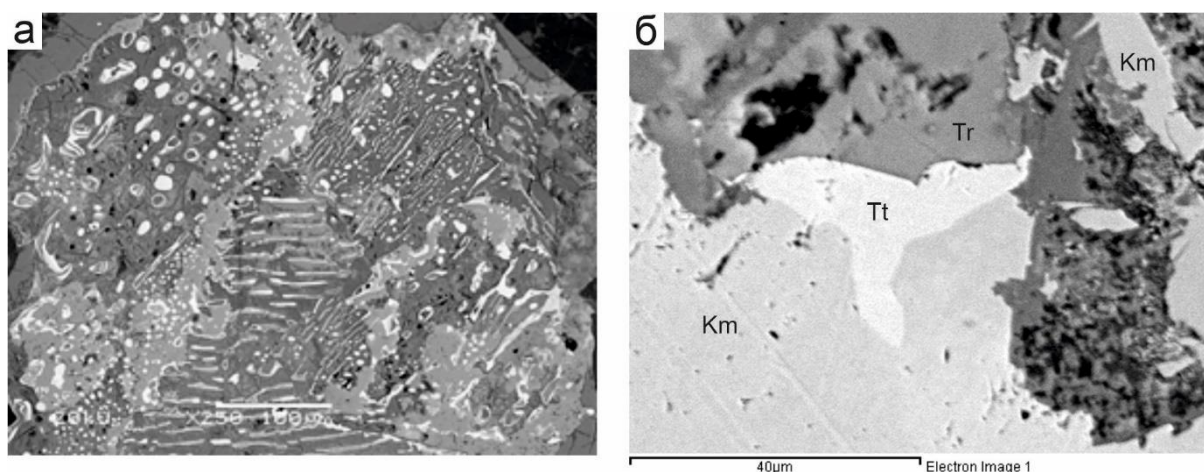


Рисунок 1 – а – овалы и пертитовидные выделения тэнита (светлое) в магнетит-вюститовом агрегате (обр.11а-24), б – зерно тетратэнта (Tt) на границе камасита (Km) и троилита (Tr) (обр. 83-186)

Самородная медь как составная часть желваков самородного железа встречается в разных формах и установлена только в Джалтульском массиве. Содержание её обычно составляет десятые доли процента объема желвака. Минерал окрашен в ярко красный цвет. Обычно медь наблюдается в виде отдельных эмульсионных самостоятельных выделений или располагается узкой полосой на контакте камасита и троилита (Рисунок 2а). или в сочетании с троилитом образует многочисленные округлые зерна в камаситовой матрице (Рисунок 2б). Размер таких минеральных зерен варьирует в пределах 15-25 μm . В отдельных желваках медь образует многочисленные мелкие узкие индивидуальные зерна размером в десятые доли микрометра по всему объему желвака. Из элементов-примесей в самородной меди постоянно присутствует никель (Таблица 1), часто отмечается и кобальт. Железо не растворяется в меди и полученные данные по его содержанию обусловлены наличием его мелкой эмульсионной примеси. В зерне самородной меди на контакте его с силикатной матрицей обнаружен интерметаллид никеля и олова Ni_3Sn .

Таблица 1 – Состав самородных металлов в траппах Сибири (мас. %)

массив № обр.	Хункутунский			Джалтульский			
	35-9н	35Б-15-	83-13а	11А-24	83-18б	83-13а	
	феррит	камасит	феррит	камасит	тэнит	тетратэнит	медь
Fe	97,87	92,72	96,23	89,46	73,18	46,14	2,41
Ni	0,96	4,12	1,84	6,68	23,99	49,42	1,93
Co	0,22	1,47	0,98	2,87	0,92	2,30	0,04
Cu	0,42	0,63	0,11	0,20	1,25	1,55	94,67
Сумма	99,47	99,11	99,32	99,21	99,34	99,90	99,05

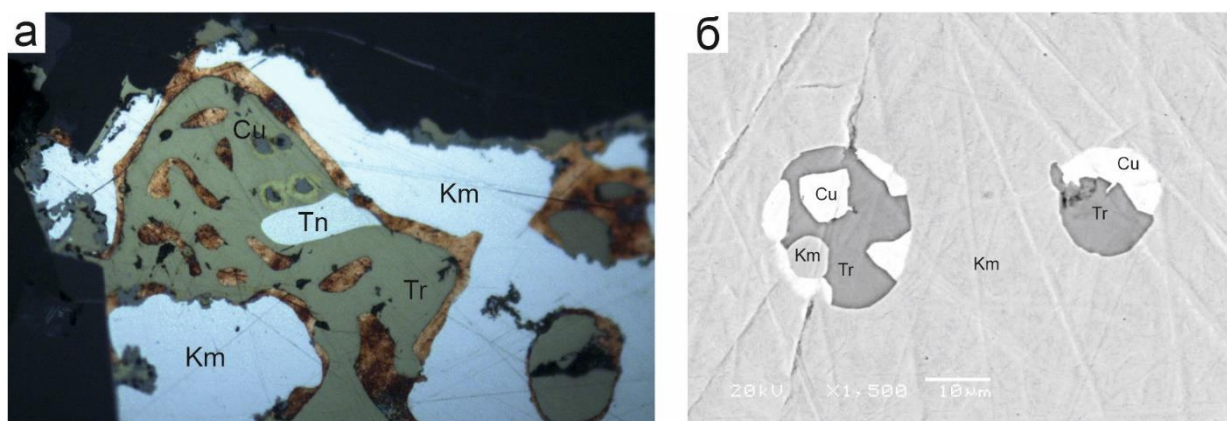


Рисунок 2 – Морфология выделений самородной меди (Cu) в металлическом железе (Fe): а–медная кайма вокруг троилита на границе его с железом и эмульсионные вросстки меди внутри троилита (Tr); б – овальные сферулы сростков меди и троилита

Из неметаллических самородных элементов в отдельных желвакообразных обособлениях железа и в околожелваковой оторочке отмечен графит, образующий рассеянную пластинчатую минерализацию или мономинеральные скопления сфероидального облика. В Джалтульском интрузиве был обнаружен поликристаллический агрегат графита - клифтонит [4].

Практически во всех объектах с проявлением металлического железа постоянным аксессуарным минералом является когенит. Он образует кайму на границе железа и силикатной матрицы, часто проявляется в виде единичных обособлений во внутренней части железа или образует тонкое перлитовое прораствание феррита и когенита. В Айхальском силле в когените установлены многочисленные расплавные стекловатые включения различной конфигурации и отдельные твердые минеральные. Когенит обычно содержит незначительное количество Ni (0,3-0,5 мас.%) и Co (0,1 мас.%). Троилит самый распространенный сульфид, сопровождающий выделения железа и интерметаллические соединения. Он встречается в самых различных проявлениях – от отдельных самостоятельных каплевидных обособлений до тесных ассоциаций с самородной медью или когенитом. По периферии желваков обычно располагается оторочка из аксессуарной сульфидной минерализации – халькопирита, пентландита, кубанита.

Природное восстановленное железоспособно концентрировать многие элементы. Содержание Ni и Co изменяется в широких пределах. Кристаллохимическое распределение Ni и Co в металлическом железе предопределено близостью их металлохимических свойств. Геохимическое исследование самородного железа показало, что в нем концентрируются также Au, PGE, причем содержание их увеличивается в металле по сравнению с вмещающей силикатной породой в десятки и даже в сотни раз (Таблица 2). Кроме благородных металлов в металлической жидкости накапливаются Ge, As, Sb, Ga, проявляя при этом четко выраженные сидерофильные свойства.

Таблица 2 – Средние содержания элементов в самородном железе Джалтульского массива, г/т.

Элемент	Au	Ag	Pt	Pd	Rh	Ir	Ru	Ge	Ga	As	Sb
Камасит	5,91	0,35	6,66	19,03	3,57	0,21	3,21	430	5,3	610	20
Феррит	0,24	0,31	0,47	1,10	0,27	0,01	0,14	31,3	2,6	125	7,0

3. Выводы

В основе образования самородного железа лежит взаимодействие силикатного вещества магмы с компонентами восстановительного флюида. При этом происходит процесс обособления металлической жидкости Fe–Ni–C–S-состава. Тесное срастание когенита и троилита с самородным железом свидетельствует о том, что металлическая жидкость была подвергнута расщеплению с образованием сопряженных жидкостей Fe–Ni–C (самородное железо и когенит) и Fe–S (сульфид) [5]. Образование тэнита в богатой никелем (>6% Ni) системе Fe–Ni возможно при падении температуре ниже 910°C. Происходит распад первично гомогенного расплава на фазы: камасит (α - фаза) и тэнит (γ - фаза).

4. Литература:

- [1] Oleinikov, B.V., Okrugin, A.V., Tomshin, M.D. atal. Native Iron Formation in Platform Basic Rocks. Yakutsk, 1985, 188 p.
- [2] Ryabov, V.V., Pavlov, A.L., Lopatin, G.G. Native iron of Siberian traps. Novosibirsk, Nauka, 1985, 168 p.
- [3] Tomshin, M.D., Salikhov, R.F. at.al. Native iron in dolerites of the Aikhal sill (the first find in Yakutia) // Natural resources of the Arctic and Subarctic. 2019, vol. 24, no 9, P. 50-63
- [4] Levashov, V.K., Oleynikov, B.V. Terrestrial cliftonite in association with native iron from gabbro-dolerites of Mount Ozernoy (Siberian Platform) // Reports of the USSR Academy of Sciences, 1984, vol. 278, no 3, pp. 719-722 (in Russian)
- [5] Kamenetsky, V., Zhitova, L., Sharygin, V., Davidson, P., Feig, S. Magma chamber-scale liquid immiscibility in the Siberian Traps represented by melt pools in native iron // Geology, 2013, vol.41 (10), pp. 1091-1094.

**ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КВАРЦЕВЫХ СИЕНИТ-ПОРФИРОВ
ОЛЕКМИНСКОГО ШТОКА ЧАРО-СИНСКОГО ДАЙКОВОГО ПОЯСА,
ЯКУТСКО-ВИЛЮЙСКАЯ КРУПНАЯ ИЗВЕРЖЕННАЯ ПРОВИНЦИЯ**

Ольга Королева¹, Альбина Копылова¹, Олег Полянский², Андрей Прокопьев¹

1 ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

2 ФГБУН «Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева»,
630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3

**GEOCHEMICAL FEATURES OF QUARTZ SYENITE-POROPHYRES OF THE
OLEKMINSK STOCK FROM THE CHARA-SINSK DYKE SWARM, YAKUTSK-
VILYUI LARGE IGNEOUS PROVINCE**

Olga Koroleva¹, Albina Kopylova¹, Oleg Polyansky², Andrei Prokopiev¹

1 Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

2 Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3, Akademika Koptyuga ave.,
Novosibirsk, 630090, Russia

Abstract. The new geochemical data on rare and rare earth elements and their interpretation together with those previously published for syenite-porphyrines of the Olekminsk stock of the Chara-Sinsk dyke swarm of the Vilyui paleorift will be present in the report. The features of the felsic rocks formation, their belonging to the magmatism of the Yakutsk-Vilyui large igneous province will be show. A mixture of indicators of the different sources has been established for quartz syenite porphyries: both depleted mantle (plume) and oceanic island basalts (OIB). Probably the presence of garnet in the source. Also, products of low degrees of melting of crustal substrates under the influence of the heat of the main magma could have participated in the formation of quartz syenite porphyries. The crustal material here could be garnet-bearing rocks of the basement of the Siberian craton of granulite facies metamorphism. It is assumed, the parent mantle-derived magma has been subjected to substantial crustal contamination as a one of mechanism of differentiation.

1. Введение

На флангах среднепалеозойского (девон-раннекаменноугольного) Виллюйского палеорифта расположены дайковые пояса: на северо-западе Виллюйско-Мархинский и на юго-востоке Чаро-Синский (ЧСДП), образование которых произошло 389–345 млн лет назад с проявлением двух основных импульсов магматизма: 374 и 364 млн лет назад [1 и ссылки там]. Интрузивы представлены, главным образом, габбро-долеритами, их кварцевыми аналогами, субщелочными габбро-долеритами. В строении редких сложных даек участвуют кварцевые монцонит- и сиенит-порфиры. Монцониты известны как в Виллюйско-Мархинском [2], так и преимущественно в ЧСДП. Кварцевые сиенит-порфиры известны только в ЧСДП в составе сложной дайки наряду со субщелочными кварцевыми габбро-долеритами, а также слагают самостоятельное тело, известное как Олекминский шток [3–6]. Возраст интрузива $366,14 \pm 0.28$ млн лет (U-Pb, циркон, CA-ID-TIMS) соответствует второму импульсу магматизма Якутской крупной изверженной провинции (ЯВ КИП) [7]. Контактные взаимоотношения магматических пород свидетельствуют о том, что магматическая деятельность в ЧСДП началась с внедрения габбро-долеритов и кварцевых габбро-долеритов с последующим внедрением субщелочных кварцевых габбро-долеритов. Последние фазы – кварцевые монцонит- и сиенит-порфиры [3–6]. В результате образовались структуры типа «дайка в дайке». Кремнекислая магма была внедрена в еще не консолидированную магму основного состава [4, 5]. Мощность основных и

кислых пород в сложных дайках соизмерима (~50 м). Кремнекислые породы составляют примерно 12 % объема магматических пород ЧСДП и локализованы в его южной части. Временной интервал между фазами внедрения был коротким, поскольку в сложных дайках не наблюдаются закаленные контакты между породами. Исследователи рассматривали кремнекислые породы как производные дифференциации субщелочной толеит-базальтовой магмы, образованные под влиянием глубинного флюида, богатого калием и сопутствующими элементами [1–5]. Анализ новых данных по содержанию редких и редкоземельных элементов в породах Олекминского штока в сочетании с ранее опубликованными данными показывает более сложную историю формирования кварцевых сиенит-порфиров, а значит и в целом магматизма ЧСДП, что расширяет представления об образовании ассоциации основных и кислых магматических пород Виллюйского рифта и ЯВ КИП.

2. Результаты и обсуждение

Олекминский шток расположен в юго-западной части ЧСДП. Форма тела квазиизометричная в отличие от наиболее распространенных трещинных интрузивов. Шток сложен кварцевыми сиенит-порфирами, мелкозернистыми в эндоконтакте и порфировыми в центральной части интрузива. Породообразующие минералы: К-полевой шпат и плагиоклаз – 80%, кварц до 10%, железистый пироксен, горнблендит и биотит до 10%. Акцессорные минералы: апатит, циркон, титанит, магнетит. Встречается также флюорит, гранат пироп-альмандиновой серии с содержанием андрадита до 10%, кианит, рутил, турмалин [4,5]. Химический состав кварцевых сиенит-порфиров (вес.%): $\text{SiO}_2 = 62,08\text{--}69,25$, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} = 7,14\text{--}10,87$, $\text{Na}_2\text{O} = 1,30\text{--}5,96$ (в среднем 4,05), $\text{K}_2\text{O} = 1,18\text{--}6,59$ (в среднем 4,43%), $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0,20\text{--}2,26$. Породы соответствуют трахидацитам и относятся к высоко-К и метаалюминиевым ($\text{ASI} = 0,76\text{--}1,07$, в среднем 0,91 и $\text{A}/\text{NK} = 1,05\text{--}1,34$, в среднем 1,16) типам пород. Повышенные содержания F (0,06–0,16 %) и В (8–36 г/т) также согласуются с повышенной щелочностью пород и свидетельствуют о повышенной роли летучих при их формировании. Содержание Th достигает 26 г/т, U – 5 г/т, что не может определяться ни исключительно фракционированием базитовой магмы, ни коровой контаминацией. По содержанию U, Th и К кварцевые сиенит-порфиры близки к трахитам и трахириолитам наманинской свиты, относящейся к Лено-Виллюйской провинции повышенной радиоактивности [8]. Кроме того, на прилегающей территории на востоке Сибирской платформы в среднем течении р. Лены на основе интерпретации геофизических аномалий были предсказаны погребенные щелочно-ультраосновные интрузии и выделена Центрально-Якутская щелочная провинция [9, 10]. Впоследствии здесь было открыто раннепалеозойское кимберлитовое поле [11, 12]. Повышенное содержание Th и LREE является региональной особенностью юго-восточной части Сибирской платформы. Содержания La хорошо коррелирует с содержанием Th, что говорит об их первичном характере, отражает свойства источника и не связано с вторичными преобразованиями. Повышенный уровень Th сказывается на соотношениях связанных с ним показателей до значений, характерных для щелочных пород: $\text{Th}/\text{U} = 6,63$; $\text{Th}/\text{Ta} = 13,14$, $\text{Th}/\text{Yb} = 17,04$, $\text{Th}/\text{Nb} = 1,11$. Как для кремнекислых пород, так и для базитов характерны повышенные содержания Rb, Zr, La, Hf и низкие содержания Nb, Ta, Sr, Ti. Спектр нормированного на хондрит распределения REE лежит в пределах поля базитов ЯВ КИП [1, 13] близкого по конфигурации тренду океанических островных базальтов (OIB), но демонстрирует более дифференцированное распределение с обогащением LREE и обеднением HREE: $(\text{La}/\text{Yb})_n = 35,27$, $(\text{La}/\text{Sm})_n = 3,96$, $(\text{Sm}/\text{Yb})_n = 8,92$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_n = 5,82$, $(\text{Tb}/\text{Yb})_n = 2,83$, что указывает на участие граната в источнике и/или низкую степень плавления источника сиенитовой магмы. В отличие от габбро-долеритов ЯВ КИП, для которых, как правило, характерно отсутствие или положительная Ta-Nb аномалия, кварцевые сиенит-порфиры Олекминского штока демонстрируют выраженный Ta-Nb минимум: $\text{Nb}/\text{Nb}^* = 0,21$ и $\text{Nb}/\text{La} = 0,41$. Для кварцевых сиенит-порфиров отношение $(\text{Nb}/\text{Y})_{\text{pm}} = 6,85$, что сопоставимо с таковым для основных пород ЧСДП: $(\text{Nb}/\text{Y})_{\text{pm}} = 3,1\text{--}7,12$ (в среднем 5,01) и показывает, что породы генетически связаны и имели общий мантийный источник с метками

ОИВ. На диаграмме Th/Nb – TiO₂/Yb, разрабатываемой для идентификации крупных изверженных провинций, и рассмотренный в настоящий момент на примере базальтов [14], точки базитов ЯВ КИП также лежат в поле ОИВ и отражают наличие граната в источнике и доминирование для них плюмового источника. Сиениты же расположены в поле субдукционно-модифицированной литосферной мантии (SZLM). Отношение Th/Nb возрастает от 0,10 в габбродолеритах до 1,11 в сиенит-порфирах, демонстрируя вклад дополнительного обогащенного Th источника. Вместе с тем, отношения TiO₂/Yb в породах разной основности сопоставимы: 0,58–1,37 (в среднем 0,96) в базитах и 0,72 в кварцевых сиенит-порфирах. Такой почти вертикальный тренд требует лишь небольшого вклада со стороны истощенной мантии плюма или высокой степени загрязнения мантией SZLM, или взаимодействия с корой [14]. Высокие и незначительно варьирующие значения (Nb/Yb)_{pm} увеличиваются от базитов к сиенитам: 3,53–10,06 (в среднем 6,97) и 10,66, соответственно, потенциально также указывают на возрастающий вклад обогащенных источников. По соотношению показателей Tb/Yb, Sm/Yb, La/Yb базиты соответствуют производным плавления гранат-содержащего мантийного источника. Отношения Tb/Yb для сиенитов сопоставимы с определенными для базитов ЯВ КИП: 0,31–0,50, 0,62. Это возможно при плавлении примитивной мантии. Но плавление примитивной мантии не должно приводить к отрицательной Ta-Nb, аномалии, которую мы наблюдаем в спектре сиенитов.

3. Выводы

Таким образом, для сиенит-порфиров Олекминского штока мы наблюдаем геохимическую двойственность: совмещение геохимических признаков участия разных источников, как слегка обедненных мантийных (плюмовых), так и обогащенных литосферных и вероятное присутствие граната в источнике. Геохимические данные позволяют предположить, что кислый расплав мог быть продуктом глубинной дифференциации мантийных толеитовых магм, которые по мере продвижения и остановок в промежуточных очагах взаимодействовали с глубинным флюидом, богатым калием и сопутствующими элементами, как предполагалось ранее [3–5], или что они могут быть продуктом плюм-литосферного взаимодействия, как это показано в [15]. Поскольку участие метасоматизированной литосферной мантии маловероятно для образования кварцевых сиенитов, предполагаем, что в формировании кварцевых сиенит-порфиров участвовали продукты низкой степени плавления коровых субстратов под воздействием тепла базитовой магмы. Длительное существование очага на границе кора/мантия приводит к подплавлению коры и появлению новых выплавок. Коровой субстанцией здесь могли быть гранатсодержащие породы гранулитовой фации метаморфизма фундамента Сибирского кратона. Более точно ответить на этот вопрос могли бы изотопные данные, которых в настоящий момент недостаточно. Это одна из задач наших дальнейших исследований. Ясно одно, к образованию кварцевых сиенит-порфиров причастны разные источники.

4. Благодарности

Исследование выполнено по плану НИР ИГАБМ СО РАН.

5. Литература:

- [1] Polyansky, O.P., **Prokopiev, A.V.**, Koroleva, O.V., Tomshin, M.D., Reverdatto, V.V., Selyatitsky, A.Yu., Travin, A. V., Vasiliev, D.A., Temporal correlation between dyke swarms and crustal extension in the Middle Paleozoic Vilyui rift basin, Siberian platform // *Lithos*, 2017, vol. 282–283, iss., 45–64.
- [2] Tomshin, M.D., Pokhilenko, N.P., Tarskikh, E.V. Morphology of the Nyurba Kimberlite Pipe and Its Relationship with the Dolerite Dike // *Doklady Earth Sciences*, 2017, vol. 477(2), pp.1458–1460.

- [3] Masaitis, V.L., Mikhailov, M.V., Selivanovskaya, T.V. Volcanism and Tectonics of the Middle Paleozoic Patom–Vilyui Aulacogen. Moscow: Nedra, 1975, 184 pp. (in Russian).
- [4] Oleinikov, B.V., Tomshin, M.D., Koroleva, O.V., Okrugin, A.V., Kopylova, A.G., Savvinov, V.T., Deep Evolution of Subalkaline Tholeiite–Basaltic Magma Under Paleorifting Regime (On the Example of the Chara–Sinsk Zone). Yakutsk: YaF SO AN SSSR, 1984, 32 pp. (in Russian).
- [5] Tomshin, M.D., Koroleva, O.V. Composite dykes of the Vilyuisk paleorift system, Siberian Platform, Yakutia, USSR. // Parker, A.J., Rickwood, P.C., Tucker, D.H. (Eds.), Mafic Dykes and Emplacement Mechanisms. Rotterdam: Balkema, 1990, pp. 535–540.
- [6] Guzev, V.E., Kozlov, G.A., Terekhov, A.V., Molchanov, Lebedev, I.O., Svetlova, Yu.L. Chara–Sinsk dike swarm (middle reach of the Lena River): local U-Pb age of zircon and petrological and geochemical features of rocks // Regional Geology and Metallogeny, 2021, № 87, p. 28–41. (in Russian)
- [7]. Koroleva, O.V., Prokopyev, A.V., Polyansky, O.P., Kamo S., Ernst R. High-accuracy U-Pb dating of syenite porphyries of the Charf-Sinsk dyke swarm, Vilyui paleorift, Siberian platform // Geology and Mineral Resources North-East Russia [Electronic resource]: materials of the XIII All-Russian Scientific and Practical Conference, March 21-24, 2023. Yakutsk: NEFU Publishing House, 2023, p. 344–346. (in Russian)
- [8] Masaitis, V.L., Smyslov, A.A. Uranium and thorium in igneous rocks of the Siberian Platform // Geokhimiya, 1977, vol. 2, P. 217–229. (in Russian)
- [9] Protopopov, Yu.Kh. Tectonic complexes of the platform cover of the Vilyui syncline. Yakutsk: Publishing House YSC SB RAS:, 1993. 48 p. (in Russian)
- [10] Mishnin, V.M., Grinenko, V.S. Atlantic-Pacific geodivision: the main trend of industrial diamond-bearing taxa of large linear extent (using the example of the Western Yakut region and its surroundings). In: Diamond Geology - present and future (geologists for the 50th anniversary of the city of Mirny and the Russian diamond mining industry. Voronezh: Voronezh Univ. Publishing House, 2005, p. 132–149. (in Russian)
- [11] Smelov, A.P., Altukhova, Z.A., Babushkina, S.A., Zaitsev, A.I., Izbekov, E.D., Koroleva, O.V., Okrugin, A.V., Oleinikov, O.B., Surnin, A.A., Andreev, A.P., Bekrenev, K.A., Mishnin, V.M. Kimberlites of the Manchary pipe: a new kimberlite field in central Yakutia // Russ. Geol. Geophys., 2010, vol. 51(1), p. 121–126.
- [12] Makhotkin, I.L., Bekrenev, K.A., Kochnev, V.E., Khachatryan, G.K., Kamenetskiy, V.S. Paleozoic Mg-Ti kimberlites and Mg carbonatites of the Menda-Barylai diamond-bearing region of South Yakutia – a new petrological key to understanding the formation of the Yakutian diamond-bearing province. In: Petrology and geodynamics of geological processes. Proceedings of the XIII All-Russian Petrographic Conference. Irkutsk: V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, 2021, vol. 2, pp. 148–152. (in Russian)
- [13] **Prokopyev, A.V.**, Polyansky, O.P., Koroleva, O.V., Vasiliev, D.A., Tomshin, M.D., Reverdatto, V.V., Novikova S.A. The Mid-Paleozoic and Mid-Triassic Pulses of Trap Magmatism in the East of the Siberian Platform: Evidence from the First $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Isotope Dating of Dolerite Sills // Dokl. Earth Sci., 2020, vol. 490, no1, p. 4–7.
- [14] Pearce, J.A., Ernst, R.E., Peate, D.W., Rogers, C. LIP printing: Use of immobile element proxies to characterize Large Igneous Provinces in the geologic record // Lithos, 2021, vol. 392–393, art. 106068.
- [15] Kiselev, A.I., Ernst, R.E., Yarmolyuk, V.V., Egorov, K.N. Radiated rifts and dyke swarms of the middle Paleozoic Yakutsk plume of eastern Siberian craton // J. Asian Earth Sci., 2012, vol. 45(2), p. 1–16.

ПЕРМСКИЙ ПОСТКОЛЛИЗИОННЫЙ МАГМАТИЗМ ЦЕНТРАЛЬНОГО И СЕВЕРНОГО ТАЙМЫРА

Михаил Курапов^{1,2,3}, Виктория Ершова^{1,2}, Андрей Прокопьев¹, Василий Проскурнин³,
Александра Багаева³

1 ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

2 ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет» Институт наук о Земле
199034, Россия, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7–9

3 ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт
им. А.П. Карпинского», 199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Средний пр-т В.О., 74

PERMIAN POST-COLLISIONAL MAGMATISM OF CENTRAL AND NORTHERN TAIMYR

Mikhail Kurapov^{1,2,3}, Victoria Ershova^{1,2}, Andrei Prokopiev¹, Vasily Proskurnin³, Alexandra
Bagaeva³

1 Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

2 Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg State University, 7-9, University nab. St. Petersburg,
199034, Russia

3 All Russian Geological Institute, Sredniy Prospect 39, St. Petersburg 199034, Russia

Abstract. This study presents new whole rock major and trace element petrographic and geochronological data for three Permian granitoid intrusions of the northeastern Taimyr Peninsula (Chelyuskin Peninsula). U-Pb zircon ages (SIMS SHRIMP) define the crystallization age of the studied Taimyr intrusions as ranging from ca. 282 to 255 Ma, suggesting two magmatic pulses of Early Permian and Middle Permian age. We propose the adakitic geochemical composition of the Permian granites indicate their formation as the result of post-collisional slab melting.

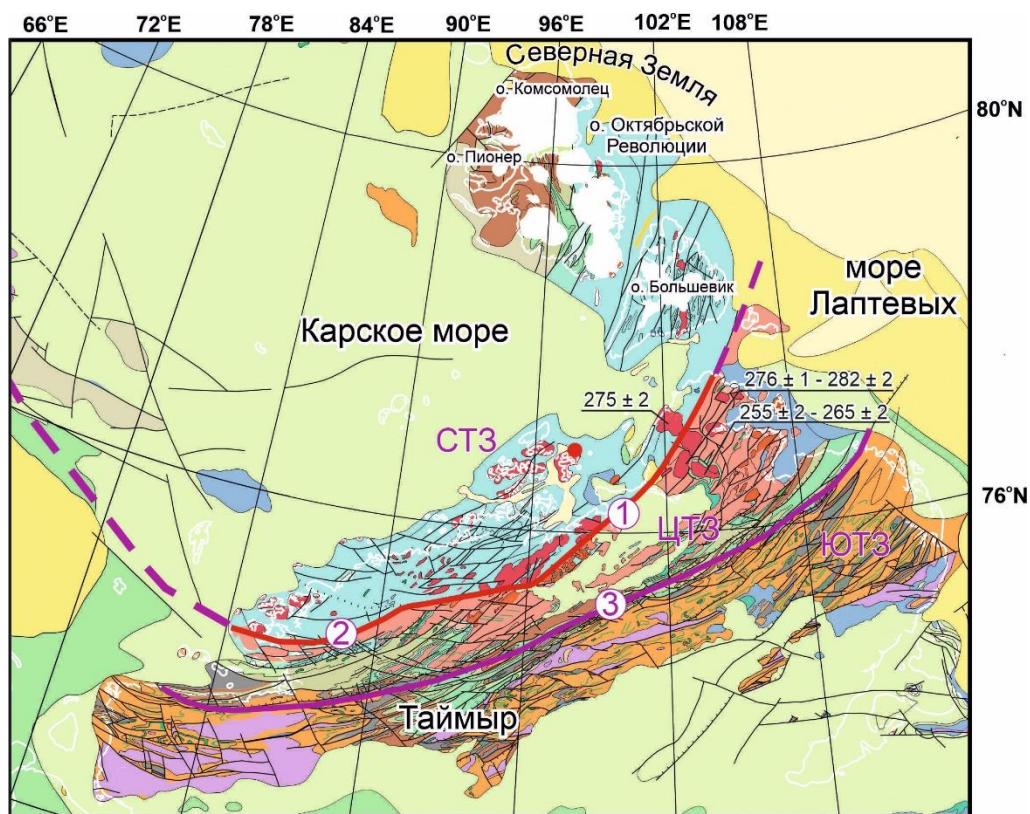
1. Введение

Последние годы изучению позднепалеозойского-раннемезозойского магматизма Таймыро-Североземельской складчатой области уделяется все больше внимания [1–8]. Рядом исследователей были детально рассмотрены проявления каменноугольно-пермского надсубдукционного магматизма [2, 3, 8] и триасового плюмового магматизма [1, 3–6]. Однако пермский (пост коллизионный) этап магматической эволюции складчатой области остается слабо изученным.

Известные проявления пост-коллизионного магматизма локализованы в северо-восточной части полуострова Таймыр и описаны лишь в нескольких работах [3, 9, 10]. Нами были получены новые данные о петрографическом и геохимическом составе, источнике и времени (U-Pb, цирконы, SHRIMP-II) проявления постколлизионного магматизма в пределах северо-восточной части Таймыра.

2. Полученные результаты

Изученные массивы располагаются в южной части полуострова Челюскин (Северо- и Центрально-Таймырская тектонические зоны). Они представляют три крупных изометричных массива (Рисунок 1), площадью 150–250 км². Вмещающие толщи представлены рифей-вендскими и раннепалеозойскими метаосадочными породами преимущественно терригенного состава. Контакты массивов резкие, крутопадающие с часто наблюдаемыми апофизами. Массивы сложены преимущественно порфировидными гранитами, гранодиоритами и гранитами.



Условные обозначения

Неогеновый	Триасовый	Силурский	Основные интрузивы
Палеогеновый	Пермский	Ордовикский	Позднепалеозойские - раннемезозойские кислые интрузивы
Верхнемеловой	Каменноугольный	Кембрийский	Неопротерозойские кислые интрузивы
Нижнемеловой	Девонский	Палеозойский неразделенный	Разломы
Юрский			Предполагаемые разломы

- | | | |
|--|---|--------------------------------------|
| <p>Главные разломы:</p> <p>① Главный таймырский</p> <p>② Диабазовый</p> <p>③ Пясины-Фаддевский</p> | <p>Тектонические зоны:</p> <p>СТЗ Северо-Таймырская</p> <p>ЦТЗ Центрально-Таймырская</p> <p>ЮТЗ Южно-Таймырская</p> | <p>275 ± 2 U-Pb возраст, млн лет</p> |
|--|---|--------------------------------------|

Рисунок 1 – Геологическая карта Таймыро-Североземельской складчатой области с положением исследованных массивов и их возрастом

Гранитоиды относятся преимущественно к магнезиальным, известково-щелочным и щелочно-известковым, пералюминиевым до слабо металюминиевым образованиям. Исследованные породы имеют фракционированную модель РЗЭ (высокое отношение La/Yb). Учитывая петрогеохимические характеристики исследованных пород, мы предполагаем их принадлежность к адакитам. Наиболее вероятно, что плавление слэба и нижней части континентальной коры [11, 12] после коллизии могло привести к формированию исследованных пород.

Для установления возраста гранитоидов было проведено датирование цирконов U-Pb SIMS SHRIMP-II методом из трех массивов. Полученные конкордантные возрасты варьируют от ~282 до ~255 млн. лет. Таким образом, возраст кристаллизации исследованных гранитоидов является пермским (северодвинский-кунгурский). При более детальном анализе полученных возрастов выделяется две группы гранитоидных массивов. На основании этих данных мы предполагаем существования двух этапов (Рисунок 2) пост-коллизии магматизма в пределах Таймыро-Североземельской складчатой области: раннепермский (кунгурский-уфимский) и среднепермский (уржумский-северодвинский).

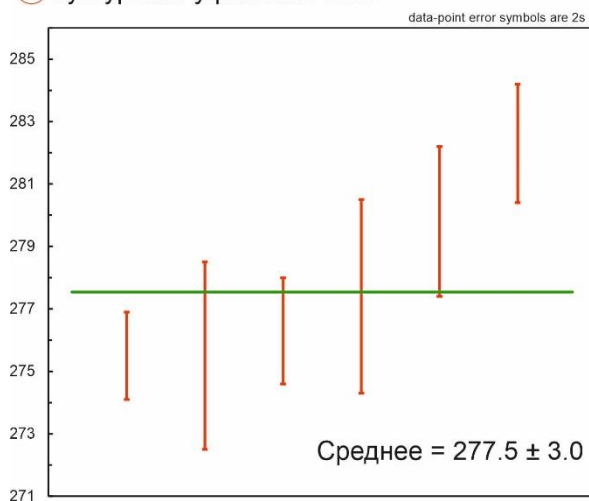
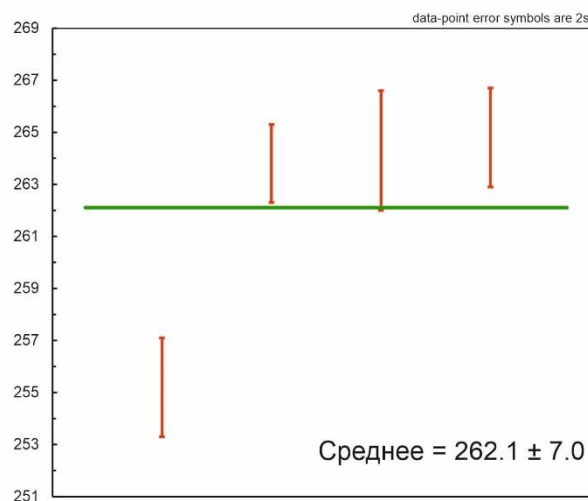
А Кунгурский-уфимский этап**Б** Уржумский-северодвинский этап

Рисунок 2 – Средневзвешенный возраст (U-Pb) двух этапов пост-коллизийного магматизма в пределах Таймыро-Североземельской складчатой области

3. Выводы

Локализация в Северо- и Центрально-Таймырской тектонических зонах и адакитовый характер исследованных гранитоидов позволяет уверенно коррелировать их формирование с пост-коллизийными процессами, развивавшимися в пределах Таймыро-Североземельской складчатой области в пермское время. Присутствие пост-коллизийных гранитоидов с возрастом ~282 млн. лет в Центрально-Таймырской тектонической зоне позволяет уточнить время коллизии Карского блока и Сибири до промежутка ~288 – ~282 млн лет. Полученное распределение конкордантных возрастов гранитоидов иллюстрирует непрерывную эволюцию магматизма от надсубкционных обстановок к постколлизийным и сменяющих их плюмовых.

4. Благодарности

Исследование поддержано грантом РФФ 20-17-00169.

5. Литература:

- [1] Kurapov, M.Y.; Ershova, V.B.; Khudoley, A.K.; Luchitskaya, M.V.; Stockli, D.F.; Makariev, A.A.; Makarieva, E.M.; Vishnevskaya, I.A. Latest Permian–Triassic Magmatism of the Taimyr Peninsula: New Evidence for a Connection to the Siberian Traps Large Igneous Province. *Geosphere* 2021, doi:10.1130/GES02421.1.
- [2] Kurapov, M.Y.; Ershova, V.B.; Khudoley, A.; Luchitskaya, M.V.; Makariev, A.A.; Makarieva, E.M.; Vishnevskaya, I.A. Late Palaeozoic Magmatism of Northern Taimyr: New Insights into the Tectonic Evolution of the Russian High Arctic. *Int. Geol. Rev.* 2020, 1–23, doi:10.1080/00206814.2020.1818300.
- [3] Vernikovskiy, V.A.; Vernikovskaya, A.E.; Proskurnin, V.F.; Matushkin, N.Y.; Proskurnina, M.A.; Kadilnikov, P.; Larionov, A.N.; Travin, A.V. Late Paleozoic–early Mesozoic Granite Magmatism on the Arctic Margin of the Siberian Craton during the Kara-Siberia Oblique Collision and Plume Events. *Minerals* 2020, doi:10.3390/min10060571.
- [4] Augland, L.E.; Ryabov, V.V.; Vernikovskiy, V.A.; Planke, S.; Polozov, A.G.; Callegaro, S.; Jerram, D.A.; Svensen, H.H. The Main Pulse of the Siberian Traps Expanded in Size and Composition. *Sci. Rep.* 2019, 9, 1–12, doi:10.1038/s41598-019-54023-2.
- [5] Proskurnina, M.A.; Proskurnin, V.F.; Remizov, D.N.; Larionov, A.N. Ring Intrusions of the Bospamyatnaya Areal: Manifestations of Shoshonite-Latite Magmatism in Northern Taimyr. *Reg. Geol. Metallog.* 2019, 76.

- [6] Vernikovskiy, V.A.; Pease, V.L.; Vernikovskaya, A.E.; Romanov, A.P.; Gee, D.G.; Travin, A.V. First Report of Early Triassic A-Type Granite and Syenite Intrusions from Taimyr: Product of the Northern Eurasian Superplume? *Lithos* 2003, 66, 23–36, doi:10.1016/S0024-4937(02)00192-5.
- [7] Khudoley, A.K.; Verzhbitskiy, V.E.; Zastrozhnov, D.A.; O’Sullivan, P.; Ershova, V.B.; Proskurnin, V.F.; Tuchkova, M.I.; Rogov, M.A.; Kyser, T.K.; Malyshev, S.V.; et al. Late Paleozoic – Mesozoic Tectonic Evolution of the Eastern Taimyr-Severnaya Zemlya Fold and Thrust Belt and Adjoining Yenisey-Khatanga Depression. *J. Geodyn.* 2018, 119, 221–241, doi:10.1016/j.jog.2018.02.002.
- [8] Kurapov, M.Y.; Ershova, V.B.; Makariev, A.A.; Makarieva, E.V.; Khudoley, A.K.; Luchitskaya, M.V.; Prokopiev, A.V. Carboniferous Granitoid Magmatism of Northern Taimyr: Results of Isotopic-Geochemical Study and Geodynamic Interpretation. *Geotectonics* 2018, 52, 225–239, doi:10.1134/S0016852118020048.
- [9] Vernikovskiy, V.A.; Sal’nikova, E.; Kotov, A.B.; Ponomarchuk, V.A.; Kovach, V.P.; Travin, A.V.; Yakovleva, S.Z.; Bereznaya, N.G. Age of Post-Collisional Granitoids of Northern Taimyr: U-Pb, Sm-Nd, Rb-Sr, and Ar-Ar Data. *Dokl. Akad. Nauk. Akad. Nauk* 1998, 363, 375–378.
- [10] Vernikovskiy, V.A. The Geodynamic Evolution of the Taimyr Folded Area. *Geol. Pacific Ocean* 1996, 12, 691–704.
- [11] Castillo, P.R. Adakite Petrogenesis. *Lithos* 2012, 134–135.
- [12] Drummond, M.S.; Defant, M.J. A Model for Trondhjemite-Tonalite-Dacite Genesis and Crustal Growth via Slab Melting: Archean to Modern Comparisons. *J. Geophys. Res.* 1990, 95, doi:10.1029/jb095ib13p21503.

ТРИАСОВЫЙ АДАКИТОВЫЙ МАГМАТИЗМ СЕВЕРО-ВОСТОКА ПОЛУОСТРОВА ТАЙМЫР

Михаил Курапов^{1,2}, Дмитрий Конопелько¹, Виктория Ершова¹, Василий Проскурнин²,
Сергей Петров¹, Степан Берзин¹

1 ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет» Институт наук о Земле
199034, Россия, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7–9

2 ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт
им. А.П. Карпинского», 199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Средний пр-т В.О., 74

TRIASSIC ADAKITE MAGMATISM OF THE NORTHEASTERN TAIMYR PENINSULA

Mikhail Kurapov^{1,2}, Dmitry Konopelko¹, Victoria Ershova¹, Vasily Proskurnin²,
Sergei Petrov¹, Stepan Berzin¹

1 Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg State University, 7-9, University nab. St. Petersburg,
199034, Russia

2 Karpinsky Russian Geological Research Institute, 74, Sredny av, St. Petersburg, 199106, Russia

Abstract. The studied plume-related intrusions of the NE Taimyr are generally classified as evolved high-K I type granites with adakitic affinity. The latter is a regional feature because majority of the analyzed plume-related granitoids are geochemically similar to high potassium continental adakites. It is suggested that adakitic geochemical characteristics of the plume-related granitoids resulted from melting of hydrated mafic lower crustal protoliths and were controlled by the source lithology.

1. Введение

Представления о составе и объеме триасового магматизма в пределах Таймыро-Североземельской складчатой области существенно расширились за последние годы. Если ранее считалось, что гранитоиды могут составлять только малые тела, то последние исследования указывают на гораздо больший масштаб гранитоидного магматизма в пределах всего орогена[1,2].

Нами были получены новые петрографические, геохимические и геохронологические данные для двух триасовых интрузивных массивов, расположенных в северо-восточной части Таймыро-Североземельской складчатой области. Проведенные исследования позволяют уточнить природу раннемезозойского магматизма в пределах Арктического региона.

2. Полученные результаты

Рассматриваемые гранитоидные массивы находятся в пределах Северо-Таймырской тектонической зоны (Оленьинский массив) и Центрально-Таймырской тектонической зоны (Пекинский массив).

Оленьинский массив имеет площадь около 125 км². Главная фаза представлена порфировидными, порфиробластическими умереннощелочными биотитовыми гранитами. Граниты средней фазы распространены ограниченно, обнажены в виде мелких штоков, даек. По составу они отвечают среднезернистым биотитовым гранит-порфирам, гранитам, лейкогранитам. Породы поздней фазы представлены пегматоидными, аплитовыми разностями, мелко- и среднезернистыми гранит-порфирами. Образования третьей фазы несут молибденитовую и халькопирит-пиритовую минерализацию.

Пекинский массив представляет собой изометричное тело площадью порядка 125 км². Внедрение гранитоидов комплекса происходило в три фазы: первая фаза - порфировидных гранитов, граносиенитов, вторая - гранит-порфировая, третья – «жильная», представленная

дайками и разноориентированными невыдержанными по мощности жилами аплитов, пегматоидных гранитов, реже пегматитов. Контакты с вмещающими породами крутые, извилистые.

Геохронологический анализ (U-PbSHRIMP II по циркону) гранитоидов Оленьинского массива позволил установить его ранне-среднетриасовый возраст (249-239 млн лет), а анализ гранитоидов Пекинского массива указывает на его среднетриасовый возраст (242 и 237 млн лет). Полученные значения типичны для интрузий, связанных с Сибирским плюмом. Граниты обоих массивов являются слабеперглиноземистыми и на дискриминантных диаграммах располагаются в полях вулканических дуг и синколлизийных гранитов. Эти геохимические характеристики типичны для триасовых плюмовых интрузий, расположенных в других частях полуострова Таймыр [1–3]. Изученные плюмовые интрузии северо-восточного Таймыра в целом классифицируются как высококальциевые гранитоиды I-типа с адакитовым характером [4, 5].

3. Выводы

Было установлено, что адакитовая геохимическая характеристика представляет собой региональную особенность, поскольку большинство связанных с плюмамигранитоидов Таймыра геохимически подобны высококальциевым континентальным адакитам. Предполагается, что адакитовые геохимические характеристики гранитоидовплюмовогогенезиса обусловлены плавлением гидратированного нижнекорового протолита основного состава [6] и, вероятно, контролируются литологическим составом источника.

4. Благодарности

Исследование поддержано грантом РФФ 23-27-00283

5. Литература:

- [1] Kurapov, M.Y.; Ershova, V.B.; Khudoley, A.K.; Luchitskaya, M.V.; Stockli, D.F.; Makariev, A.A.; Makarieva, E.M.; Vishnevskaya, I.A. Latest Permian–Triassic Magmatism of the Taimyr Peninsula: New Evidence for a Connection to the Siberian Traps Large Igneous Province. *Geosphere* 2021, doi:10.1130/GES02421.1.
- [2] Vernikovskiy, V.A.; Pease, V.L.; Vernikovskaya, A.E.; Romanov, A.P.; Gee, D.G.; Travin, A.V. First Report of Early Triassic A-Type Granite and Syenite Intrusions from Taimyr: Product of the Northern Eurasian Superplume? *Lithos* 2003, 66, 23–36, doi:10.1016/S0024-4937(02)00192-5.
- [3] Proskurnina, M.A.; Proskurnin, V.F.; Remizov, D.N.; Larionov, A.N. Ring Intrusions of the Bespamyatnaya Areal: Manifestations of Shoshonite-Latite Magmatism in Northern Taimyr. *Reg. Geol. Metallog.* 2019, 76.
- [4] Castillo, P.R. Adakite Petrogenesis. *Lithos* 2012, 134–135.
- [5] Moyen, J.F. High Sr/Y and La/Yb Ratios: The Meaning of the “Adakitic Signature.” *Lithos* 2009, 112, doi:10.1016/j.lithos.2009.04.001.
- [6] Rapp, R.P.; Watson, E.B. Dehydration Melting of Metabasalt at 8-32 Kbar: Implications for Continental Growth and Crust-Mantle Recycling. *J. Petrol.* 1995, 36, doi:10.1093/petrology/36.4.891.

**РЕКОНСТРУКЦИЯ ОНТОГЕНЕТИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ РАННИХ
ОТОЦЕРАСОВ (AMMONOIDEA) ПО ПОПЕРЕЧНЫМ СЕЧЕНИЯМ ИХ
РАКОВИН**

Руслан Кутыгин, Афанасий Килясов
ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

**RECONSTRUCTION OF THE ONTOGENETIC DEVELOPMENT OF EARLY
OTOCERAS (AMMONOIDEA) FROM CROSS-SECTIONS OF THEIR SHELLS**

Ruslan Kutugin, Afanasiy Kilyasov
Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. The ontogeny of the Late Permian *Otoceras concavum* Tozer has been reconstructed from cross-sections of shells. A moderately wide shell, with a moderately narrow umbilicus, narrows intensely at tiny sizes, becoming a narrow shell. At the stage of very small sizes, the shell expands, again becoming moderately wide, and the umbilicus narrows slightly, still remaining moderately narrow. At small sizes, the change in these characteristics occurs in the same direction, but with increased intensity. Important changes are observed at the medium-sized stage, when the expansion of the shell stops and the umbilicus becomes narrow. At the end of the studied ontogenesis, the morphological development of the mollusk is aimed at the formation of a moderately narrow shape with a very narrow umbilicus. The constructed ontogenetic model clearly demonstrates the features of the development of the cross-sectional shape of *O. concavum* shells during their growth, emphasizing the considered ontogenetic trends in changes in the most important parameters of the shell. The identified transformations of the shell shape contribute to the diagnosis of small-sized *Otoceras* and can serve as the basis for subsequent reconstruction of the morphogenetic development of the family Otoceratidae.

1. Введение

Для изучения морфогенеза аммоноидей проводится последовательное отделение от раковины оборотов с фиксацией изменения скульптуры, формы раковины и лопастной линии. Кроме этого выполняются и изучаются поперечные пришлифовки, позволяющие наиболее точно смоделировать онтогенез формы раковины моллюска. Сравнение онтогенезов аммоноидей одного видового или родового таксона для разных геохронологических отрезков позволяет выяснить его морфогенез, что является ключом к познанию детального филогенеза отдельных аммоноидных групп.

Полноценные онтогенетические исследования арктических пограничных пермско-триасовых аммоноидей ранее почти не проводились; существуют только пионерные данные по фрагментарным онтогенезам лопастной линии и формы раковины [1]. В связи с этим существуют серьезные противоречия взглядов на систематику и происхождение господствовавших в арктических пермско-триасовых морях отоцерасов [1–5 и др.].

Otoceras concavum Tozer и *O. boreale* Spat индексируют биостратиграфические зоны, относимые к верхам перми и низам триаса, соответственно. Следовательно, для четкого обособления пермских и триасовых отложений крайне важна диагностика этих видов-индексов. Согласно имеющимся в литературе данным [3, 6, 8], указанные виды различаются только по форме раковины и лишь на внешних оборотах. Взрослые экземпляры первого вида отличаются крышевидной вентральной стороной с резкими вентро-латеральными краями, а также уплощенными или вогнутыми латеральными сторонами. Последние обороты крупных *O. boreale*

характеризуются угловатой вентральной стороной и округлыми боковыми сторонами. Различия между этими видами на внутренних и средних оборотах ранее не устанавливались.

2. Материал и методика

На протяжении последних лет нами велись целенаправленные сборы аммоноидей в отоцерасовых слоях верховьев р. Восточная Хандыга. В поисках также участвовали Д. Бонд, И.В. Брынько, И.В. Будников, С.С. Бурнатный, А.С. Бяков, И.Л. Ведерников, В.В. Давыдов, Ю.Д. Захаров, А.Р. Кутыгин, В.И. Макошин, А.Н. Наумов, А.М. Попов, В.В. Силантьев и Е.С. Соболев. Всего обнаружено более 250 экз. отоцерасов, из которых на зону *Otoceras concavum* приходится 67 экз.

Для выяснения онтогенетических преобразований раковины важными являются сечения, сделанные поперек плоскости навивания оборотов. Для их изготовления были отобраны шесть экземпляров, внешне сохранивших свою исходную форму. Крупные экземпляры распилены на камнерезном станке, а мелкие – при помощи электрического гравера, оборудованного тонким диском с алмазным напылением. Поскольку заполненные аргиллитом раковины легко разрушаются под воздействием воды, предварительно они были пропитаны цианоакрилатом. Разрезанный экземпляр раковины шлифовался на стекле с использованием абразивных порошков. По мере приближения сечения к оси навивания раковины, образцы регулярно сканировались на планшетном сканере, при этом контакт стекла сканера и плоскости сечения раковины смачивался водой. На завершающей стадии шлифования внутренние обороты фотографировались под микроскопом, оснащенный цифровой фотонасадкой.

У трех наиболее узких экземпляров поперечные разрезы позволили установить сильную сдавленность, произошедшую в процессе диагенеза вмещающих пород. К сожалению, форму самых первых оборотов и протоконха выяснить не удалось, поскольку у всех разрезанных образцов они полностью замещены вмещающим осадком или перекристаллизованы.

Основные измерения аммоноидей: D – диаметр раковины; W , H и M – ширина, высота и медиальная высота оборота; U – диаметр умбо. Выполненные измерения всех полуоборотов в поперечных сечениях показывают отчетливые тенденции в изменении основных показателей, что является важным шагом к морфогенетической увязке с ранее установленными данными онтогенетического развития более молодого вида (*O. boreale*) [1, 4].

3. Результаты исследований и обсуждение

В процессе изучения поперечных сечений было установлено, что преобразования формы медиальной спирали на внутренних оборотах *O. concavum* не имеет хорошо выраженного однонаправленного тренда – показатель M/D колеблется в интервале от 0.31 до 0.33. На средних оборотах происходит интенсивное растяжение спирали, при этом максимальные значения M/D превышают 0.36. На внешних оборотах спираль интенсивно сжимается, приобретая форму навивания, близкую к мелкоразмерным раковинам. В завершающей фазе онтогенеза показатель M/D становится меньше 0.33.

При очень мелких размерах (D 4–5.7 мм) раковина достигает наиболее узкой формы ($W/D=0.44$), что является фазой максимального сужения раковины (рисунок 1). В дальнейшем происходит интенсивное расширение раковины (увеличение показателя W/D). Наиболее широкими раковины становятся при D 20–30 мм. На этом промежутке онтогенеза, обозначаемом как фаза максимального расширения, W/D достигает 0.64–0.67. В дальнейшем, до конца существования особи, вероятно, происходит непрерывное сужение раковины (уменьшение W/D). Изменения показателей H/D и U/D у нормально навивающихся аммоноидей обычно взаимозависимы и противоположны по направлению. Для представителей *O. concavum* характерны увеличение относительной высоты оборота и уменьшение размера умбо. Отношение ширины оборота к его высоте практически повторяет направление и интенсивность изменений вышерассмотренного показателя W/D . В фазу максимального сужения раковины (D

5.7 мм) значения высоты и ширины оборота становятся близкими, тогда как в остальные периоды индивидуального развития, исключая внешние обороты, ширина существенно превосходит высоту, причем в фазу максимального расширения раковины (D 20–30 мм) W/H может превышать 1.3. На внешних оборотах значения W и H вновь уравниваются.

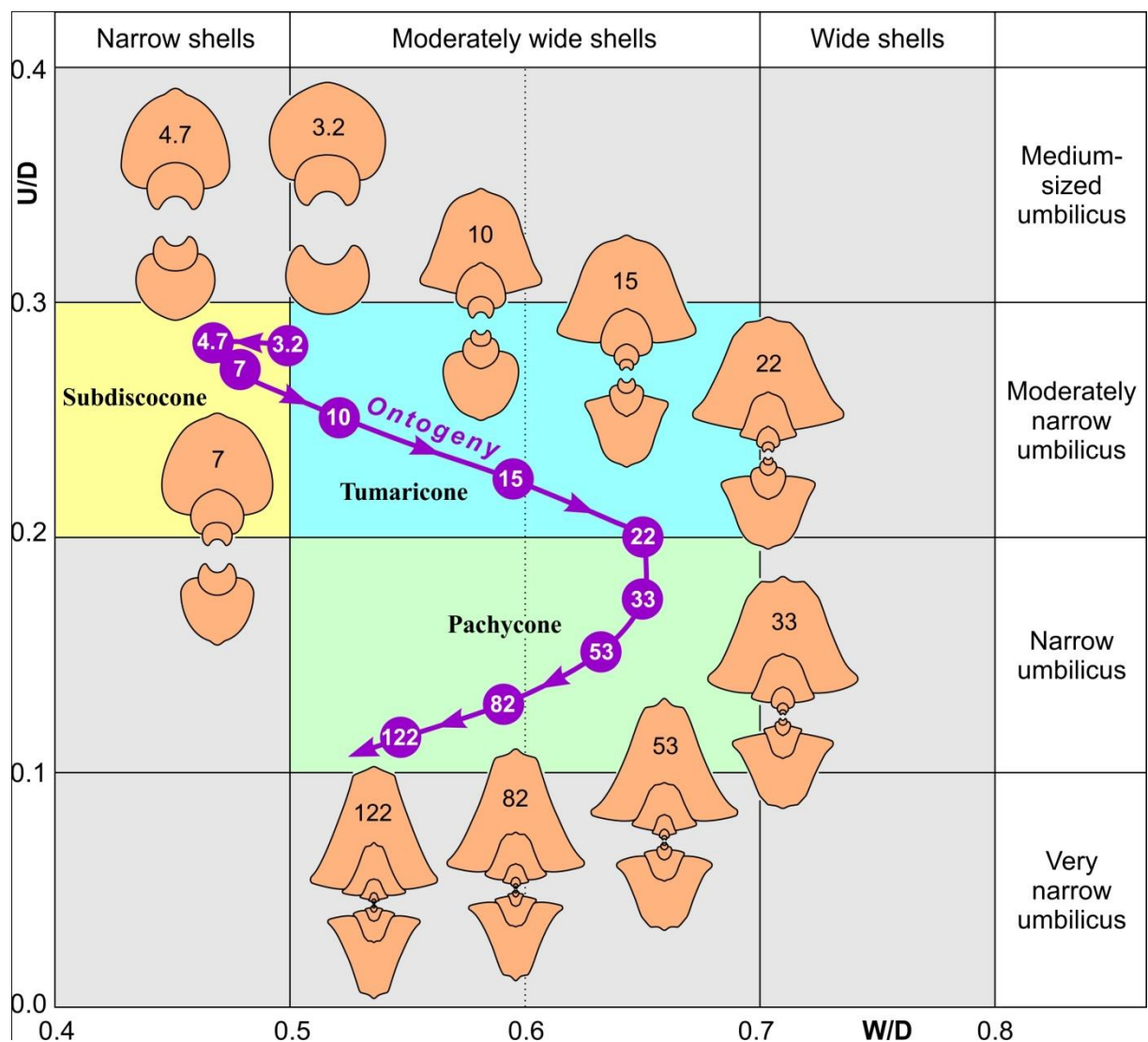


Рисунок 1 – Модель развития формы раковин *Otoceras concavum* Tozer в онтогенезе. На сечениях и маркерах показаны диаметры раковин в мм.

На фоне выдержанных значений U/D, при мельчайших размерах раковина в онтогенезе сужается, превращаясь из умеренно широкой в узкую. При очень мелких размерах раковина расширяется, вновь становясь умеренно широкой. На этой стадии незначительно сужается умбо, оставаясь по-прежнему умеренно узким. Изменение обсуждаемых показателей (W/D и U/D) на стадии мелких размеров продолжается в том же направлении, но ее интенсивность усиливается. Важные преобразования в онтогенезе наблюдаются при средних размерах раковины, когда расширение (увеличение W/D) прекращается, а умбо становится узким. На завершающих стадиях изученного онтогенеза, при медленном сокращении размера умбо, раковина сужается. Наблюдается онтогенетический тренд, направленный на формирование умеренно узкой формы с очень узким умбо (субопеликон по классификации [8]).

Построенная модель (рис. 1) наглядно демонстрирует особенности развития формы поперечного сечения раковин *Otoceras concavum* в процессе их роста, подчеркивая рассмотренные выше онтогенетические тренды изменения размера умбо и относительной

ширины раковины. При этом из установленного ранее многообразия U/D–W/D форм, насчитывающих 35 типов [8], изученные представители вида *O. concavum* приобретают только три, в следующей последовательности: тумарикон → субдискоккон → тумарикон → пахикон.

4. Выводы

По изученным поперечным сечениям построены модели онтогенетического изменения формы раковин вида *Otoceras concavum* Tozer на стадиях от мельчайших до очень крупных размеров. Выявлено однонаправленное уменьшение размера умбо и увеличение относительной высоты оборота в процессе роста раковины. Изменение общей формы сечения оборота и его относительной ширины носит циклический характер (в определенных размерах) и сечение оборота сужаются, затем (при мелких и очень мелких размерах) интенсивно расширяются. После периода стабилизации W/H и W/D, наблюдаемой при средних размерах раковины, до окончания жизни моллюска происходит уменьшение этих показателей – сужение раковины и сечения оборота.

5. Благодарности

Исследования выполнены за счет Российского научного фонда и Республики Саха (Якутия) (грант №22-24-20112, <https://rscf.ru/project/22-24-20112/>) и по государственному заданию Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН (FUFG-2024-0005).

6. Литература:

- [1] Zaharov Yu.D. *Otoceras* of the Boreal Province // *Paleontologicheskij zhurnal*, 1971, no. 3, pp. 50–59.
- [2] Bando Y. On the Otoceratacean ammonoids in the Central Tethys with a note on their evolution and migration // *Memoirs of the Faculty of Education Kagawa University*, 1980, vol. 30, no. 1, pp. 23–49.
- [3] Dagys A., Ermakova S. Induan (Triassic) Ammonoids from North-Eastern Asia // *Revue de Paléobiologie*, 1996, vol. 15, no. 2, pp. 401–447.
- [4] Zakharov Yu.D. Ammonoid succession of Setorym River (Verkhoyansk Area) and problem of Permian-Triassic Boundary in Boreal Realm // *Journal of China University of Geosciences*, 2002, vol. 13, no. 2, pp. 107–123.
- [5] Zakharov Y.D., Biakov A.S., Horacek M., Kutygin R.V., Sobolev E.S., Bond D.P.G. Environmental control on biotic development in Siberia (Verkhoyansk Region) and neighbouring areas during Permian–Triassic large igneous province activity // J.Guex, Torday J.S., Miller W.B.Jr. (eds.). *Morphogenesis, Environmental Stress and Reverse Evolution*. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2020, pp. 197–231.
- [6] Tozer E.T. A standard for Triassic time // *Bulletin of the Geological Survey of Canada*, 1967, no. 156, pp. 1–103.
- [7] Tozer E.T. Canadian Triassic Ammonoid faunas // *Bulletin of the Geological Survey of Canada*, 1994, no. 467, pp. 1–663.
- [8] Kutygin R.V. Shell shapes of Permian ammonoids from Northeastern Russia // *Paleontological Journal*, 1998, vol. 32, no. 1, pp. 19–29.

**КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ СЕЙСМИЧНОСТИ ИЛИН-ТАССКОГО
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ
(СЕВЕРО-ВОСТОЧНАЯ ЧАСТЬ ХРЕБТА ЧЕРСКОГО)**

Макаров Александр^{1,2}

1 ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

2 Якутский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба» РАН,
677000, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

**CLUSTER ANALYSIS OF SEISMICITY OF THE ILIN-TASS EARTHQUAKE
(NORTHEASTERN PART OF CHERSKY RIDGE)**

Aleksandr Makarov^{1,2}

1 Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

2 Yakut branch of the Geophysical Service of the RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. This research article reviews one of the strongest modern seismic events within the Chersky seismotectonic zone, which is the northeastern part of the ridge of the same name. Within its boundaries, a cluster analysis of seismicity was performed using instrumental data on the basis of the program Cluster Bykl EQ developed in the Baikal branch of the FIC EGS RAS. As a result of the research, we obtained plots of distribution of the events number, the total released seismic energy. The study of the Ilin-Tass epicentral field was carried out, and a 3D model of seismicity distribution was built.

1. Введение

Сейсмический пояс Черского протягивается вдоль современной границы между двумя крупными тектоническими плитами – Североамериканской и Евразийской. [1]. На его активность указывают как инструментальные данные сейсмостанций Якутского филиала ФИЦ ЕГС РАН, фиксирующих координаты эпицентров, время проявления, энергетический класс землетрясений, так и результаты опроса населения о макросейсмическом эффекте. Эта информация дополняется материалами Магаданского филиала ФИЦ ЕГС РАН. Самые ранние следы землетрясений были отмечены в виде сейсмодислокаций в начале прошлого столетия [2]. В данной работе рассматривается одно из самых сильных современных сейсмических событий в пределах сеймотектонической зоны Черского – Илин-Тасское, эпицентр которого находится в северных отрогах северо-востока одноименного хребта.

2. Кластерный анализ Илин-Тасского землетрясения

Сеймотектоническая зона Черского находится в обстановке устойчивого северо-восточного сжатия с преобладанием левосдвиговых смещений. В районе исследований широкое распространение имеют тектонические разломы северо-западного простирания [3].

Исследуемая территория условно была ограничена координатами 53–71° с.ш., 136–152° в.д. Для мониторинга сейсмичности был использован массив данных ЯФ ФИЦ ЕГС РАН за период 1963–2021 гг. На его основе были построены графики количества событий по годам и суммарное количество выделенной энергии, а также карта сейсмичности за указанный временной интервал. В среднем ежегодно здесь происходит около 20–40 землетрясений с энергетическим классом $K_p \geq 7.6$, что соответствует магнитуде $M \geq 2.0$. На обоих графиках можно выделить несколько отчетливых максимумов, соответствующих одиночным высокоэнергетическим землетрясениям и сильным событиям, сопровождавшимся афтершоками. На исследованной территории произошло более 20 сильных событий с $K_p > 12$, приуроченных к различным тектоническим структурам. При проведении кластерного анализа сейсмичности по

инструментальным данным была использована программа ClusterBykIEQ, разработанная в Байкальском филиале ФИЦ ЕГС РАН для выделения кластеров в поле эпицентров землетрясений [4].

После первой стадии кластеризации методом ближайшего соседа было выделено 479 кластеров. Наиболее крупными среди них являются кластеры: № 452, объединяющий 353 сейсмических события, № 379 – 69 события, № 394 – 47 событий. Так как ненулевые кластеры тяготеют к эпицентральной зоне сильных землетрясений, то они рассматривались по отдельности. Разбиение массива данных на подкластеры определялось параметрами шага по времени и минимальным количеством событий в подкластере.

Наибольшее количество зарегистрированных событий связано с Илин-Тасским землетрясением 14 февраля 2013 г. Для него выделено 7 подкластеров (№№ 371.0, 379.0, 380.0, 392.0, 394.0 и 452.10). В подкластере № 371.0 преобладают значения глубин в интервале $h=9-11$ км при северо-восточном тренде афтершоков; остальные подкластеры локализуется параллельно подкластеру № 371.0, накладываются друг на друга в восточном направлении и имеют параметры глубины от 9 до 13 км. Приповерхностный кластер (глубина 0–10 км) № 452 имеет СЗ простирание. Скудность первых 5-ти подкластеров указывает на преобладающее распространение гипоцентральной зоны на глубинах 9–13 км. На современную активность района Илин-Тасского землетрясения указывает локация подкластера № 452.10, где выделяется группа слабых толчков, произошедших в 2015 году.

3. Выводы

В результате проведенных исследований получены графики распределения количества событий, суммарной выделившейся сейсмической энергии. При помощи программы ClusterBykIEQ был произведен кластерный анализ Илин-Тасского эпицентрального поля, а также построена 3D модель распределения сейсмичности.

4. Благодарности

Работа выполнена в рамках Государственного задания НИР ИГАБМ СО РАН(FUFG-2024-0005).

5. Литература:

- [1] Fujita K., Kozmin B.M., Mackey K.G., Riegel S.A., Imaev V.S., Mclean M.S. Seismotectonics of the Chersky seismic belt, eastern Russia (Yakutia) and Magadan district, Russia // Stephan Mueller Special Publication Series, 2009, vol. 4, pp. 117–145.(translated from English).
- [2] Imaev V.S., Imaeva L.P., Kozmin B.M. Seismotectonics of Yakutia. Moscow: GEOS, 2000, 227 pp.
- [3] Imaeva L. P. Seismotectonic Activity of Recent Structures in the Eastern Sector of the Siberian Craton: monograph. Penza: Science Publishing Center «Sociosphere», 2022, 368 pp.
- [4] Hritova, M. A., Gileva N. A. Cluster analysis as a means of studying the seismic regime of the Baikal region // Geoinformatics, 2017. vol. 2, pp. 39-47.

**О ПРИСУТСТВИЕ ЗОНЫ *JAKUTOPRODUCTUS PROTOVERKHOYANICUS*
ВЕРХНЕГО КАРБОНА В РАЗРЕЗЕ ТИТ-АРЫ (НИЗОВЬЕ Р. ЛЕНА)**

Виктор Макошин, Руслан Кутыгин
ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

**ON THE PRESENCE OF THE *JAKUTOPRODUCTUS PROTOVERKHOYANICUS*
ZONE OF THE UPPER CARBONIFEROUS IN THE TIT-ARY SECTION
(LOWER REACHES OF THE LENA RIVER)**

Victor Makoshin, Ruslan Kutugin
Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. A vertical sequence of brachiopods has been established in the section of the Tit-Ary in the northern part of the Tuora-Sis uplift of the lower reaches of the Lena River. In the Tit-Ary section, Upper Cambrian are overlain by Upper Carboniferous (Gzhelian) and Early Permian (Asselian) deposits, which are characterized by the *Jakutoproductus protoverkhoyanicus* and *Jakutoproductus verkhoyanicus* zones. The Tit-Ary section is the first of those established in the lower reaches of the Lena River, with exposed boundary Carboniferous–Permian beds. In the Tit-Ary section, the possibility of paleontological and chemostratigraphic substantiation of the Carboniferous–Permian boundary in Eastern Siberia has appeared.

1. Введение

Туорасисский выступ расположен в зоне сочленения Сибирской платформы и Верхоянского складчато-надвигово пояса и приурочен к блоковому поднятию докембрийских и кембрийских образований. В границах Туорасисского выступа кембрийские отложения трансгрессивно перекрывается нижнепермскими осадками [1, 2]. На поверхности кембрийских образований низовьев р. Лены Г.Ф. Лунгерсгаузен [3] описал глубокие карстовые полости, заполненные инфлювием. Возраст карстовых полостей предполагался допермским. Выделенные из инфлювия палинокомплексы (напротив юго-западного окончания о. Тит-Ары) позволили датировать карстовые образования и заполняющие их породы средним–поздним карбоном [4]. В перекрывающих кембрий отложениях был установлен споро-пыльцевой комплекс, представленный преимущественно раннепермскими формами, а присутствующие в нем каменноугольные элементы связывались с перемывом более древних отложений.

Ранее нами подтвердилось наличие несогласного взаимоотношения между кембрийскими и пермскими отложениями в Чекуровском разрезе (левобережье р. Лена, южная часть Туорасисского выступа). В нем на верхнем кембрии с размывом была установлена зона *Jakutoproductus verkhoyanicus* [5], которая является нижним биостратиграфическим подразделением пермской системы Верхоянья [6]. Стоит отметить, что установленная зона *verkhoyanicus* в Чекуровском разрезе представлена без нижней части, приходящейся на стратиграфическое несогласие.

В отличие от Чекуровского разреза, данные о возрасте основания верхоянского терригенного комплекса в северной части Туорасисского выступа не столь однозначны [7]. С одной стороны исследования Г.Ф. Лунгерсгаузена и В.Н. Андрианова [3, 8] говорят о том, что в южной и северной частях Туорасисского выступа накопление осадков верхоянского терригенного комплекса, перекрывающего кембрийские образования, происходило синхронно, причем после каменноугольно-пермского (кыгылтасско-хорокытского) рубежа. С другой стороны Б.С. Абрамовым и А.Д. Григорьевой в разрезе Тит-Ары были обнаружены брахиоподы *Tiramnia yakutica* Solomina средне-позднекаменноугольного возраста [9]. При этом следует

отметить, что под этим же видовым названием Б.С. Абрамов и А.Д. Григорьева описывали брахиопод относящихся к раннепермскому таксону [7, 10, 11].

2. Основной раздел

Собранная в 2018 г. Р.В. Кутыгиным коллекция брахиопод из отложений разреза Тит-Ары (правый берег л. Лена, напротив поселка Тит-Ары) позволила предположить наличие в разрезе верхнекаменноугольных отложений. Однако, для более точных выводов понадобилось дополнительное исследование разреза со сборами новых коллекций беспозвоночных. В 2019 г. Р.В. Кутыгиным, В.И. Макошиным и А.Н. Килясовым было проведено детальное изучение разреза Тит-Ары и собрано около 60 экземпляров брахиопод.

Разрез Тит-Ары представлен массивными доломитами верхнего кембрия на которых трансгрессивно залегают 8-метровая пачка песчаников слабосцементированных с обильными желваками железистых сульфидов и углефицированными остатками растений плохой сохранности. Над песчаниками наблюдается 60-метровая толща алевропелитовых и алевропсаммитовых пород.

В изученном разрезе установлено три уровня с брахиоподами. Первый уровень установлен в 25–28 м выше поверхности несогласия. В серых известковых алевролитах обнаружены гнездовые скопления беспозвоночных (брахиопод, гастропод, наутилоидей, криноидей и мшанок). Из брахиопод определены многочисленные *Jakutoproductus protoverkhoyanicus* Kashirtsev и более редкие *Verchojania abramovi* Makoshin, *Muirwoodia mamata* (Keyserling), *Rhynchopora arctica* Licharew et Einor, *Streptorynchus?* sp., *Actinoconchus* sp. Наибольший интерес среди определенных брахиопод вызывает вид *J. protoverkhoyanicus* Kashirtsev, который является видом-индексом одноименной зоны верхней части кыгылтасского горизонта [12]. Также следует отметить наличие в разрезе вида *V. abramovi* Makoshin, который ранее нами был установлен в нижней части кубалахской свиты Кубалахского разреза низовьев р. Лены [13].

Второй уровень с брахиоподами найден в 38–41 м выше поверхности несогласия. Темно-серые известковые аргиллиты с рассеянной галькой известковых алевролитов охарактеризованы линзовидными скоплениями брахиопод видов *Verchojania* cf. *monstrosus* (Ganelin), *Jakutoproductus* sp., *Tiramnia yakutica* Solomina, *Tiramnia?* sp., *Canocrinella? alazeica* Zavadowsky, *Anidanthus* sp., *Neospirifer* sp. и *Spiriferella* sp. Находка *V. cf. monstrosus* (Ganelin), который также нами был обнаружен в нижней части кубалахской свиты Кубалахского разреза низовьев р. Лены [13], позволяет сопоставлять вмещающие отложения с зоной *Verchojania monstrosus* верхней части пареньского надгоризонта (верхний пенсильваний) Колымо-Омолонского региона [14].

Третий уровень выявлен в 49 м выше поверхности несогласия и приурочен к контакту серых известковых алевролитов с темно-серыми аргиллитами. Здесь встречаются единичные раковины *Jakutoproductus verkhoyanicus* (Fredericks), *J. cf. verkhoyanicus* (Fredericks), *Phricodothyris* sp., *Tornquistia* sp.

Комплекс брахиопод из третьего уровня представлен небольшим количеством экземпляров и бедным таксономическим разнообразием. При этом по находке брахиопод *Jakutoproductus verkhoyanicus* (Fredericks) комплекс уверенно относится к одноименной зоне *verkhoyanicus*, являющейся нижним биостратиграфическим подразделением пермской системы Верхоянья. Следует отметить, что отсутствие в комплексе представителей вида *Jakutoproductus lenensis* Makoshin, являющегося видом-индексом одноименных слоев в верхней части зоны *verkhoyanicus* низовьев р. Лены [12], позволяет предположить, что третий уровень с брахиоподами в разрезе Тит-Ары приходится на нижнюю (ассельскую) часть указанной зоны.

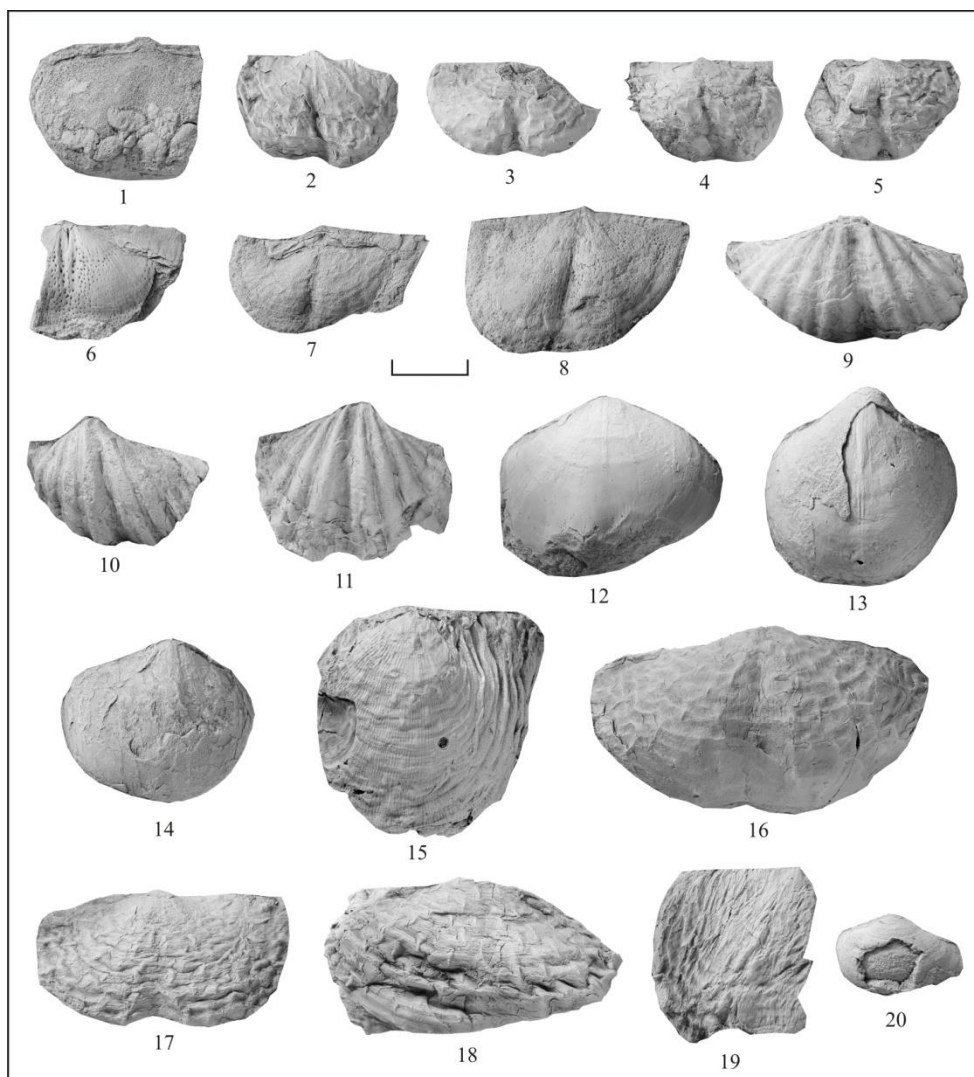


Рисунок 1 – Брахиоподы разреза Тит-Ары, брюшные створки. 1 – *Verchojania abramovi* Makoshin, 2–5 – *Jakutoproductus protoverkhoyanicus* Kashirtsev, 6–8 – *Muirwoodia mammata* (Keyserling), 9–11 – *Spiriferella* sp., 12–14 – *Tirannia yakutica* Solomina, 15 – *Canocrinella? alazeica* Zavodowsky, 16 – *Verchojania* cf. *monstrosus* (Ganelin), верхний пенсильваний, гжельский ярус; 17 – *Jakutoproductus verkhoyanicus* (Fredericks), 18, 19 – *Jakutoproductus* cf. *verkhoyanicus* (Fredericks), 20 – *Phricodothyris* sp., нижняя пермь, ассельский ярус. Размерная шкала 10 мм.

3. Выводы

В результате проделанной работы установлено, что в разрезе Тит-Ары на верхнекембрийских отложениях залегают верхнекаменноугольные (гжельские) и раннепермские (ассельские) отложения, которые охарактеризованы зонами *Jakutoproductus protoverkhoyanicus* и *Jakutoproductus verkhoyanicus* соответственно. Впервые в низовье р. Лены установлен разрез со вскрытыми пограничными каменноугольно-пермскими слоями. В связи с этим в разрезе Тит-Ары появилась возможность палеонтологического и хемотратиграфического обоснования границы карбона и перми в Восточной Сибири, что требует дальнейшего его детального изучения.

4. Благодарности

Выражаем благодарность А.Н. Киясову (ИГАБМ СО РАН) за совместное проведение полевых работ. Изучение биостратиграфической последовательности брахиопод выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-77-10028, <https://rscf.ru/project/22-77-10028/>;

5. Литература:

- [1] Resolutions of the Third Interdepartmental Regional Conference on the Stratigraphy of the Precambrian, Paleozoic, and Mesozoic of Northeastern Russia, St. Petersburg, 2002, Koren, T.N. and Kotlyar, G.V., Eds., St. Petersburg: Vseross. Nauchno-Issled. Geol. Inst., 2009 (in Russian).
- [2] Gertseva, M.V., Borisova, T.P., Tschibisova, E.D., et al., The 1 : 1 000 000 State Geological Map of the Russian Federation, 3rd ed., Ser. Verkhoyansk-Kolyma, Sheet R-52–Tiksi, Explanatory Note (Karpinsky Russ. Geol. Res. Inst., St. Petersburg, 2016).
- [3] Stratigraphy of the Carboniferous and Permian Deposits of Northern Verkhoyanie, Ed. by V.V. Menner, T.G. Sarycheva, and G.E. Tschernjak. Nedra, Leningrad, 1970, 191 p. (in Russian).
- [4] Ershova, V.B., Prokopiev, A.V., Khudoley, A.K., Fefilova, L. A. Deposits in paleokarst caverns as indicators of Carboniferous paleogeographic environments in the Northeastern part of the Siberian platform // Doklady Earth Sciences, 2012, vol. 442, no. 4, pp. 511-515.
- [5] Makoshin, V.I., Kutygin, R.V. Asselian-Sakmarian brachiopod zonation of the left bank of the lower reaches of the Lena River, Northeast Russia // Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki, 2022, vol. 164, no. 4, pp. 577–589.
- [6] Budnikov, I.V., Kutygin, R.V., Shi, G.R. et al. Permian stratigraphy and paleogeography of Central Siberia (Angaraland) – A review // Journal of Asian Earth Sciences, 2020, vol. 196, article 104365, pp. 1–21.
- [7] Makoshin, V.I., Kutygin, R.V. First evidence for the presence of the Upper Carboniferous deposits on the Tuora-Sis uplift of the lower reaches of the Lena River, Northeast Russia // Doklady Earth Sciences, 2023, vol. 511, no. 1, pp. 558-562.
- [8] Andrianov, V.N. Permian and some Carboniferous Ammonoids of Northeastern Asia. Novosibirsk, Nauka, 1985, 180 p. (in Russian).
- [9] Abramov, B.S. and Grigorjeva, A.D. Biostratigraphy and Brachiopods of the Permian of the Verkhoyansk Region. Moscow: Nauka, 1988, 204 p. (in Russian).
- [10] Abramov, B.S. and Grigorjeva, A.D. Biostratigraphy and Brachiopods of the Middle and Upper Carboniferous of the Verkhoyansk Region. Moscow: Nauka, 1983, 168 p. (in Russian).
- [11] Kutygin, R.V., Biakov, A.S., Makoshin, V.I. et al. Biostratigraphy and important biotic events in the Western Verkhoyansk Region around the Sakmarian–Artinskian boundary // Palaeoworld. 2020, vol. 29, no. 2, pp. 303–324.
- [12] Makoshin, V.I., Kutygin, R.V. Asselian–Sakmarian (Lower Permian) brachiopod zonation of the Verkhoyansk Region, Northeast Russia // Stratigr. Geol. Correl., 2020, vol. 28, no. 7, pp. 716–744.
- [13] Makoshin, V.I. A New Species of *Waagenoconcha* Chao (Brachiopoda, Productida) from the Asselian–Sakmarian of the Lower Reaches of the Lena River, Northeast Russia // Paleontological Journal, 2022, vol. 56, no. 4, pp. 383–388.
- [14] Ganelin, V.G., Tschernjak, G.E. Marine basins of Northeast Asia // The Carboniferous of the World. Vol. III. Madrid: Instituto Tecnológico GeoMinero de Espana, 1996. P. 207–234, 384–397.

СОЗДАНИЕ 3D - МОДЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ БРАХИОПОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ “BLENDER”

Арсен Николаев

ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

CREATION OF 3D - MODELS OF THE INTERNAL STRUCTURE OF BRACHIOPODS USING THE BLENDER PROGRAM

Arsen Nikolaev

Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. 3D modeling allows you to create a very accurate model that is as close to reality as possible. Modern graphics programs are characterized by high detail. It is not easy to display a three-dimensional object in a two-dimensional plane, so the element of the external and internal structure of brachiopod shells is important. And these values of external and internal characters are very important for constructing an objective taxonomy of brachiopods.

1. Введение.

Трёхмерное моделирование позволяет создать очень точную модель, максимально приближенную к реальности. Современные графические программы характеризуются высокой детализацией. Отобразить трёхмерный объект в двухмерной плоскости не просто, поэтому важное значение таксономическое имеют элементы внешнего и внутреннего строения раковин брахиопод. Эти признаки очень важны для построения объективной филогении и систематики брахиопод.

Раннедевонские спирифериды Северо-Востока России являются важной составляющей в фаунистических ассоциациях. Они распространены по всему разрезу нижнего девона и играют важную роль для определения возраста отложений и внутри- и межрегиональной корреляции. Изучением раннедевонских спириферид Северо-Востока России в разные годы занимались Р. Е. Алексеева [1], В. И. Авдеева, В. В. Баранов [2] В.В. Баранов, Р.Б. Блуджетт [3], В.В. Баранов [4–7], В.В. Баранов, Т.С. Альховик [8, 9].

2. Описание внешнего строения объекта исследования

Раковина спириферид *Howellella prima* Alekseeva, 1967 среднего размера, овальная, умеренно вздутая, поперечно-вытянутая с наибольшей шириной и толщиной около середины. Брюшная створка сильно выпуклая с наибольшей толщиной в задней половине. Макушка высокая, загнутая. Арея высокая, треугольная, вогнутая. Синус начинается от макушки и ограничен двумя крупными простыми ребрами. У взрослых форм спинная створка по выпуклости равна брюшной. Ее наибольшая толщина находится в задней половине. Седло низкое плоское, широкое, разделенное продольной бороздкой, расширяющейся к переднему краю. Боковые ребра простые, округлые. Микроскульптура представлена узкими концентрическими пластинами нарастания с тонкими иглами на переднем крае. (Рисунок 1)

3. Описание программы исследования

Для создания послойных срезов использовалась программа «Blender».

«Blender» — профессиональное свободное и открытое программное обеспечение для создания трёхмерной компьютерной графики, включающее в себя средства моделирования, скульптинга, анимации, симуляции, рендеринга, постобработки и монтажа видео со звуком, компоновки с помощью «узлов» (Node Compositing). В настоящее время пользуется большой популярностью

среди бесплатных 3D-редакторов в связи с его быстрым стабильным развитием и технической поддержкой.

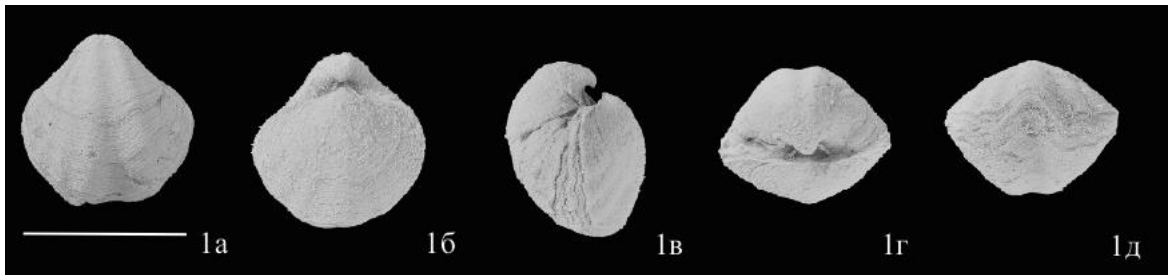


Рисунок 1 – Внешнее строение *Howellella prima* Alekseeva 1967: а – вид со стороны брюшной створки, б – вид со стороны спинной створки, в – вид сбоку, г – вид сзади, д – вид спереди; ГМ ИГАБМ СО РАН, экз. № 1/261; нижний девон, прагиен, короткинский горизонт; хр. Сетте-Дабан.

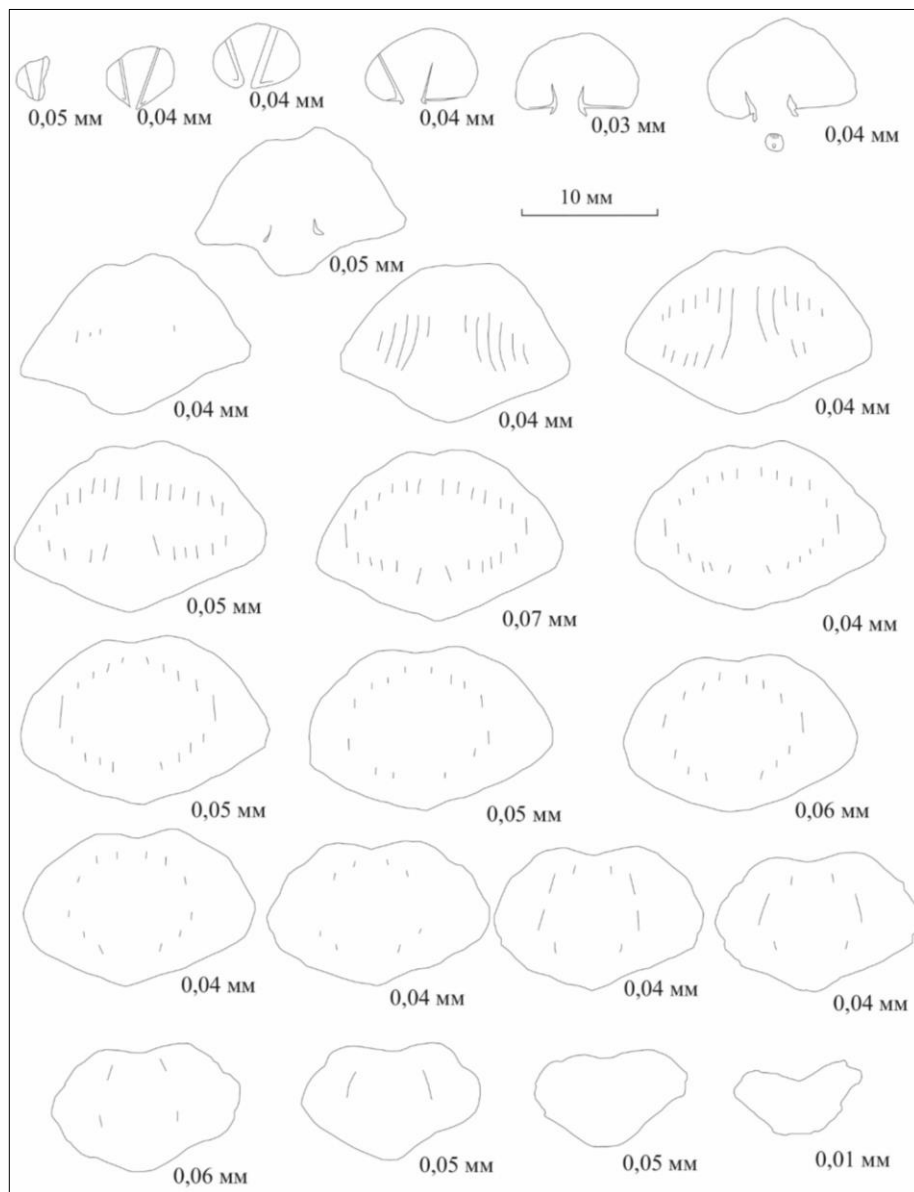


Рисунок 2 – Поперечные сечения *Howellella prima* Alekseeva 1967, ГМ ИГАБМ СО РАН, экз. № 1/261; нижний девон, прагиен, короткинский горизонт Селенняхского края.

Характерной особенностью программы Blender выступает небольшой ее размер по сравнению с другими популярными программами для 3D-моделирования. Демонстрационные сцены можно скачать на официальном сайте или на сайте открытых проектов «Blender Cloud»

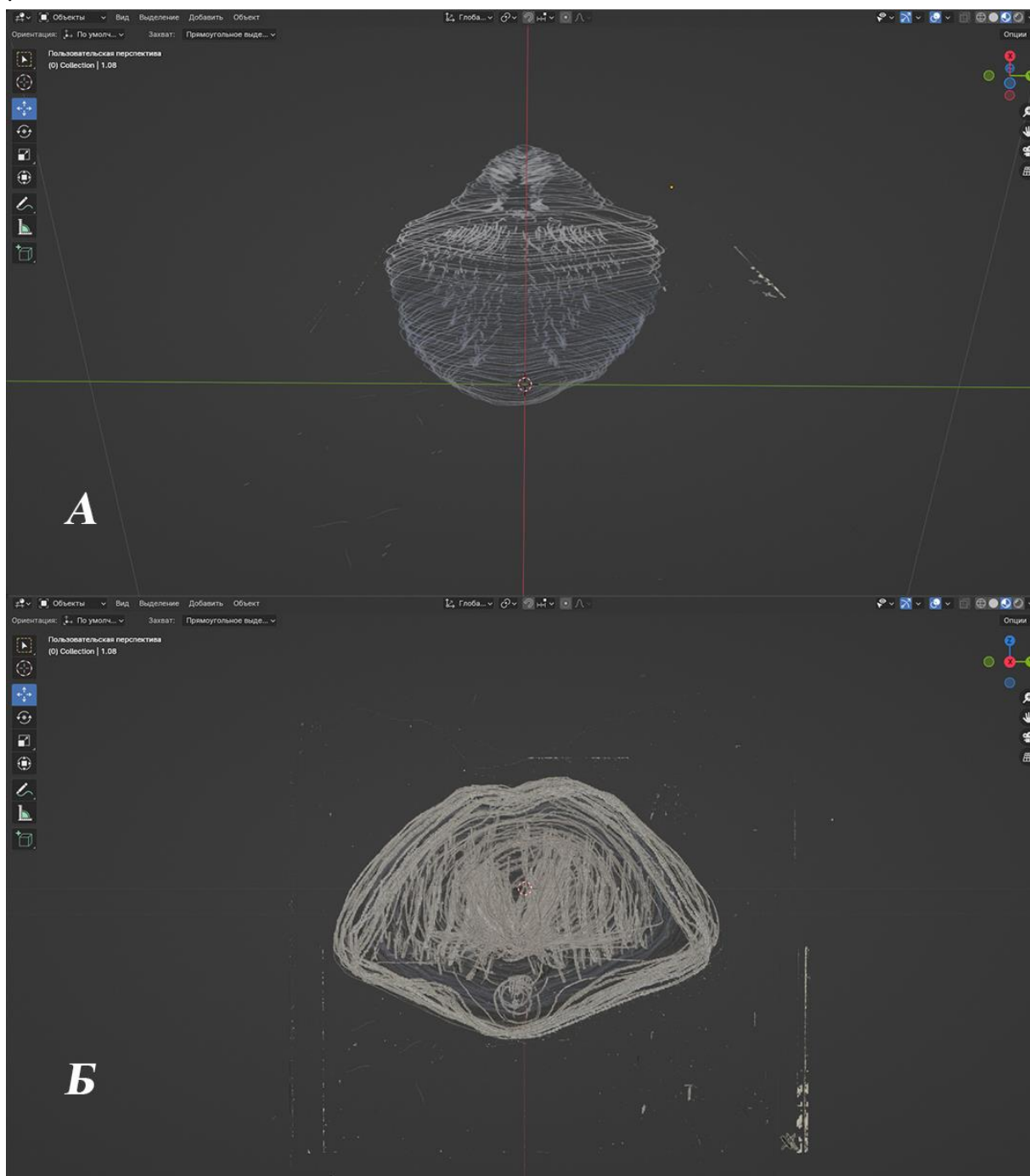


Рисунок 3 – 3D модели внутреннего строения раковины *Howellevella prima* Alekseeva 1967; *а* – вид со стороны спинной створки, ГМ ИГАБМ СО РАН, экз. № 1/261, *б* – поперечные сечения, ГМ ИГАБМ СО РАН, экз. № 1/261; нижний девон, прагиен, короткинский горизонт Селенняхского кряжа.

4. Методика изучения

При изучении спириферид применялись классические методики. На начальных этапах раковины брахиопод подвергались механическому и химическому препарированию. Чтобы получить общее представление о внешнем облике раковины и ее скульптуре, она фотографировалась в четырех или пяти положениях. Перед фотографированием раковина опьялялась хлористым аммонием или углеродом. Для изготовления поперечных пришлифовок

она помещалась в квадратную форму для заливки эпоксидной смолой. Пришлифовки выполнялись с шагом 0.1 мм. (Рисунок 2). Каждая шлифовка обрисовывается через микроскоп. После завершения весь результат сканируется на планшетном сканере, затем проходит обработку через графический редактор. Полученный результат загружается в программу блендер и составляется послойная 3D модель (Рисунок 3), (Рисунок 4).

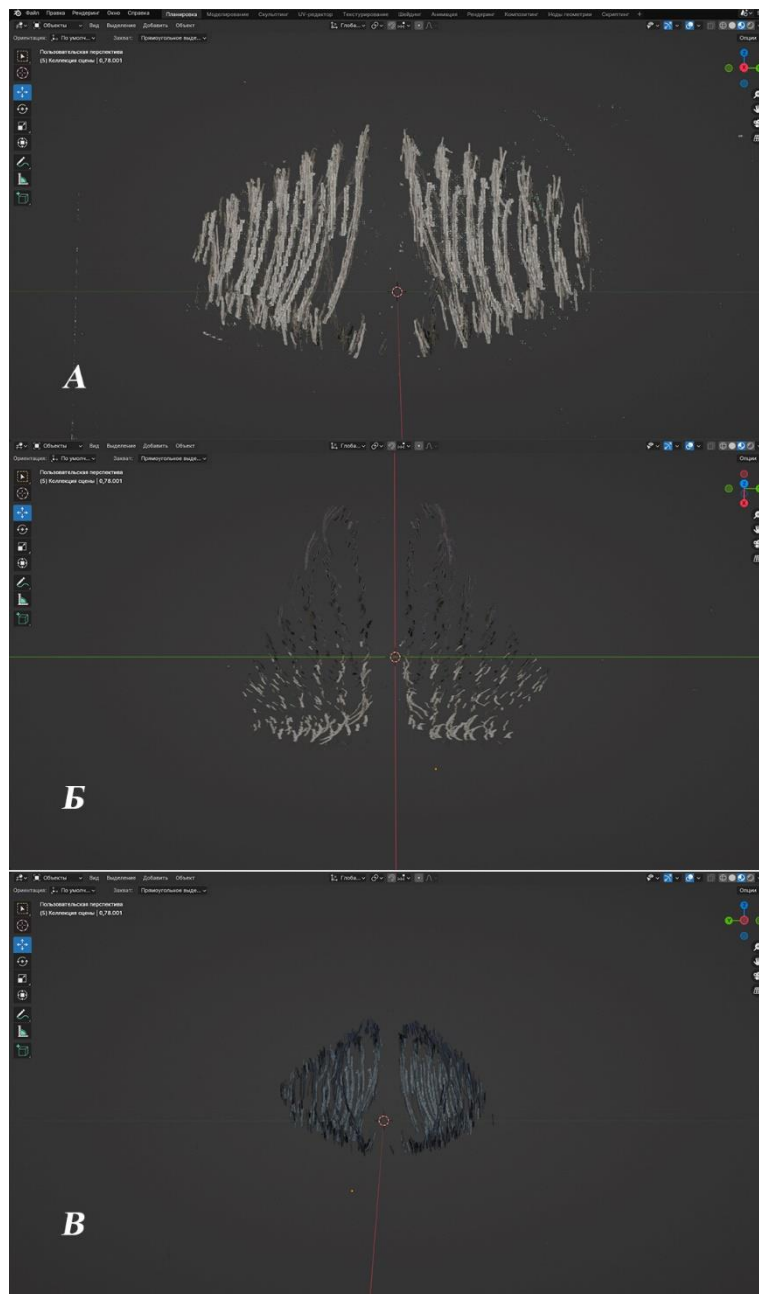


Рисунок 4 – а-в. Строение брахиидума *Howellella prima* Alekseeva 1967; а – вид сверху, ГМ ИГАБМ СО РАН, экз. № 1/261, б – вид со стороны брюшной створки, ГМ ИГАБМ СО РАН, экз. № 1/261, в – вид спереди, ГМ ИГАБМ СО РАН, экз. № 1/261 нижний девон, прагиен, короткинский горизонт Селеняхского кряжа.

5. Выводы

Впервые с использованием компьютерной программы «Blender». была создана 3D модель строения брахиофория у спириферид *Howellella prima* Alekseeva 1967 (Рис. 3, 4)

Универсальность этого метода позволяет выявлять строение внутренних структур не только у брахиопод, но и у других групп беспозвоночных.

6. Благодарности

Исследование выполнено за счет государственного финансирования ИГАБМ СО РАН, проект FUGG-2024-0005.

7. Литература:

- [1] Alekseeva, R.E. Brachiopods and stratigraphy of the Lower Devonian North-East USSR. М.: Nauka, 160 p.
- [2] Avdeeva, V.I., Baranov, V.V. New Devonian spiriferids North-East Asia // Geology and mineral resources of Yakutia. Yakutsk: YSU publishing house. 1995. pp. 34–42.
- [3] Baranov, V.V., Blodgett, R.B. Early Devonian spiriferids (Brachiopoda) of Eurasia and North America // Domestic Geology. 2015. pp. 77–82.
- [4] Baranov, V.V. Brachiopods of the family Ambocoeliidae George (order Spiriferida) from the Emsian Stage of the Lower Devonian of North-East Russia // Paleontological Journal. 2009a. No. 1. pp. 54–62.
- [5] Baranov, V.V. New brachiopods of the family Reticulariidae Waagen (order Spiriferida) from the Lower Devonian of North-East Russia // Paleontological Journal. 2009b. No. 4. pp. 18–22.
- [6] Baranov, V.V. New spiriferids (Brachiopoda) from the Lower and Middle Devonian of Northeastern Russia. Paleontological Journal, 2014, Vol. 48, No. 3, pp. 266–274. © Pleiades Publishing, Ltd., 2014. Original Russian Text © V.V. Baranov, 2014, published in Paleontologicheskii Zhurnal, 2014, No. 3, pp. 49–56).
- [7] Baranov, V.V. New spiriferids from the Lower and Middle Devonian of Northeast Russia // Paleontological Journal. 2014. No. 3. P. 49-56.
- [8] Baranov, V.V., Alkhovik, T.S. Devonian cyrtinoids (Brachiopoda) of North-East Russia // Pacific Geology. 2004. T. 23. No. 1.
- [9] Baranov, V.V., Alkhovik, T.S. Brachiopods of the suborder Delthyridina Ivanova (order Spiriferida) from the Lower and Middle Devonian of northeastern Russia // Paleontological Journal. 2007. No. 1. P. 37–45.

**СЕЙСМОФАЦИИ ЗАПАДНОГО ЗАМЫКАНИЯ
НОВОСИБИРСКО – ЧУКОТСКОЙ НАДВИГОВОЙ ЗОНЫ**

Анатолий Оболкин¹, Александр Оболкин², Мария Слепцова¹

¹ ФГБУН ФИЦ «ЯНЦ СО РАН» «Институт проблем нефти и газа СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, ул. Петровского, 2

² ПАО «Сургутнефтегаз», 677980, Россия, г. Якутск, ул. Орджоникидзе, 36

**SEISMO FACIES OF THE WESTERN FLANK
OF THE NOVOSIBIRSK – CHUKOTKA THRUST ZONE**

Anatoly Obolkin¹, Alexander Obolkin², Mariya Sleptsova¹

¹ Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, 2, Petrovsky str., Yakutsk, 677980, Russia

² Surgutneftegaz PJSC, 36, Ordzhonikidze str., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. The results of a seismostratigraphic analysis of the western part of the Novosibirsk-Chukchi thrust zone in the eastern part of the Laptev Sea are presented. Seismic facies complexes identified with the structures of the thrust zone have been identified. It is shown that the structures of the western closure of the Novosibirsk-Chukchi thrust zone began to form in the lower part of the sedimentary cover, in the Late Jurassic, belong to the thrust type.

1. Введение

В Северо-Восточной части Республики Саха (Якутия) перспективными на углеводородное сырье являются шельфы морей Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского. Перспективные территории в данных пределах оцениваются как потенциально нефтегазоносные с достаточно высоким прогнозным углеводородным потенциалом. В статье приведены результаты сейсмостратиграфического анализа западной части Новосибирско-Чукотской надвиговой зоны в восточной части моря Лаптевых. Выявлены сейсмофациальные комплексы, отождествляемые со структурами надвиговой зоны.

2. Основной раздел

Материалы изучения данных морской сейсморазведки показали, что на шельфах северо-восточных морей одними из наиболее информативных являются сейсмические профили СВКНИИ ДВО РАН, выполненные по рекогносцировочной сети профилей через моря Лаптевых, Восточно – Сибирское и Чукотское [1, 2]. Эти профили, наряду с другими сейсмическими материалами, использованы для сейсмостратиграфического анализа восточной части моря Лаптевых, где рассмотрено строение западного замыкания Новосибирско-Чукотской надвиговой зоны (НЧНЗ) (Рисунки 1, 2).

Отсутствие глубокого морского бурения в российском сегменте Северного Ледовитого океана (СЛО) и особенности структурно-тектонического строения переходной зоны континент-океан, привели к различным взглядам на стратификацию одних и тех же сейсмических отраженных горизонтов нижней части разреза и, как следствие, на историю геологического развития. По результатам работ ряда научных организаций опубликованы обобщающие исследования с целью выработки единой привязки сейсмических отраженных волн, выявленных в ходе производственных работ на шельфе и побережье [3–8]. Как показано в ранних исследованиях института по этой тематике, А.Ф. Сафроновым был принят вариант, близкий привязке сейсмических отражающих горизонтов (ОГ) по Б.И. Киму [3].

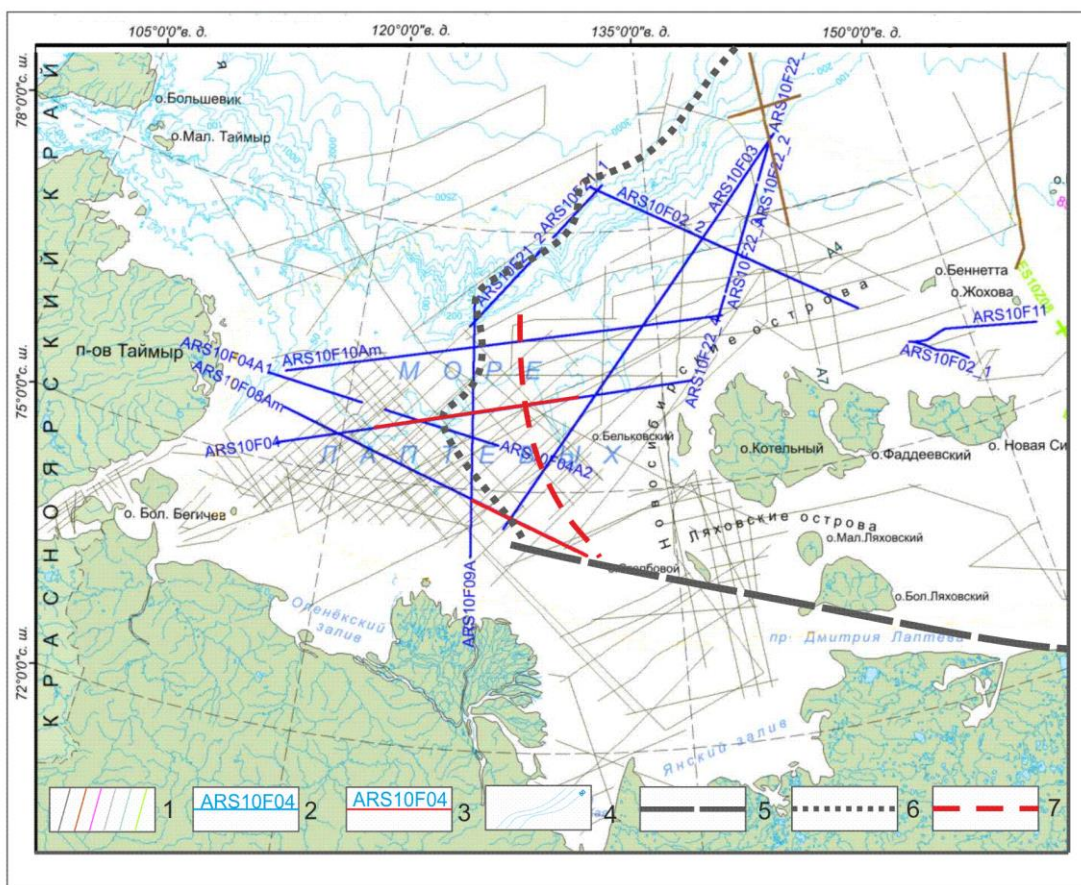


Рисунок 1 – Фрагмент из схем геофизической изученности Восточно-Арктического региона с изменениями, дополнениями.

Условные обозначения: 1 – сейсмические профили научно-производственных организаций; 2 – сейсмические профили СВКНИИ ДВО РАН; 3 – прилагаемые разрезы (рисунки 3, 4); 4 – изобата, м; 5 – предполагаемая южная граница Южно-Анюйской сутурной зоны; 6 – западная граница распространения Новосибирско-Чукотской надвиговой зоны; 7 – Лазоревский глубинный разлом

В целом, по опубликованным результатам исследований морской сейсморазведки сейсмический разрез изучен от нижней коры до четвертичных отложений [1–6, 8, 9]. На рисунках приведена индексация сейсмических горизонтов и корреляция отражающих горизонтов по материалам СВКНИИ ДВО РАН (Рисунки 2, 3) [2]. По этим данным отражающий горизонт ARS-6 приурочен к кровле карбон-юрского подкомплекса, несогласия ARS-5 и ARS-4 разделяют осадочный чехол на карбон-нижнемеловой, верхнемеловой и кайнозойский комплексы. ARS-3 приурочен к кровле палеоцен-эоценового, ARS-2 – олигоценевого, ARS-1 – нижне-среднемиоценового подкомплексов [2]. Особенности сейсмогеологических характеристик Анабаро-Оленекской структурной зоны, шельфов морей Лаптевых и Восточно-Сибирского и результаты изучения Тастахского прогиба авторами тезисов рассмотрены в публикациях [9, 10].

Сейсмокомплексы между отражающими горизонтами К и Фа отражают присутствие в сейсмическом волновом поле антиклинальных структур типа подошвенного вдвига, залегающих несогласно по отношению к вышележащим и нижележащим толщам. Нижележащая толща, по поверхности которой формируются отражающий горизонт К, на наш взгляд соответствует образованиям фундамента. Эта толща прослежена на большей части Восточно-Сибирского и Чукотского морей и является detachментом для надвиговой зоны Южно-Анюйской сутуры [7]. Судя по сейсмофациям склонов антиклиналей и индексацией отражающих горизонтов, показанных на рисунках, начало их формирования произошло в позднеюрское время. В дальнейшем формирование Янского горста продолжилось в позднем

мелу. Вал Минина имеет более выраженную внутреннюю структуру, чем соседние структуры А, Б и более поздний, среднепалеогеновый возраст завершения формирования. Названные структуры разделены дизъюнктивами неоген-четвертичного возраста.

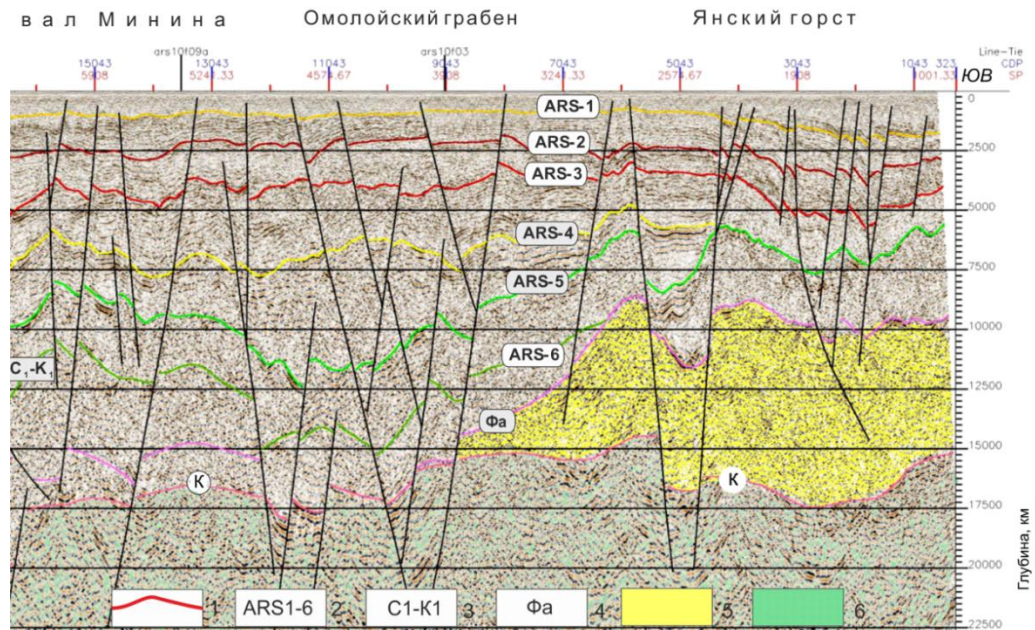


Рисунок 2 – Глубинный сейсмогеологический разрез восточной части моря Лаптевых по профилю ARS10F08Am [по 1, 2 с дополнениями].

Условные обозначения: 1 – отражающие горизонты; 2 – индексы отражающих горизонтов; 3 – геологические индексы; 4 – акустический фундамент; 5 – локальная антиклиналь; 6 – породы фундамента

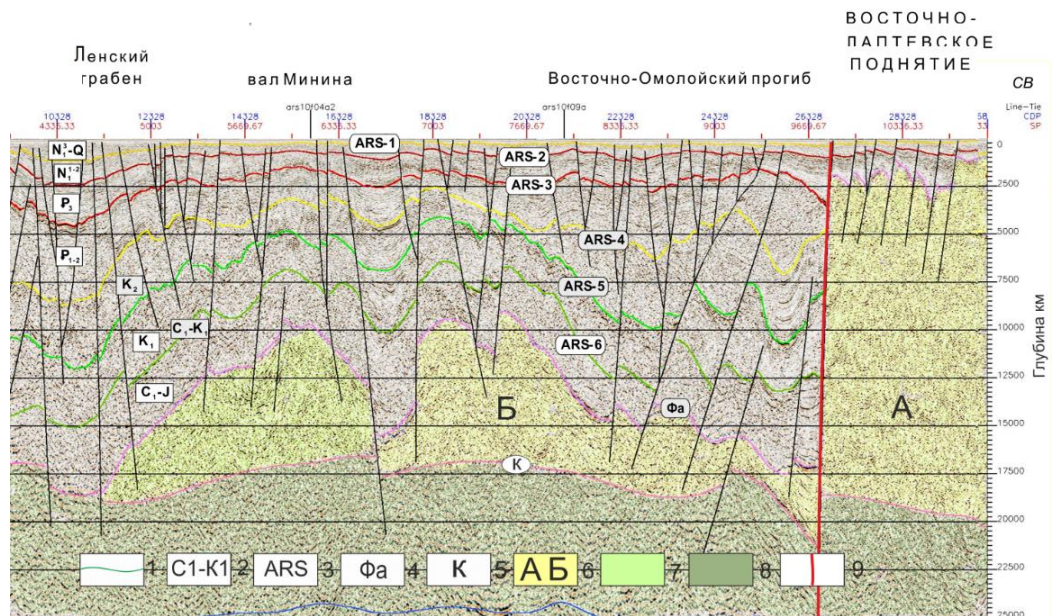


Рисунок 3 – Глубинный сейсмогеологический разрез восточной части моря Лаптевых по профилю ARS10F04 [по 1 с дополнениями].

Условные обозначения: 1 – отражающие горизонты; 2 – индексы отражающих горизонтов; 3 – геологические индексы; 4 – акустический фундамент; 5 – отражающий горизонт К; 6 – А – Новосибирско-Чукотская надвиговая зона, Б – локальная антиклинальная структура Новосибирско-Чукотской надвиговой зоны; 7 – локальная антиклиналь; 8 – фундамент; 9 – Лазоревский глубинный разлом

3. Выводы

Восточная структура вала Минина, в отличие от западной ее части, идентична по внутренней структуре и времени завершения формирования Янскому горсту и Новосибирско-Чукотской надвиговой зоне и является ее западным замыканием. В последующем, в четвертичное время, вся территория испытала масштабные горизонтально-сдвиговые дислокации. Названные структуры в плане существенно сдвинуты относительно друг друга. Лазаревская дислокация является детачментом для Новосибирско-Чукотской надвиговой зоны. На начальной стадии в поздней юре продвижение западной части НЧНЗ происходило по схеме подошвенного вдвига. Возобновление формирования Янского горста продолжилось и закончилась в позднем мелу.

4. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках Госзадания Министерства науки и высшего образования РФ № 122011100158-1 с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН в рамках гранта №13.ЦКП.21.0016.

Авторы выражают искреннюю признательность авторам отчета СВКНИИ ДВО РАН, материалы которого использованы в работе.

5. Литература:

- [1] Petrovskaya, N.A., Savishkina, M.A., Gorokhova, N.N. Study of the deep structure and geodynamic evolution of the seas of the Eastern Arctic shelf. Research report. SVKNII FEB RAS. Magadan, 2013. Rosgeolfond, N. 512284. (In Russian)
- [2] Petrovskaya, N.A., Savishkina, M.A. Comparison of seismic complexes and major disagreements in the sedimentary cover of the shelf of the Eastern Arctic // Oil and gas Geology. Theory and practice, 2014, vol. 9, no 3. (In Russian)
- [3] Kim, B.I., Evdokimova, N.K., Suprunenko, O.I., Yashin, D.S. Oil and geological zoning of the shelf of the Eastern Arctic seas of Russia and the prospects of their oil and gas potential // Geology of Oil and Gas, 2007, no 1, pp. 49-59. (In Russian)
- [4] Shkarubo, S.I., Zavarzina, G.A. Stratigraphy and characteristics of seismic complexes of the sedimentary shelf cover of the western part of the Laptev Sea // Oil and gas geology, theory and practice, 2011, vol.6, no 2. (In Russian)
- [5] Safronov, A.F. Model of the structure of the passive continental margin of the Laptev Sea // Gornye Vedomosti, 2011, no 6, pp. 78–81. (In Russian)
- [6] Kirillova, T.A., Chelyshev, S.V., Kuzmichev, T.L. Study of the geological structure and assessment of oil and gas potential of sedimentary basins of the continental margin of the East Siberian Sea., Murmansk: JSC MAGE, 2013, Rosgeolfond, N 510990.
- [7] Sokolov, S.D., Tuchkova, M.I., Ganelin, A.V. et al. Tectonics of the South Anyui suture (Northeast Asia) // Geotectonics, 2015, no 1, pp. 5–30.
- [8] State Geological map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). Laptevo-Sibiromorskaya series. Sheet S-53.54 – O. Stolbovoy, Lyakhovsky Islands. Explanatory note. St. Petersburg: VSEGEI Publishing House, 2016, pp 142-144. (In Russian)
- [9] Obolkin, A.P., Sleptsova, M.I. Features of seismogeological characteristics of the Anabaro-Olenek structural zone, shelves of the Laptev Sea and the East Siberian Sea // Successes of modern natural science, 2023, no 9, pp. 54–62. (In Russian)
- [10] Obolkin, A.P., Sitnikov, V.S., Sleptsova, M.I., Sevostyanova, R.F. Studying the possible anifestation of the South Anyui suture in the seismic wave field at the base of the Tastakh trough in the north-east of Yakutia // Geology and mineral resources, 2022, no 1, pp. 57–62. (In Russian)

**МЕТАВУЛКАНИТЫ ДЯГДАГЛЕЙСКОЙ ТОЛЩИ БУРЕЙНСКОГО
КОНТИНЕНТАЛЬНОГО МАССИВА (ЦЕНТРАЛЬНО-АЗИАТСКИЙ
СКЛАДЧАТЫЙ ПОЯС): РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОХИМИЧЕСКИХ И Sm-Nd
ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Роман Овчинников¹, Андрей Сорокин¹, Екатерина Сальникова², Виктор Ковач²

1 ФГБУН «Институт геологии и природопользования ДВО РАН», 675000, Россия,

г. Благовещенск, пер. Релочный, 1

2 ФГБУН «Институт геологии и геохронологии докембрия РАН», 199034, Россия,

г. Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2

**METAVOLCANIC ROCKS OF THE DJAGDAGLE FORMATION OF THE
BUREYA CONTINENTAL MASSIF (CENTRAL ASIAN OROGENIC BELT):
RESULTS OF GEOCHEMICAL AND Sm-Nd ISOTOPIC-GEOCHEMICAL STUDIES**

Roman Ovchinnikov¹, Andrey Sorokin¹, Ekaterina Sal'nikova², Victor Kovach²

1 Institute of Geology and Nature Management FEB RAS, Relochny Lane, 1, Blagoveshchensk,
675000, Russia

2 Institute of Precambrian Geology and Geochronology of the RAS, Makarova emb., 2, St. Petersburg,
199034, Russia

Abstract. The paper presents the results of geochemical and Sm–Nd isotopic-geochemical studies of metavolcanic rocks of the Djagdagle formation of the northwestern part of the Bureya continental massif. As a result of reconstruction of the primary composition of the metavolcanic rocks, the correspondence of their protoliths to the pantelleritic, comenditic rhyolites is shown. Nd-features of metavolcanic rocks of the Djagdagle formation indicate the melting of rocks of continental crust with Paleoproterozoic model ages during the formation of their initial melts. Geochemical features, close spatial position with Mongol–Okhotsk orogenic belt allow us to link the formation of initial melts of metavolcanic rocks of the Djagdagle formation with within-plate magmatism in the rear zone of subduction of the Mongol–Okhotsk Ocean beneath the northern (in modern coordinates) margin of the Bureya continental massif.

1. Введение

Комплексное изучение магматических и метамагматических комплексов континентальных массивов Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП) является одним из приоритетных направлений исследований в рамках разработки интегрированной геодинамической модели формирования этого крупнейшего подвижного пояса Земли.

Буреинский континентальный массив относится к числу наиболее крупных континентальных массивов восточной части ЦАСП, и обычно рассматривается в качестве составной части Бурей-Цзямуси-Ханкайского супертеррейна [1]. Наименее изученными элементами в строении данного массива, являются условно раннедокембрийские магматические и метаморфические комплексы его северо-западной части. В связи с этим, мы выполнили геохимические и Sm-Nd изотопно-геохимические исследования метавулканитов дягдаглейской толщи в бассейне ручья Дягдагле, относящихся к числу ключевых элементов в геологическом строении Буреинского континентального массива [2]

2. Аналитические методики

Исследование химического состава пород выполнено с использованием рентгенофлуоресцентного метода (основные породообразующие компоненты, Zr) в Институте геологии и природопользования ДВО РАН (г. Благовещенск) и с помощью метода ICP-MS (Li,

Ga, Rb, Sr, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y, Nb, Ta, Th, U, Pb, Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn) в Институте геохимии СО РАН (г. Иркутск).

Гомогенизация порошковых проб для РФА выполнена путем сплавления со смесью метабората и тетрабората лития в муфельной печи при температуре 1050–1100°C. Величина интенсивности аналитических линий скорректирована на фон, эффекты поглощения и вторичной флуоресценции. Измерения проводились на рентгеновском спектрометре Pioneer 4S.

Химическая подготовка проб для ICP-MS метода проводилась путем сплавления образцов с безводным метаборатом лития в стеклоуглеродных тиглях при температуре 1150°C в высокочастотной индукционной печи ВЧГ-4, с последующим разложением плавня смесью перегнанных кислот HF и HNO₃ и отгонкой SiF₄. Измерения проводились на ICP/HRMS масс-спектрометре ELEMENT-2. Относительная погрешность определения содержаний главных и малых элементов составила 3–10%.

Sm–Nd изотопно-геохимические исследования выполнены в Институте геологии и геохронологии докембрия РАН (г. Санкт-Петербург). Подробное описание методики исследований приведено в статье [3].

3. Результаты петрографических и геохимических исследований

Метавулканыты, отобранные в береговых обнажениях ручья Дягдагле, обладают серым, с зеленоватым оттенком, цветом и порфировой структурой. Вкрапленники представлены кварцем, плагиоклазом, калиевым полевым шпатом и реже биотитом. Основная масса сложена преимущественно кварцем. Акцессорные минералы представлены цирконом и оксидами железа.

На диаграммах SiO₂–(Zr/TiO₂)×0.0001 и SiO₂–Nb/Y [4], основанных на соотношении немобильных при метаморфизме элементов, и широко используемых для реконструкции состава первичных пород, составы метавулканытов дягдаглейской толщи занимают поля соответствующие риолитам и кислым породам семейства пантеллеритов-комендитов. По соотношению Zr–Y и Th–Co рассматриваемые метавулканыты отвечают породам известково-щелочной и высококалийевой известково-щелочной серий. Они обладают метаглиноземистым (ASI=0.87–0.92) и (Fe₂O₃*/(Fe₂O₃*+MgO)=0.82–0.86) железистым составом.

Метавулканыты дягдаглейской толщи характеризуются слабо- и умеренно-фракционированным распределением РЗЭ ([La/Yb]_n = 1.30–15.22), с обогащением легкими РЗЭ ([La/Sm]_n = 1.78–4.44), и слабо фракционированным распределением тяжелых РЗЭ ([Gd/Yb]_n = 0.52–2.25), с отчетливо выраженной отрицательной европиевой аномалией Eu/Eu* = 0.09–0.28. На графиках распределения нормированных к примитивной мантии содержаний микроэлементов отчетливо выражены отрицательные аномалии Nb, Sr, Ti и положительные аномалии Th, Ta, Pb, Nd, Gd.

4. Результаты Sm–Nd изотопно-геохимических исследований

В результате Sm–Nd изотопно-геохимических исследований установлено, что метавулканыты дягдаглейской толщи характеризуются глубоко отрицательным значением ε_{Nd(0)} = -12.9 и палеопротерозойским модельным возрастом t_{Nd(DM)} = 1.8 млрд лет.

5. Интерпретация полученных результатов и выводы

Nd-изотопные параметры метавулканытов дягдаглейской толщи позволяют предполагать участие коровых источников палеопротерозойского возраста в процессе формирования родоначальных расплавов рассматриваемых метавулканытов. При этом палеопротерозойских и более древних комплексов в строении Буреинского массива на данный момент не установлено. Принимая во внимание значительное присутствие цирконов мезопротерозойского возраста с Hf-изотопными параметрами t_{Hf(C)} = 1.6–2.0 млрд лет, в раннепалеозойских осадочных породах Мельгинского прогиба [5], мы считаем, что в качестве субстрата для протолита

рассматриваемых метавулканитов, могли выступать мезопротерозойские породы с палеопротерозойскими Nd-модельными возрастами.

Для реконструкции геодинамических обстановок формирования исходных расплавов метавулканитов дягдаглейской толщи, прежде всего, необходимо обратиться к геохимическим данным. Рассматриваемые метавулканиты характеризуются высокими содержаниями Nb (15.9–23.3 мкг/г), Ga (19.8–22.0 мкг/г), Th (16.2–24.2 мкг/г), при низких содержаниях Sr (7.41–30.9 мкг/г). Также для них характерны высокие значения железистости ($\text{Fe}_2\text{O}_3^*/(\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MgO}) = 0.82\text{--}0.86$). Данные геохимические особенности характерны для гранитоидов и вулканитов А-типа [6]. На тектонических диаграммах Пирса Rb–(Y+Nb), Nb–Y [7] фигуративные точки составов метавулканитов дягдаглейской толщи занимают переходное положение между полями составов магматических пород, сформировавшихся в геодинамических обстановках островных дуг, син- и постколлизийных условиях.

Выявленные геохимические особенности метавулканитов дягдаглейской толщи, в совокупности с их близким пространственным положением с Монголо-Охотским складчатым поясом, позволяют связывать формирование их протолита с внутриплитным магматизмом в тыловой зоне субдукции океанической плиты Монголо-Охотского океана под северную, в нынешних координатах, окраину Буреинского континентального массива.

Резюмируя вышеприведенные данные, можно сделать следующие выводы:

- 1) Nd-изотопные параметры метавулканитов дягдаглейской толщи свидетельствуют о плавлении преимущественно коровых источников с палеопротерозойскими модельными возрастами в процессе формирования их родоначальных расплавов;
- 2) Формирование протолита метавулканитов дягдаглейской толщи связано с внутриплитным магматизмом в тыловой зоне субдукции океанической плиты Монголо-Охотского океана под северную, в нынешних координатах, окраину Буреинского континентального массива.

4. Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-77-00001, <https://rscf.ru/project/22-77-00001/>

5. Литература:

- [1] Parfenov, L.M., Berzin, N.A., Khanchuk, A.I., Bodarch, G., Belichenko, V.G., Bulgatov, A.N., Dril', S.I., Kirillova, G.L., Kuz'min, M.I., Nokleberg, W.J., Prokopiev, A.V., Timofeev, V.F., Tomurtogoo, O., Yan, H. Model of the formation of the orogenic belts of Central and Northeastern Asia // *Tikhookean. Geol.* – 2023. – Vol. 22. – No 6. – P. 7-41 (in Russian)
- [2] Petruk, N.N. and Volkova, Yu. R. State Geological Map of the Russian Federation. Scale of 1: 1 000 000. Third Generation. Far East Series. Sheet M-52 (Blagoveshchensk). – VSEGEI, St. Petersburg, 2012 (in Russian).
- [3] Sorokin, A.A., Ovchinnikov, R.O., Xu, W.L., Kovach, V.P., Yang, H., Kotov, A.B., Ponomarchuk, V.A., Travin, A.V., Plotkina, Yu.V. Ages and nature of the protolith of the Tulovchikha metamorphic complex in the Bureya Massif, Central Asian Orogenic Belt, Russia: evidence from U–Th–Pb, Lu–Hf, Sm–Nd, and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ data // *Lithos.* – 2019. – Vol. 332–333. – P. 340–354.
- [4] Winchester, J. and Floyd, P. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements // *Chem. Geol.* – 1977. – Vol. 20. – P. 325–343.
- [5] Ovchinnikov, R.O., Sorokin, A.A., Xu, W., Yang, H., Kovach, V.P., Kotov, A.B., Plotkina, Yu.V. Provenance and tectonic implications of Cambrian sedimentary rocks in the Bureya Massif, Central Asian Orogenic Belt, Russia // *J. Asian Earth Sci.* – 2019. – Vol. 172. – P. 393–408.
- [6] Whalen, J.B., Currie, K.L., Chappel, B.W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis // *Contrib. Mineral. Petrol.* – 1987. – Vol. 95. – Iss. 4. – P. 407–419.
- [7] Pearce, J.A., Harris, N.B.W., Tindle, A.G. Trace element discrimination of granitic rocks // *J. Petrol.* – 1984. – Vol. 25. – P. 956–983.

**ПЕТРОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОРОД И
ПОТЕНЦИАЛЬНОЕ CU-NI СУЛЬФИДНОЕ ОРУДЕНЕНИЕ В
ПОЗДНЕДОКЕМБРИЙСКИХ БАЗИТАХ АНАБАРСКОГО ЩИТА**

Александр Округин¹, Ричард Эрнст², Михаил Томшин¹

1 ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

2 Department of Earth Sciences, Carleton University, Ottawa, Ontario, K1S 5B6, Canada

**PETROLOGICAL-GEOCHEMICAL FEATURES OF ROCKS AND POTENTIAL
CU-NI SULPHIDE MINERALIZATION IN LATE PRECAMBRIAN MAFIC DYKE
SWARM OF THE ANABAR SHIELD**

Alexander Okrugin¹, Richard Ernst², Mikhail Tomshin¹

1 Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

2 Department of Earth Sciences, Carleton University, Ottawa, Ontario, K1S 5B6, Canada

Abstract. Late Precambrian mafic rocks form dike swarms of various directions up to 200-300 km long and several tens of km wide on the Anabar Shield. According to U-Pb dating data, three main directions of dike belts of different ages were identified: the Chieress swarm of a northwestern direction with an age of 1385 Ma; Kuonamka swarm of sublatitudinal dikes – 1500 Ma and north-northwestern dikes of the East Anabar swarm – 1774-1750 Ma. In terms of geochemical features, the Anabar Precambrian mafic rocks correspond to intraplate basalts. In the dolerites of the Kengede and East Anabar belts, manifestations with disseminated veinlet and nodular sulfide Cu-Ni mineralization were established. The main minerals in sulfide ore occurrences are pyrrhotite and chalcopyrite; pentlandite, siegenite, gersdorffite, galena, sphalerite and other small unidentified phases are less common. Also found are segregations consisting of close intergrowths of many melted amoeboid titanomagnetite individuals, which are associated with drop-shaped pyrrhotite and prismatic apatite crystals. Rounded formations of sulfide nodules indicate their segregation nature, when, already at the early magmatic stage, a sulfide melt enriched in Cu and Ni is separated from the sulfur-saturated mafic magma. The presence in mafic rocks of apatite-sulfide-magnetite segregations with melted rounded forms of sulfides and magnetite also indicates the segregation nature of the separation of highly phosphate sulfide-oxide liquids. Thus, with the differentiation of large volumes of Precambrian mafic melts in deep intermediate chambers, magmatic PGE-Au-Cu-Ni sulfide and phosphate-iron phosphorite deposits can be formed. Such deposits are one of the potential sources of areal complex placers in the Leno-Anabar province.

1. Введение

Северо-восточная часть Сибирской платформы (СП) давно известна своими площадными россыпными алмазоносными месторождениями, занимающими огромные территории Лено-Анабарского междуречья закрытой фанерозойским чехлом платформы, в которых алмазы постоянно ассоциируют с золотом и платиной, коренные источники которых до сих пор не установлены. Материнскими породами для алмаза и минералов платиновых металлов (МПМ) вполне очевидно предполагаются мантийные базит-ультрабазитовые магматиты широко распространенные в данном регионе (Рисунок 1). Однако, отсутствие на северо-востоке СП четко установленных проявлений фанерозойского гранитоидного магматизма ставит под сомнение связи крупной фракции золота ближнего сноса с традиционными гранитоидными источниками. Поэтому мы предполагаем, что коренными источниками россыпей золота и платины могут быть не только комплексные магматогенные благородно-редкометалльные

руды, связанные с фанерозойскими сложными комплексами щелочно-ультраосновных пород и карбонатитов (ЩУК), подобных уникальным месторождениям Томторского и Гулинского массивов, но и с более древними комплексами позднедокембрийских базит-ультрабазитовых пород Анабарской антеклизы и Оленекского поднятия. Как известно, с комплексом докембрийских базит-ультрабазитовых пород связаны крупные сульфидные PGE-Cu-Ni месторождения: Садбери, Томпсон (Канадский щит), Мончегорское (Балтийский щит), Камбалда (Австралия) и др. Фанерозойская эпоха в целом бедна проявлением сульфидоносных магматических образований, за исключением Норильских месторождений – крупнейших среди подобных месторождений [1 и др.]. В связи с этим в данном сообщении мы рассматриваем возможные пути выявления критериев потенциальной рудоносности рифейских базитовых магматитов на основе анализа их геохимических особенностей и окисно-сульфидных рудных минерализаций.

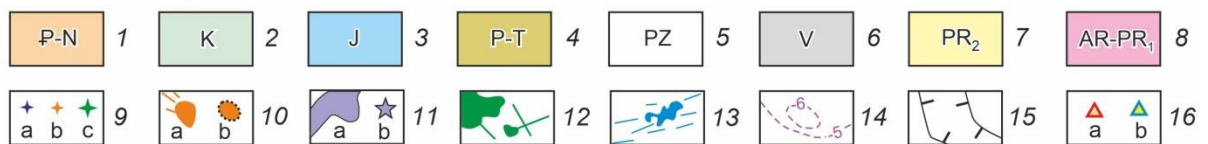
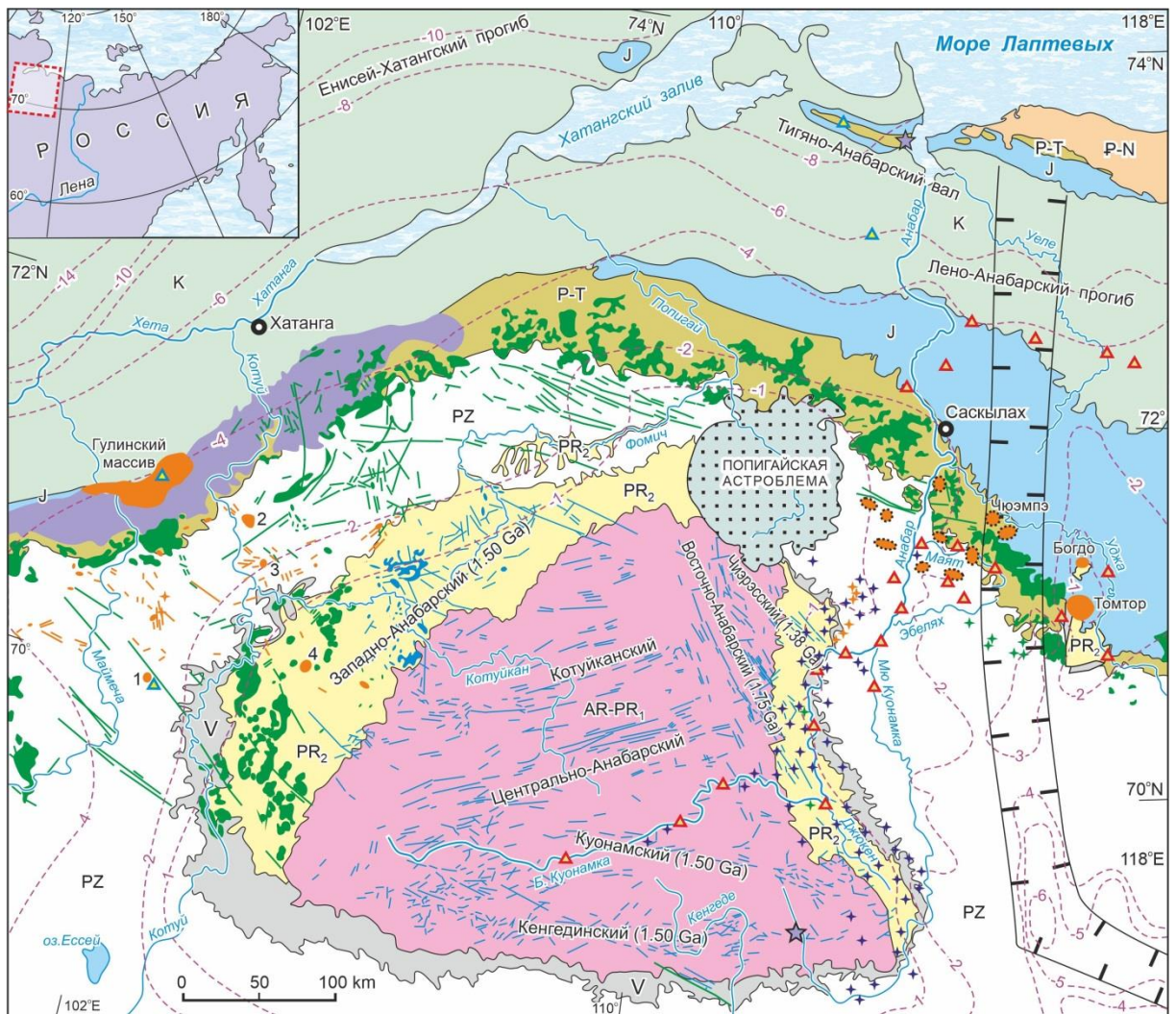


Рисунок 1 – Схема распространения базит-ультрабазитовых магматитов, сульфидных проявлений в базитах и золото-платиноносных россыпях на северо-востоке Сибирской платформы.

1 – палеоген-неогеновые осадки; 2 – меловые пески, алевриты и галечники; 3 – юрские конгломераты, песчаники, алевролиты; 4 – пермские и триасовые песчаники, алевролиты; 5 – палеозойские доломиты, известняки, мергели и песчаники; 6 – песчаники, гравелиты, конгломераты, алевролиты, аргиллиты, доломиты и известняки венда; 7 – верхнепротерозойские (рифейские) конгломераты, песчаники,

алевролиты, аргиллиты и доломиты; 8 – архей-нижнепротерозойские метаморфические комплексы; 9 – кимберлитовые (а), карбонатитовые (б) и базитовые трубки; 10 – интрузии и дайки щелочных и ультраосновных пород с карбонатитами: а – установленные (массивы Гули, Томтор, Богдо, Бор-Урх (1), Одихинча (2), Кугда (3), Маган (4) и др.), б – предполагаемые по геофизическим данным (Чюэмпе и др.); 11 – эффузивы базальтов и щелочных базальтоидов Маймеча-Котуйской провинции (а), пикритобазальты устья р. Анабар и дайка меймечитоподобных пород (б) в верховьях р. М. Куонамка; 12 – силлы и дайки Р-Т долеритов и трахидолеритов; 13 – позднедокембрийские дайковые пояса и их возраст (Куонамский (1.50 Ga) и т.д.); 14 – изогипсы поверхности кристаллического фундамента; 15 – границы палеорифтогенных структур; 16 – россыпи золота с Fe-Pt (а) и Ir-Os минералами (б). Схема построена на основе Геологической карты Сибирской платформы М 1:1500000, ВСЕГЕИ, 2000 и Геодинамической карты Якутии М 1:1500000, Якутск, 1994 с некоторыми изменениями и дополнениями авторов.

2. Геологическая и петрохимическая характеристика позднедокембрийских базитов Анабарского щита

В пределах Анабарского щита докембрийские базиты образуют протяженные дайковые рои длиной до 200-300 км и шириной до нескольких десятков км [2]. На основе прецизионных U-Pb датировок были выделены три основных направлений разновозрастных дайковых поясов [3], представляющие плюмовые системы крупных магматических провинций (КМП): Чиэрэсский рой северо-западного направления с возрастом 1385 млн лет; Куонамский рой субширотных даек с возрастом 1500 млн лет и север-северо-западные дайки Восточно-Анабарского роя Тимптонской КМП с возрастом 1774-1750 млн лет. По химическому составу докембрийские базиты Анабарского щита относятся толеитовым и субщелочным долеритам [4-5], но дифференциация расплавов в промежуточных очагах обуславливает более широкий диапазон изменения состава анабарских базитов в сторону базальтовых трахиандезитов и трахиандезитов [2, 6]. По геохимическим параметрам V – Ti долериты Куонамской КМП, в которую входят и дайки Кенгединского суброя, попадают в поля OFB-CFB-MORB и OIB-ALK (Рисунок 2 А), а на дискриминантной диаграмме Zr-Ti-Y (Рисунок 2 В) они приурочены к области внутриплитных базальтов.

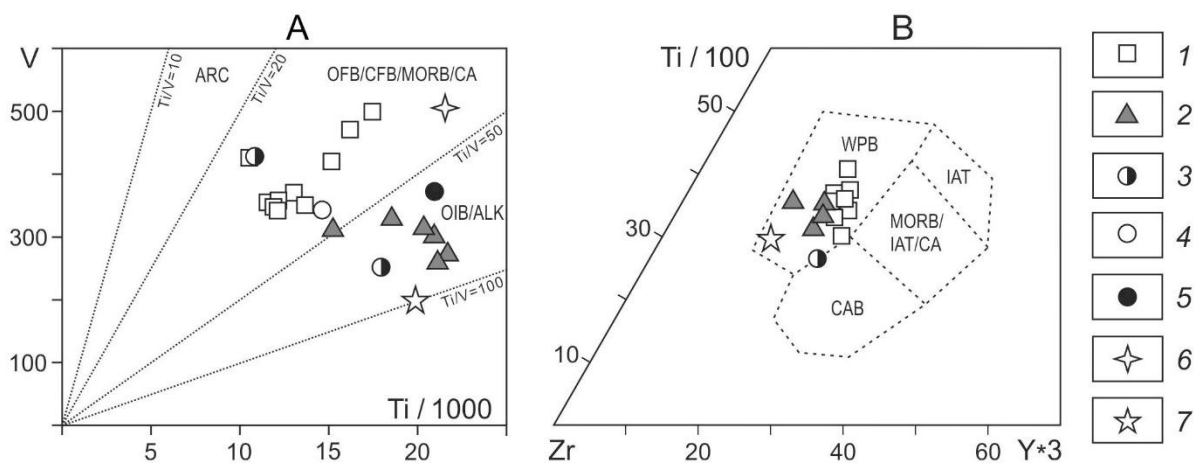


Рисунок 2 – Составы базитов Куонамской КМП на геохимических диаграммах:

А – диаграмма V – Ti по [7], ARC – толеиты дуг, OFB – океанические платобазальты, CFB – континентальные платобазальты, MORB – базальты срединно-океанических хребтов, CA – известковощелочные базальты, OIB – базальты океанических островов, ALK – щелочные базальты; **В** – дискриминантная диаграмма Zr-Ti-Y по [8], WPB – внутриплитные базальты, IAT – островодужные толеиты, CAB – известково-щелочные базальты. 1-2 – базиты первой (1) и второй (2) групп Куонамской КМП; 3 – дайки р. Кенгеде [6]; 4-6 – средневзвешенные составы даек Кенгединского пояса толеит-базитового (4) и субщелочного (5) составов, Буджурхайской дайки (6) по [5]; 7 – долериты с сульфидными нодулями, р. Большая Куонамка [9].

3. Медно-никелевое сульфидное рудопроявление в долеритах Кенгединского и Восточно-Анабарского роев

В долеритах Харапской и Будьурхайской даек в бассейне р. Кенгеде при проведении геологической съемки в 1966-1967 гг. были установлены зоны с вкрапленной сульфидной медно-никелевой минерализацией [4, 5]. Эти зоны прослеживаются на сотни метров в длину и имеют ширину 2-3 м, иногда до 5-6 м, а в локальных раздувах до 8-9 м, в которых заметно увеличивается размер сульфидов и их содержание, достигающее до 10-15 %. Крупные шпировые обособления сульфидов имеют неправильную, реже изометричную форму размером 15-20 мм. Основными минералами являются пирротин и халькопирит, реже встречаются пентландит кубанит, макиновит, виоларит, бравоит, миллерит, борнит, пирит и другие. Эти сульфидоносные такситовые диабазы р. Кенгеде М.С. Мащак [4] сопоставляет с аналогичными породами норильских интрузий.

В связи с этим интересны находки сульфидных нодулей из глыбы долеритов (Л-1388), найденной на террасе р. Большая Куонамка в ходе проведения АО «Алмазы Анабара» поисково-оценочных работ [9]. Долериты Л-1388 представлены среднезернистым породами офитовой структуры (Рисунок 3 А), состоящими в основном из плагиоклаза, клинопироксена и титаномагнетита, реже содержащими КПШ, амфибол, ромбический пироксен, апатит хлорит, цеолит, кварц, кальцит и ильменит.

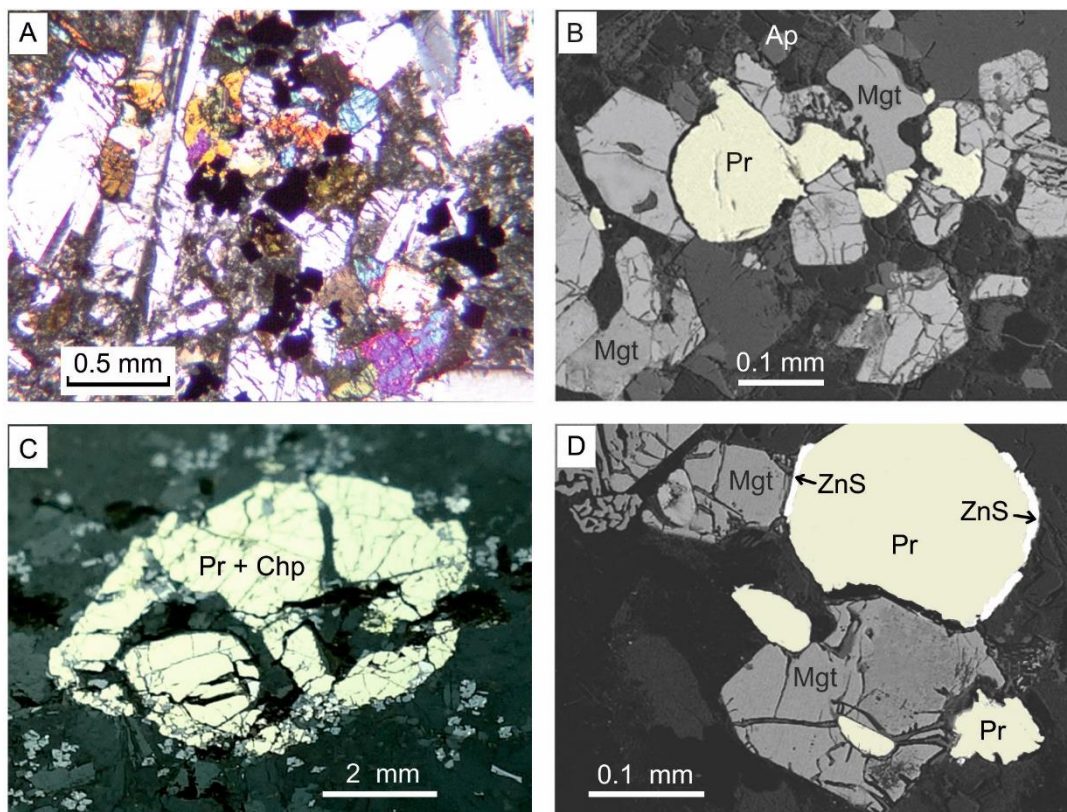


Рисунок 3 – Сульфидные минералы в долеритах (Л-1388) р. Большая Куонамка:

А – офитовая структура долеритов при скрещенных николях. Белые вкрапленники – плагиоклаз; окрашенные зерна – авгит; черные кристаллики – титаномагнетит; серая интерстиция – вторичные минералы; В – сегрегационный парагенезис титаномагнетита (Mgt), пирротина (Pr) и апатита (Ap); С – фото нодулярного выделения, состоящего из сращения пирротина и халькопирита (Chp); D – каплевидное обособление пирротина с каёмкой (белое) сфалерита (ZnS). В и D – снимки в обратно-рассеянных электронах на сканирующем микроскопе JSM-6480LV.

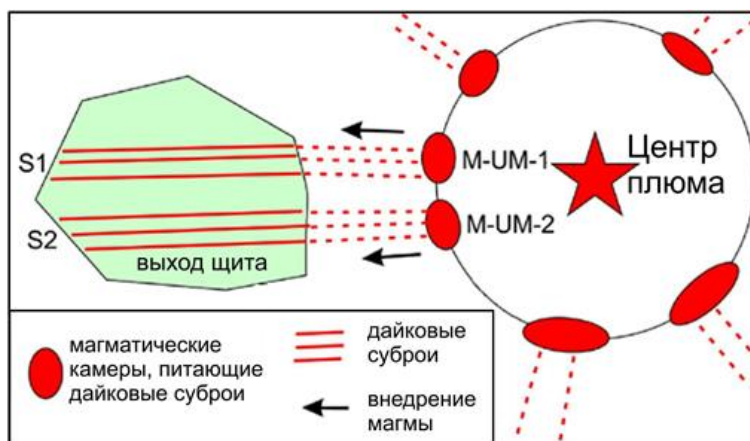
По химическому составу и особенностям порообразующих и второстепенных минералов, изученный долерит похож породам из Восточно-Анабарского дайкового пояса Основным

минералом в сульфидных желваках овальной формы размером до 8 мм (Рисунок 3 С) и мелких вкраплениях является пирротин, затем следует халькопирит, образующий тонкие каемки вокруг пирротина и проникающие извилистые прожилки. Вокруг желвака часто формируется скопления отдельных хорошо ограненных кристаллов до 0,5 мм или тесных срастаний многих оплавленных индивидов титаномагнетита, которые ассоциирует с пирротинном и апатитом (Рисунок 3 В). Остальные редкие минералы представлены зигенитом – $(\text{Co}, \text{Ni}, \text{Fe})_3\text{S}_4$, герсдорфитом NiAsS с высокими содержаниями Fe, Co и Sb, галенитом, сфалеритом (Рисунок 3 D) и другими фазами.

Округлые выделения сульфидных нодулей свидетельствуют об их ликвационной природе, когда уже на раннемагматической стадии от сера-насыщенной мафитовой магмы отделяется сульфидный расплав, обогащенный Cu и Ni. При такой силикат-сульфидной жидкостной несмесимости, многие рудные металлы, в особенности, благородные металлы перераспределяются в сульфидную часть, имеющую ионно-электронную структуру, в отличие от ионно-молекулярного силикатного расплава. При благоприятных условиях дифференциации больших объемов подобных ликватов могут формироваться богатые PGE-Au-Cu-Ni сульфидные руды. Наличие апатит-сульфидно-титаномагнетитовых сегрегаций с оплавленными округлыми формами сульфидов и магнетита также свидетельствует (по личному мнению Округина А.В.) о непопулярной среди исследователей ликвационной природе отделения высоко фосфатных сульфидно-окисных жидкостей, которые фиксируются экспериментальными исследованиями и известны в природе в форме магматогенных апатит-магнетитовых рудопроявлений.

Наличие двух узких роев даек, разделенных бедной дайками зоной шириной 50 км, может указывать на боковое внедрение этих роев от разных расслоенных интрузивов, расположенных вокруг общего центра плюма, формирующего КМП по модели [10] (Рисунок 4). Можно предположить, что S1 и S2 это суброи даек аналогичные Куонамскому и Кенгединскому дайковым роям, а MUM-1 и 2 представляют собой расслоенные интрузии вблизи центра плюма, которые, как предполагается, питают подземные магматические потоки. Хотя сульфидная минерализация в Анабарских докембрийских мафитовых поясах имеет ограниченное значение, но уже имеющиеся сведения о сульфидных Cu-Ni проявлениях могут быть полезной стратегией для оценки рудного потенциала их магматических источников и требует дальнейшего изучения.

Рисунок 4 – Боковое питание суброев даек (S1 и S2) от мафит-ультрамафитовых очагов (M-UM-1, 2) из области центра плюма по модели [10].



3. Выводы

Присутствие прожилково-вкрапленной и нодулярной медно-никелевой минерализации в долеритах докембрийских дайковых поясов Анабарского щита позволяет предположить возможные перспективы обнаружение магматогенного PGE-Au-Cu-Ni сульфидного оруденения, связанного с докембрийскими базитами, на территории Лено-Анабарской провинции. В докембрийских базитах существуют также признаки сегрегационного отделения апатит-магнетитовых парагенезисов, что может служить минералогическим критерием формирования фоскоритовых руд. Для реализации подобных месторождений нужны большие глубинные резервуары мафических магм, длительная дифференциация в которых может привести к концентрации больших запасов металлов. Такие первичные промежуточные

глубинные очаги могут находиться в пределах Лено-Анабарской провинции в виде докембрийских крупных расслоенных массивов, которые возможно выведены на доступный приповерхностный уровень в результате рифейско-фанерозойских тектонических перестроек Сибирской платформы. Подобные предполагаемые интрузивы, вероятно, локализованы за пределами Анабарского щита, т.к. в пределах выходов архейско-протерозойского кристаллического фундамента отсутствуют проявления фанерозойского магматизма, т.е. Анабарский щит, в отличие от Алданского щита, в это время оставался амагматической устойчивой структурой.

4. Благодарности

Авторы благодарны своим коллегам, принимавшим участие в полевых, лабораторных и аналитических исследованиях. Работа выполнена по государственному заданию ИГАБМ СО РАН – проекты НИР № 0381-2019-0003 и 0004.

5. Литература:

- [1] Genkin A.D., Distler V.V., Gladyshev G.D et al. Sulfide copper-nickel ores of the Norilsk deposits. Moscow: Nauka. 1981. 234 pp. (in Russian).
- [2] Okrugin A.V., Oleinikov B.V., Savvinov V.T., Tomshin M.D. Late Precambrian dyke swarms of the Anabar Massif, Siberian Platform, USSR. Mafic dykes and emplacement mechanisms. Balkema, Rotterdam. 1990. pp. 529-533.
- [3] Ernst R.E., Hamilton M.A., Söderlund U., Hanes J.A., Gladkochub D.P., Okrugin A.V., Kolotilina T., Mekhonoshin A.S., Bleeker W., LeCheminant A.N., Buchan K.L., Chamberlain K.R., Didenko A.N., 2016a. Southern Siberia and northern Laurentia: neighbours for a quarter of Earth's history. *Nature Geosciences*, 9 (6), 464-469. [https:// dx.doi.org/10.1038/NGEO2700](https://dx.doi.org/10.1038/NGEO2700)
- [4] Mashchak M.S. Sulfide copper-nickel ore occurrences in Proterozoic diabase dikes of the southern slope of the Anabar Shield // *Geologiya rudnyh mestorozhdenij*. 1969. 6. pp. 74–78. (in Russian).
- [5] Oleinikov B.V., Mashchak M.S., Kolodeznikov I.I., Kopylova A.G., Savvinov V.T., Tomshin M.D., Tulasynov B.N. Petrology and geochemistry of basites intrusions of the Siberian platform. Novosibirsk. Nauka. 1983. 208 pp. (in Russian).
- [6] Tomshin M.D., Söderlund U., Ernst R.E., Okrugin A.V. Kengede Mafic Dyke Swarm and Expansion of the 1.50 Ga Kuonamka Large Igneous Province of Northern Siberia // *Geodynamics & Tectonophysics*, 2023, 14 (4), 0707. doi:10.5800/GT-2023-14-4-0707
- [7] Shervais J.W. Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas // *Earth and Planetary Science Letters*. 1982. 59 (10), pp.101-118.
- [8] Pearce J.A., Cann J.R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses // *Earth and Planetary Science Letters*. 1973. 19, pp. 290-300.
- [9] Okrugin A.V., Zemnukhov A.L., Zhuravlev A.I. Copper-nickel sulfide mineral occurrence in dolerites of the eastern slope of the Anabar shield // *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2021, 26, (4), pp. 16–28. (in Russian).
- [10] Blanchard J.A., Ernst R.E., Samson C., 2017. Gravity and magnetic modelling of layered mafic-ultramafic intrusions in large igneous province plume centre regions; Case studies from the: 1.27 Ga Mackenzie, 1.38 Ga Kunene-Kibaran, 0.06 Ga Deccan and 0.13-0.08 Ga High Arctic events // *Canadian Journal of Earth Sciences*, 2017, 54, pp. 290-310.

СИСТЕМАТИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ДВУХ ФОРМ МИКРОФОССИЛИЙ ВЕНДА ЯКУТИИ

Ирина Охлопкова, Петр Колосов
ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

THE SYSTEMATIC POSITION OF TWO FORMS OF VENDIAN MICROFOSSILS IN YAKUTIA

Irina Okhlopko, Petr Kolosov
Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. It is necessary for scientific community to clarify the development of life in the early stages of evolution. In the south-east of the Siberian platform, new forms of microfossils have been discovered with the use of a scanning electron microscope in the Berezovsky trough, the Byuk formation of the Vendian. They are well preserved and contained in silicified columnar stromatolites. Some microfossils have been consistently identified as leaf-like siphon green algae, while others are classified as mycelial and yeast-mycelial yeast fungi. Yeast fungi that feed on organic substances parasitize the thalli of green algae. It is noted that our fundamental knowledge about the rich microcosm that existed before the “Cambrian explosion” of life on Earth has become more comprehensive.

1. Введение

Выяснение развития жизни на ранних этапах эволюции – актуальнейшая научная проблема. Обнаружение и установление систематического положения редких, биологически интерпретируемых и систематически идентифицируемых остатков эдиакарских микроорганизмов может способствовать выявлению особенностей эволюции водорослей и грибов. В данной работе мы приводим материал о двух новых отлично сохранившихся микроорганизмах в бюкской свите эдиакария (юдомия) Сибирской платформы (Рисунок 1). В микропалеонтологии докембрия методика исследований включает обязательное обоснование: во-первых, возраста вмещающих фоссилии отложений; во-вторых, инсцитности обнаруженного объекта; в-третьих, биологической природы изучаемого объекта. Изучение микрофоссилий проводилось в аншлифах на СЭМ: JEOL JSM-6480LV. Исследования выполнены по государственному заданию Института геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения РАН, проект FUFG-2024-0005.

2. Материал и его обсуждение

Характеризуемые далее микрофоссилии обнаружены в образцах из бюкской свиты, эдиакарский возраст которой обоснован ранее [1, 2]. Они в строматолите, находятся *in situ*. Доказательством этого служит то, что микрофоссилия прикреплена к вмещающей породе – субстрату (Рисунок 3А, стрелка 1). Микрофоссилии обнаружены в аншлифах тех же столбчатой формы окремненных строматолитов (Рисунок 2), откуда происходят ранее выделенные мицелиальные и дрожжево-мицелиальные водные грибы и зеленые водоросли [1, 2, 3]. Одни микрофоссилии удалось интерпретировать как водоросли, а другие – как грибы. Сначала обсудим отдельно микрофоссилии, которые мы биологически интерпретировали как водоросли, а затем – обосновываемые как грибы. После рассмотрим их взаимоотношения. У формы, приводимой на рисунке 3 А, стрелка 2, не наблюдается характерный для грибов “верхушечный хвостик”, свидетельствующий об апикальном росте. Следовательно, она не относится к грибам.

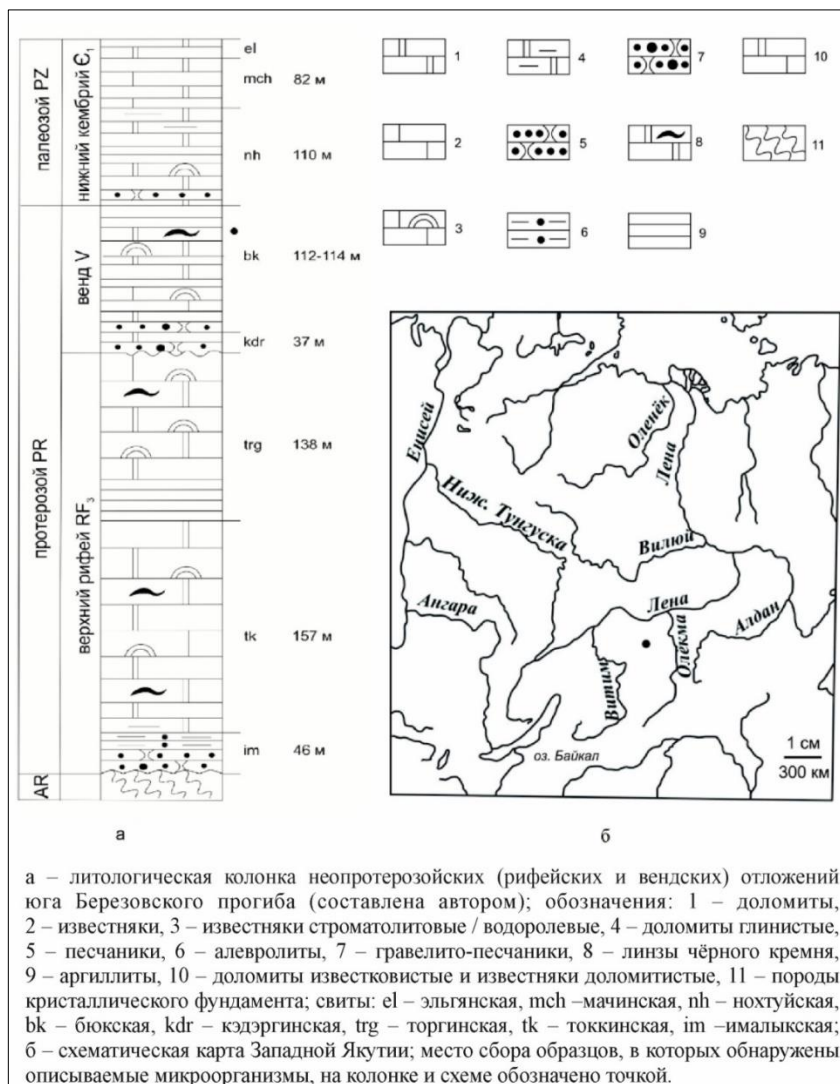


Рисунок 1 – Схематическая карта части Восточной Сибири, на которой отмечено место сбора изученных образцов строматолитов, и литологическая колонка неопротерозойских отложений юга Березовского прогиба.



Рисунок 2 – Строматолит столбчатой формы из бюкской свиты эдиакария.

Современные эвгленовые, динофитовые и золотистые водоросли имеют разнообразную форму тела. Так, некоторые таксоны золотистых водорослей, например, Chrysophyta имеют форму яйцевидную, эллипсоидную, веретеновидную, цилиндрическую, шаровидную, грушевидную, булавовидную, кубическую и т. д. Крптофитовые и рафидофитовые водоросли имеют яйцевидную, обратнойяцевидную, эллипсоидную и т. д. форму тела. А у диатомей она исключительно коккоидная. Желтозеленые водоросли имеют форму тела от шаровидной и полушаровидной до шаровидно-ограненной, эллипсоидной, яйцевидной, грушевидной, клиновидной и т. д. [4].

Рассматриваемые микрофоссилии не имеют форму тела, характерную вышеперечисленным и многим другим отделам водорослей. По прикрепленной к субстрату листовидной форме таллома и по отсутствию перегородок таллома они более всего похожи на зеленые водоросли класса сифоновые водоросли – siphonophyceae, порядка бриопсидовые – Bryopsidales. Современные морские сифоновые водоросли имеют разнообразный внешний облик, тело, сложно расчлененное на стебле-, листо- и корневищеподобные части [4]. В отличие от них, выявленные фоссилизированные водоросли, имеют более простое, примитивное строение таллома. Они немного похожи на род род Bryopsis – бриопсис из семейства Bryopsidaceae – бриопсиевые, слоевище которого состоит из сильно разветвленной трубчатой клетки. Род Bryopsis имеет вид разветвленного кустика с более или менее отчетливой главной осью [5].

По итогам приведенного выше обсуждения микрофоссилий считаем, что в строматолитах столбчатой формы Березовского прогиба обнаружены листовидной формы сифоновые зеленые водоросли (Рисунок 3).

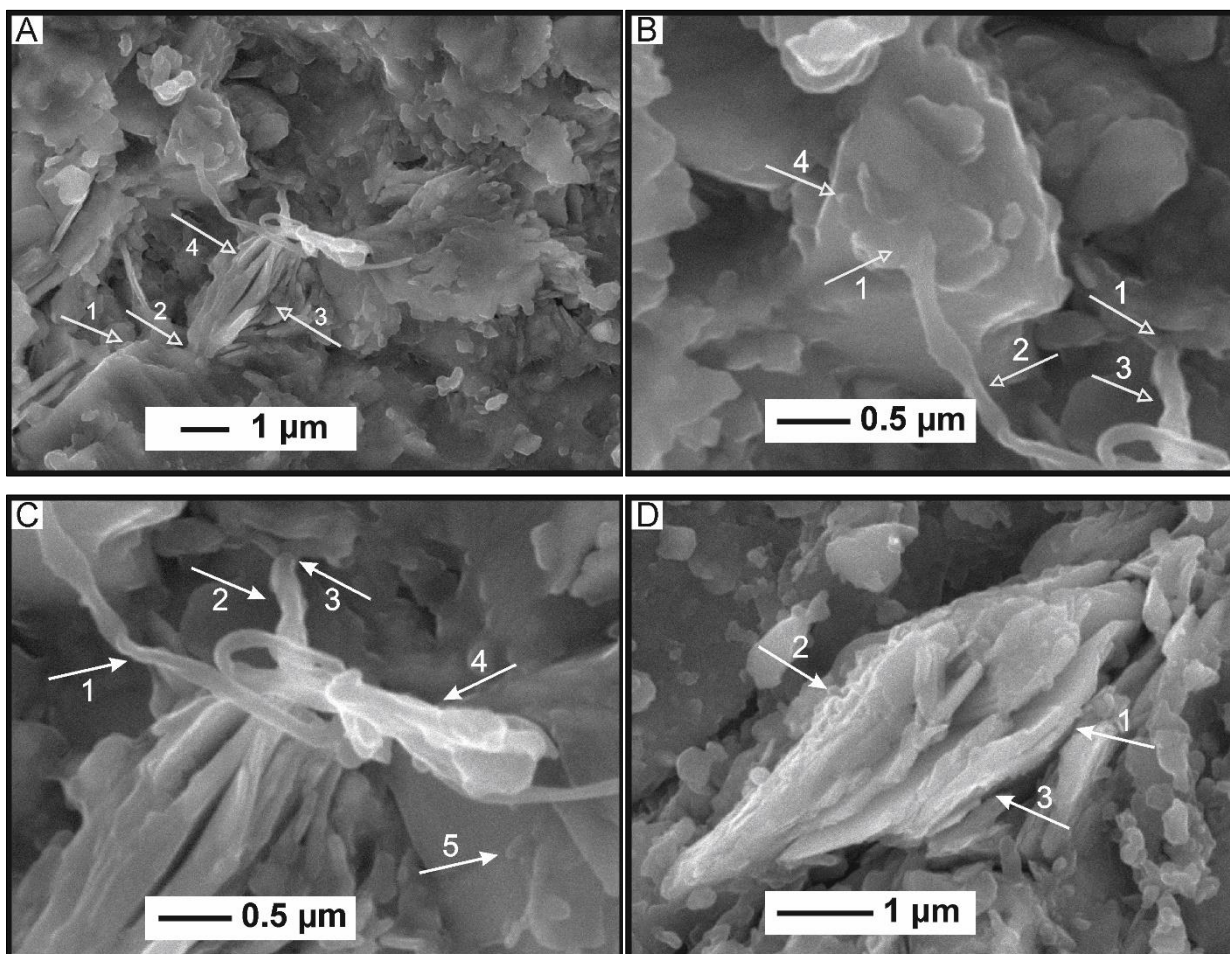


Рисунок 3 – А – общий вид: 1 – субстрат; 2 – место прикрепления водоросли к субстрату; 3 – водоросль; 4 – пластины (“листья”) водоросли; В – левая верхняя часть клетки (особи) одноклеточных грибов: 1 – основание мицелиев, т. е., откуда они растут; 2 – клетка с мицелиальной структурой; 3 – другая клетка с

мицелиальной структурой; 4 – почка дрожжевой клетки; С – 1 – клетка с мицелиальной структурой; 2 – другая клетка с мицелиальной структурой; 3 – основание мицелий, т. е., откуда они растут; 4 – переплетение (клубок) мицелиев; 5 – почка дрожжевой клетки; D – 1 – таллом пластинчатой формы; 2 – паразитирующие дрожжевые грибы; 3 – пластины водоросли.

Далее обсудим микрофоссилии, которые мы биологически интерпретировали как ранние водные грибы. На фотографиях (Рисунок 3) видно, что от двух тел два нитевидных образования направились в сторону рассмотренной выше бентосной водоросли. Они выглядят почти как конкурирующие, схватившиеся друг с другом. Это свидетельствует, что органические вещества водорослей привлекли обсуждаемые здесь нитевидные фоссиллизованные микроорганизмы. Готовыми органическими веществами обычно питаются многие грибы. С учётом этого можно утверждать, что микроорганизмы являются грибами. Возникает вопрос: а какими грибами?

Микрофоссилии с нитевидными образованиями мы интерпретировали как водные дрожжевые грибы с мицелиальной структурой. Это одноклеточные грибы, которые питаются готовой органикой, то есть являются гетеротрофами. Рецентные дрожжевые грибы поглощают органику всей поверхностью тела. Как мы видим на ряде фотографий (Рисунок 3В; 3С; 3D: 2) две особи дрожжей (Рисунок 3В: 2, 3) направили свои мицелии (мицелиальные структуры) в сторону упомянутого выше таллома водоросли для добычи готовой органической пищи. Одна мицелиальная структура проникла в таллом водоросли (Рисунок 3В: 1). Мицелиальные структуры дрожжевых грибов по нитчатой форме похожи на нитчатые цианобактерии, находимые в позднем докембрии. От них отличаются тем, что не имеют перегородок, разделяющих нитчатое тело (образование) на клетки. У дрожжевых грибов тело целиком представляет собой клетку.

Далее рассмотрим взаимоотношения между водорослями и грибами. Современные грибы паразитируют на самых разных организмах. Паразитирующие на талломах водоросли грибы формируют целую экологическую группу, называемую “грибы-альгофилы”. Среди них встречаются представители с различной морфологией. Но грибы паразитируют в основном на талломах зеленых водорослей (как одноклеточных, так и многоклеточных) и гораздо реже на цианобактериях. Известно, что основу группы лишенизированных грибов составляет класс *Lecanogomycetes*, а его фотобионтами являются только зеленые водоросли [6]. В нашем материале на поверхности таллома зеленой водоросли паразитируют дрожжевые грибы (Рисунок 3D: 2). Эволюция взаимоотношений грибов и водорослей в дальнейшем, по-видимому, пошла в направлении установления взаимовыгодных взаимоотношений, образования лишайников.

Помимо морфологии таллома водорослей, установленные нами взаимоотношения грибов и водорослей, указывают на то, что приведенные выше эдиакарского возраста водоросли следует считать зелёными сифоновыми листовидной формы (Рисунок 3А: 3, Рисунок 3D: 1).

3. Выводы

В бьюксское время венда (эдиакария) в экосистеме строматолитов столбчатой формы, на талломах низших водных растений (экологическая группа “водоросли”) паразитировали грибы. Результаты предыдущих исследований микроорганизмов венда Якутии дополнены изложенными в настоящей работе новыми открытиями сифоновых хлорофит и дрожжевых грибов. Ещё полнее стали наши фундаментальные знания о богатом микромире, существовавшем накануне “кембрийского взрыва” в развитии жизни на Земле. Поиск микроскопических ископаемых, биологическая расшифровка и установление систематического положения микрофоссилий в венде (эдиакарии) карбонатной фации (юдомии) перспективно для более полного палеонтологического обоснования терминальной системы протерозоя в Международной стратиграфической шкале (МСШ).

4. Благодарности

Исследования выполнены по государственному заданию Института геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения РАН, проект FUFГ-2024-0005.

5. Литература:

- [1] Kolosov P.N. Uniquely Preserved Fungi in the Vendian (Ediacaran) of Yakutia // Paleontological Journal. 2021. Vol. 55. No 4. P. 455–461.
- [2] Kolosov P.N. Paleoulvaria green algae of the Vendian (Ediacaran) Berezovsky trough (South of the Siberian platform) // Paleontol. Journ. 2023. V. 57. № 2. P. 21–24.
- [3] Kolosov P.N. New microorganisms from the Vendian (Ediacaran) of the Berezovsky Trough, Southern Siberian platform // Paleontological Journal. 2016. V. 50. No 6. P. 549–556.
- [4] Algae: A Reference Book / collective of authors: Vasser, S.P., Kondratieva, N.V., Masyuk, N.P., et al. Kiev, Naukova Dumka, 1989. 608 p.
- [5] Zinova A. D., Determinant of Green, Brown and Red Algae in the Southern Seas of the USSR, M.-L.: Science, 1967. 399 p.
- [6] The Lichen Flora of Russia. Biology, Ecology, Diversity, Distribution and Methods to Study Lichens; ed. by M.P. Andreev, D.E. Gimelbrant. St. Petersburg: Association of Scientific Publications of the KMK, 2014. 532 p.

МАГМАТИЗМ И ТЕКТОНИКА СЕВЕРО-ВОСТОКА ОСТРОВА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ (АРХИПЕЛАГ СЕВЕРНАЯ ЗЕМЛЯ)

Андрей Прокопьев¹, Виктория Ершова^{1,2,3}, Антон Шманяк⁴, Андрей Худолей^{2,4}

¹ ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

² ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет» Институт наук о Земле
199034, Россия, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7–9

³ ФГБУН «Геологический институт РАН»,
119017, Россия, г. Москва, Пыжёвский пер., 7

⁴ ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского», 199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Средний пр-т В.О., 74

MAGMATISM AND TECTONICS OF THE NORTHEAST OF THE OCTOBER REVOLUTION ISLAND (SEVERNAYA ZEMLYA ARCHIPELAGO)

Andrei Prokopiev¹, Victoria Ershova^{1,2,3}, Anton Shmanyak⁴, Andrei Khudoley^{2,4}

¹ Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

² Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg State University,
7-9, University nab. St. Petersburg, 199034, Russia

³ Geological Institute of RAS, 7, Pyzhevsky lane, Moscow, 119017, Russia

⁴ Karpinsky Russian Geological Research Institute, 74, Sredny av, St. Petersburg, 199106, Russia

Abstract. In the northeastern part of October Revolution Island (Kara terrane), supra-subduction subvolcanic and volcanoclastic rocks are described. Their Ordovician-Early Devonian isotope age (U-Pb, SHRIMP II, zircon and baddeleyite) and tectonic structure have been established. Volcanoclastic rocks yielded age at 463±3 Ma. Subvolcanic granite porphyry dated at 461–472 Ma while basalts, basaltic lava breccias and dolerite sills yielded ages at 467±16 Ma. Chemical data suggest that, the studied rocks could be formed on the active continental margin of the Ordovician-Silurian in age. Deformed rocks are intruded by Late Silurian to Early Devonian dolerite dikes (407±1, 416±1.5 Ma). A comparison is made with coeval magmatic rocks of the southern and southeastern parts of October Revolution Island.

1. Введение

Исследования проводились на северо-востоке о. Октябрьской Революции (архипелаг Северная Земля), где вскрыты кембрийские обломочные и ордовикские вулканогенно-осадочные породы [1, 2] севера Карского террейна, прорванные ордовикскими [3] интрузиями кислого состава, ранее считавшимися позднедевонскими-раннекаменноугольными и мезозойскими [1, 2], также раннедевонскими [3] базальтами, долеритовыми силлами и дайками, ранее считавшимися триасовыми [1, 2]. Исследования проводились вдоль береговых обнажений рек Ровная, Ясная, Малютка, мыса Сапог, мыса Форт (домен 1), а также ручьев, впадающих в фиорд Матусевича (домен 2), в бухты Закрытая, Раздолье, Собачья (домен 3). Целью исследований являлось установление петрографического состава, геохимической специализации и изотопного возраста магматических образований, структурных взаимоотношений магматических и осадочных пород, а также геодинамической природы исследованных комплексов.

2. Методики исследования

Петрографические, геохимические (силикатный анализ) и структурные исследования были выполнены по стандартным методикам в ИГАБМ СО РАН (г. Якутск). Геохимические и изотопно-геохимические (SHRIMP II, циркон, бадделеит) проводились в Центре изотопных

исследований во Всероссийском научно-исследовательском геологическом институте им. А.П. Карпинского (г. Санкт-Петербург).

3. Результаты

Домен 1. Здесь обнажены пестрые туфоаргиллиты, туфоалевролиты, туфопесчаники, туфоконгломераты, базальты и лавобрекчии субширотного простирания, деформированные ранними левосторонними сдвигами и надвигами широтного направления, а также поздними преимущественно субмеридиональными сдвигами. Эти породы прорваны субвулканическими интрузиями мелкозернистых гранит-порфиров, а также силлами и дайками долеритов. U-Pb возраст гранит-порфиров варьирует от 461 до 472 млн лет (12 образцов, средний ордовик, цирконы, SHRIMP II), тогда как базальты, базальтовые лавовые брекчии и долериты силлов имеют возраст 467 ± 16 млн лет (бадделеит, SHRIMP II).

Домен 2. На восточном побережье фиорда Матусевича выходит на поверхность толща переслаивания пестрых туфоалевролитов, риолитов, игнимбритов, пепловых туфов, вулканических брекчий и базальтов видимой мощностью около 20 м. Эти породы полого наклонены на юго-восток под углами $22\text{--}32^\circ$ и перекрыты с угловым несогласием маломощными верхнекаменноугольными-нижнепермскими континентальными отложениями [4]. Установленный возраст риолитов 463 ± 3 млн лет (средний ордовик, цирконы, SHRIMP II).

Гранит-порфиры домена 1 и риолиты домена 2 имеют не только близкий изотопный возраст, но и сходные геохимические характеристики. Породы субщелочные и перглиноземистые [5]. В спектрах распределения РЗЭ, нормированных на хондрит [6], наблюдается умеренная отрицательная европиевая аномалия. На спайдерграммах элементов, нормированных по примитивной мантии [6], выражены незначительные отрицательные Nb-Ta аномалии, а также интенсивные отрицательные аномалии Sr, Ti и P. На дискриминационных диаграммах фигуративные точки гранит-порфиров расположены либо в области внутриплитных гранитов [7], либо островных дуг, активных окраин [8] и гранитов I-типа [9, 10], а риолитов – локализируются в области гранитоидов вулканических дуг [7].

На диаграмме AFM точки базальтов и долеритов силлов расположены на границе толеитовой и известково-щелочной серий [11]. По соотношению V vs. Ti/1000 они располагаются в полях OIB/щелочных базальтов или MORB/базальтов задуговых бассейнов [12]. На диаграммах [13] фигуративные точки локализируются преимущественно в поле островодужных базальтов. Спектр распределения нормированных на хондрит [6] РЗЭ базальтов и долеритов аналогичен E-MORB. На спайдерграммах наблюдаются слабые отрицательные аномалии Nb-Ta и Th.

Домен 3. Вулканоогенно-осадочные и магматические породы домена 1 отделены от расположенных восточнее кембрийских терригенных толщ домена 3 правосторонним сдвигом субмеридионального простирания. Породы кембрия претерпели, по крайней мере, два этапа деформации. Оси ранних картируемых складок первой генерации имеют север-северо-восточное простирание. Складки сжатые, вплоть до изоклиналей. Второй этап представлен мелкими складками с субвертикальной ориентировкой шарниров, сопровождающимися межслоевым кливажем, которые ассоциируют с субмеридиональными сдвигами. Кембрийские толщ прорваны дайками долеритов северо-восточного, северо-западного и субширотного простирания. Установлен U-Pb возраст двух даек – 407 ± 1 , $416 \pm 1,5$ млн лет (поздний силур-ранний девон, бадделеит, SHRIMP II). На диаграмме AFM точки базальтов локализованы в поле толеитов [11], относятся к OIB/базальтам и/или MORB/базальтам задуговых бассейнов [12]. На диаграммах [13] фигуративные точки локализируются преимущественно в поле островодужных базальтов.

4. Дискуссия и заключение

1) Таким образом, полученные данные позволяют предполагать, что изученные породы на северо-востоке о. Октябрьской Революции могли формироваться на активной континентальной окраине ранне-среднеордовикского возраста. На юго-востоке острова были описаны гранит-

порфиры с возрастом 457 млн лет и близкими геохимическими характеристиками [14]. По данным [15] в южной части острова присутствуют туфы с возрастом 489–482 млн лет, которые прорваны раннеордовикскими гранитами (U-Pb, 474 млн лет), возраст которых близок к изученным нами гранит-порфирам. Верхняя часть исследованной толщи представлена среднеордовикскими субвулканическими кислыми породами и базальтами, близкими по возрасту гранит-порфирам, вскрытым на юго-востоке острова [14]. Позднесилурийские-раннедевонские дайки долеритов, прорывающие кембрийские толщи, по геохимическим данным могли образоваться в островодужной геодинамической обстановке.

2) Ближайшими по возрасту на территории СВ Азии являются ордовикские и раннесилурийские гранитоиды на юго-восточном фланге Омудевского террейна Верхояно-Колымской складчатой области [16-19], которые также могут иметь надсубдукционную природу. Можно предположить, что эти магматические образования и изученные нами интрузивные и вулканогенно-осадочные породы на севере Карского террейна могли быть частью единой протяженной магматической дуги ордовикско-силурийского возраста.

5. Благодарности

Работы выполнены частично по плану НИР ИГАБМ СО РАН (проект FUGG-2024-0005), изотопно-геохимические исследования и интерпретация результатов проведены при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-17-00169).

6. Литература:

- [1] Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi federatsii i ob'yasnitel'naya zapiska. Masshtab 1:1 000 000 (tret'e pokolenie). List T-45-48 m. Chelyuskin. (State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1 000 000 [third generation]. Sheet T-45-48th. Chelyuskin. Explanatory note.). Makar'ev A.A. (ed.). St. Petersburg: A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, 2013. (in Russian)
- [2] Markovsky, V.A., Paderin, P.G., Shneider, G.B., Lazareva, L.N. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoj federatsii i ob'yasnitel'naya zapiska. Masshtab 1:200 000. T-47-VI, XI, XII; T-48 - I, VII, VIII, IX, X (ostrov Bol'shevik). (State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200 000. Sheet T-47-VI, XI, XII; T-48 - I, VII, VIII, IX, X [Bol'shevik Island]. Explanatory note.) St. Petersburg: A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, 1999. (in Russian)
- [3] Prokopiev, A.V., Ershova, V.B., Sobolev, N.N., Korago, E., Petrov, E. O., Khudoley, A.K. New Data on Geochemistry, Age and Geodynamic Settings of Felsic and Mafic Magmatism of the Northeastern Part of October Revolution Island (Severnaya Zemlya Archipelago). In AGU Chapman Conference on «Large-Scale Volcanism in the Arctic: The Role of the Mantle and Tectonics». Selfoss, Iceland, 2019. Available online: https://higherlogicdownload.s3.amazonaws.com/AGU/181026d4-2440-440a-a114-8fcd2fc3ada8/UploadedImages/Chapmans/Arctic_Volcanism/ChapmanPresentedAbstracts_ArcticVolcanism.pdf
- [4] Ershova, V.B., Prokopiev, A.V., Nikishin, V.A., Khudoley, A.K., Malyshev, N.A., Nikishin, A.M. New data on Upper Carboniferous-Lower Permian deposits of Bol'shevik Island, Severnaya Zemlya Archipelago // Polar Research, 2015, vol. 34, 24558/
- [5] Maniar, P.D., Piccoli, P.M. Tectonic discrimination of granitoids // Geological Society of America Bulletin, 1989, v. 101, p. 635–643.
- [6] Sun S.-S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes In: Saunders, A.D., Norry, M.J. (eds.) Magmatism in the Ocean Basins. Geol. Soc. Lond. Spec. Publ, 1989, v.42, p. 313–345.
- [7] Pearce, J.A., Harris, N.B.W., Tindle, A.G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks // J. Petrol, 1984, vol. 25, p. 956–983.

- [8] Eby, G.N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications // *Geology*, 1992, vol. 20, p. 641–644.
- [9] Frost, B.R., Arculus, R.J., Barnes, C.G., Collins, W.J., Ellis, D.J., Frost, C.D. A geochemical classification for granitic rock suites // *Journal of Petrology*, 2001, vol. 42, p. 2033–2048.
- [10] Frost, B.R., Frost, C.D. A geochemical classification for feldspathic rocks // *Journal of Petrology*, 2008, vol. 49, no 11, p. 1955–1969.
- [11] Irvine, T.N., Baragar, W.R.A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks // *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1971, vol. 8, p. 523–548.
- [12] Shervais J.W. Ti–V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas // *Earth and Planetary Science Letters*, 1982, vol. 59, p. 101–118.
- [13] Pearce, J.A., Cann, J.R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses // *Earth and Planetary Science Letters*, 1973, vol. 19, p. 290–300.
- [14] Kurapov, M., Ershova, V., Khudoley, A., Makariev, A., Makarieva E. The first evidence of Late Ordovician magmatism of the October Revolution Island (Severnaya Zemlya archipelago, Russian High Arctic): geochronology, geochemistry and geodynamic settings // *Norwegian Journal of Geology*, 2020, 100, 202016.
- [15] Lorenz, H., Gee, D.G. & Whitehous, M. New geochronological data on Palaeozoic igneous activity and deformation in the Severnaya Zemlya Archipelago, Russia, and implications for the development of the Eurasian Arctic margin. // *Geological Magazine*, 2007, vol. 144, p. 105–125..
- [16] Surmilova, E.P., Maximova, G.A. State Geological Map of the USSR, Scale 1:200,000, Sheet Q–53–XXIX,XXX (Mouth of Bulkut River). Srednekolym'sk Series. Explanation Text; Moscow: Aerogeologiya Press, 1987. (in Russian)
- [17] Lychagin, P.P., Dylevsky, E.F., Shpikerman, V.I., Likman, V.B. Magmatism of Central Regions of the North-East USSR. Vladivostok: DVO AN SSSR, 1989. (In Russian)
- [18] Shpikerman, V.I. Pre-Cretaceous Minerageny of North-Eastern Asia. Magadan: NEISRI, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Science Press, 1998. (In Russian)
- [19] Sychev, S.N., Khudoley, A.K., Lebedeva, O.Y., Rogov, A.V., Sokolov, S.D., Chamberlain, K.R., Maklashin, V.S., Lvov, P.A. Silurian granitoid magmatism of the Rassokha terrane (North-East Russia) // *Dokl. Earth Sci.* 2020, vol. 494, p. 762–766.

**МИНЕРАЛОГИЯ И ВКЛЮЧЕНИЯ В РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ КАРБОНАТИТАХ
СРЕДНЯЯ ЗИМА (ВОСТОЧНЫЙ САЯН)**

Илья Прокопьев, Анна Дорошкевич
ФГБУН «Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева»,
630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3

**MINERALOGY AND INCLUSIONS IN RARE METAL CARBONATITES
SREDNYAYA ZIMA (EASTERN SAYAN)**

Ilya Prokopyev, Anna Doroshkevich
Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3, Akademika Koptyuga ave.,
Novosibirsk, 630090, Russia

Abstract. The studied carbonatites of the Srednyaya Zima alkaline massif belong to calcitic carbonatites. The main rock-forming mineral of carbonatites is calcite. Minor minerals are represented by biotite of the annite-phlogopite series, fluorapatite, nepheline, ilmenite, pyrite, pyrrhotite, galena, as well as secondary feldspars - albite and potassium feldspar. Accessory minerals of carbonatites are pyrochlore, zircon, burbankite, magnetite, rutile, titanite, strontianite and barite. In the zircon of the carbonatites of the Srednyaya Zima massif, several generations of inclusions have been identified that characterize the composition of the melts of rare metal carbonatites and its subsequent evolution. According to the study of primary melt inclusions, the carbonatite melt in zircon had an alkaline-carbonate composition, with a high content of Ca, Na, CO₂, OH, F and increased concentrations of Sr, Ba, Mg, Fe, Mn, Ti, U, rare metals Nb and Ta, as well as Zr and Si. The inclusions were captured by zircon at the initial stages of crystallization of the liquidus mineral and in composition were as close as possible to the composition of the parental melts of the Srednyaya Zima carbonatites.

1. Введение

Щелочно-ультрасосновные карбонатитовые комплексы представляют собой многофазные интрузии, образование которых связывают с процессами генерации специфических флюидизированных силикатно-карбонатных расплавов в нижней мантии. Вместе с тем, большинство таких комплексов является рудоносным на редкометалльное сырье, что, является стратегически важным приоритетом для горнодобывающей промышленности Российской Федерации. В неопротерозое на рубеже порядка 650-630 млн лет вдоль южной окраины Сибирского кратона происходило образование целого ряда редкометалльных (Nb, Zr, Ta, U и REE) щелочных карбонатитовых комплексов, таких как Белая Зима, Средняя Зима, Чапа, Большая Тагна, Жидой, Веселое, Пограничное, Арбарастах и Ингили, формирование которых связывают с эпохой проявления крупномасштабного внутриплитного магматизма и геотектоническими событиями завершающего этапа распада суперконтинента Родиния [1]. В работе представлены новые данные по минералогии и включениям в минералах редкометалльных карбонатитов массива Средняя Зима.

2. Петрография и минеральный состав карбонатитов

Исследуемые карбонатиты Среднезиминского массива представлены кальцитовыми разновидностями (масс. %): 41.02-48.13 CaO, 1.3-2.17 MgO и 2.65-7.79 FeO_t. Содержание SiO₂ варьирует от 12 до 15 масс. %. Сумма щелочей – от 2.02 до 8.39 масс. %, Na₂O/K₂O – 0.48-0.68. Кальцитовые карбонатиты имеют мелко-среднезернистую структуру, текстура породы – массивная, местами линейная. Основной порообразующий минерал - кальцит (90-95 об. %). Ко второстепенным (5-7 об. %) относятся биотит (3-4 об. %), фторапатит, нефелин, ильменит, а

также вторичные полевые шпаты – альбит с калиевым полевым шпатом, хлорит, скаполит и цеолиты; сульфиды (1 об. %) представлены пиритом и галенитом. Акцессорные (до 1 об. %) – пироксенолор, циркон, бурбанкит, магнетит, рутил, титанит, стронцианит и барит (Рисунок 1 а–с).

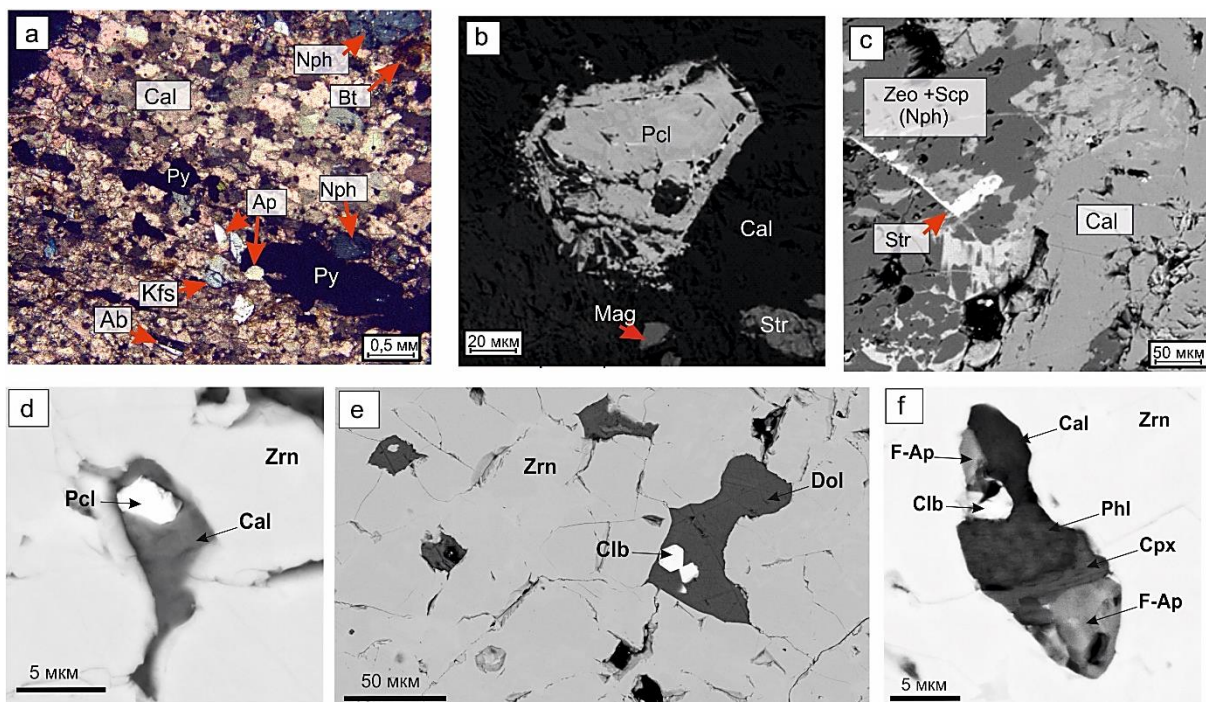


Рисунок 1 – Минералогия (а–с) и состав расплавных включений в цирконе (d–f) в карбонатитах Средняя Зима. Петрографическое фото (а) и BSE-картинки (b–f) с электронного микроскопа. Аббревиатуры минералов указаны согласно [2].

Кальцит в карбонатитах представлен мелко-среднезернистыми агрегатами. Из особенностей химического состава следует отметить присутствие примеси MgO (до 0.38 масс. %), SrO (до 2.91 масс. %), FeO (до 3.13 масс. %) и MnO (до 2.05 масс. %). Слюда представляет собой отдельные таблитчатые и удлиненные субидiomорфные кристаллы и агрегаты, размером до 0.5-1 мм. Среди примесей в составе слюды карбонатитов отмечается TiO₂ от 1.88 до 3.22 масс. %, MnO – до 1.16 масс. %. Апатит представлен субидiomорфными зернами и кристаллами призматического сечения, размером до 0.5 мм. Кристаллы претерпели частичное растворение, зональность по составу слабая. Состав минерала соответствует фторапатиту, в котором содержание фтора варьирует от 1.23 до 1.39 масс. %. В апатите отмечается примесь SrO до 1.62 масс. % и Ce₂O₃ до 1.17 масс. %. Ильменит образует зернистые агрегаты в породе, размером десятки-сотни микрон. В составе ильменита присутствуют примеси (масс. %): 3.49-0.92 MnO и до 0.31-1.9 CaO.

Нефелин в карбонатитах образует кристаллы призматического сечения, субидiomорфного облика, однако, края зерен имеют отчетливо реакционные границы с кальцитом. Минерал практически нацело замещен смесью канкринита и минералов группы цеолитов. В нефелине повсеместно встречаются включения стронцианита, барита и бурбанкита. Из полевых шпатов в породе встречаются редкие ксеноморфные вкрапленники изометричных зерен плагиоклаза - практически чистого по составу альбита, в котором присутствуют включения калиевого полевого шпата - по составу относящегося к ортоклазу (Or₈₅₋₁₀₀). Полевые шпаты имеют явно вторичный генезис и ассоциируют с гидротермально-метасоматической минерализацией (хлорит, скаполит, цеолит и др.) (Рисунок 1 а–с).

Сульфиды в карбонатитах массива Средняя Зима представлены пиритом, пирротином и галенитом, которые образуют как отдельные микронные зерна-вкрапленники, так и зернистые агрегаты и микрожилы, размером до первых мм. Титанит в породе образуют призматические

кристаллы, размером десятки микрон. Химический состав выдержан и близок к теоретическому.

Минералы бурбанкит (?), магнетит, рутил, стронцианит и барит образуются на гидротермальной стадии и представляют собой вкрапленные зерна и агрегаты, размером десятки-сотни микрон. Бурбанкит зонален с вариациям редкоземельных элементов, среди которых преобладает Ce_2O_3 – до 7.78 масс. % (LREE_2O_3 – до 14.43 масс. %) Барит содержит примесь SrO – до 3.05 масс. %. В составе рутила присутствует примесь Nb_2O_5 – до 0.87 масс. %, что типично для гидротермальной минерализации карбонатитовых комплексов.

Минералы группы пирохлора относятся к главным концентраторам ниобия в карбонатитах. Пирохлор представляет собой зональные идиоморфные зёрна, размером до 100 мкм (Рисунок 1b). Химический состав минерала характеризуется содержанием UO_2 до 6.36 масс. %, ThO_2 до 0.61 масс. %, Ta_2O_5 – от 7.27 до 22.61 масс. %, Ce_2O_3 до 0.55 масс. %. Также отмечаются присутствие PbO до 1.26 масс. %, BaO до 0.99 масс. %, FeO до 0.4 масс. % и SrO до 2.90 масс. %. Минерал можно отнести к разновидностям фторкальциомикролита [3], с повышенным содержанием Ta и U, что характеризует специфику рудоносности массива Средняя Зима.

3. Включения в цирконе карбонатитов

В цирконе кальцитовых карбонатитов массива Средняя Зима идентифицированы поликристаллические включения двух типов (Рисунок 1 d–f). Первый тип включений имеет преимущественно карбонатный состав (Рисунок 1d,e). Включения характеризуются вакуолью неправильной формы либо формой отрицательного кристалла, размеры которой варьируют в диапазоне в среднем 5-35 мкм. Включения изобилуют в матрице циркона и относятся к первично захваченным. Во включениях присутствует микрозернистый агрегат кальцита, содержащего до 0.91 масс. % SrO . Карбонатная фаза также представлена стронцианитом (CaO до 5.46 масс. %) баритокальцитом (CaO 19.66 масс. %) и/или доломитом, содержащим (масс. %) до 0.41 SrO , до 2.2 MnO , 19.9-20.7 FeO , 6.57-6.95 MgO . Также в карбонатной фазе по данным сканирующей электронной микроскопии присутствует примесь Na_2O до 0.2 масс.%. Наряду с карбонатами во включениях первого типа содержатся Nb-содержащие рудные минеральные фазы в виде кристаллов ромбического и октаэдрического сечения, представленные уранпирохлором (UO_2 22.11-22.28, CaO 3.74-7.42, Ce_2O_3 1.08-1.62, TiO_2 13.48-13.59 масс. %) и/или колумбитом (Ta_2O_5 3.46-7.55 масс. %).

Второй тип включений в цирконе представлен поликристаллическим агрегатом карбонатно-силикатного состава (Рисунок 1f). Форма вакуоли включений округлая, вытянутая, реже неправильная; размер включений составляет 10-25 мкм. Включения локализованы во внешних зонах кристаллов циркона, по залеченным трещинам, и были отнесены к первично-вторично захваченным. Исследование дочерних кристаллических фаз включений показало наличие зерен фторапатита, клинопироксена, флогопита, кальцита и рудной Nb-содержащей фазы пирохлора (?). Мы не исключаем также присутствие легкорастворимых минеральных фаз типа хлоридов или сульфатов, которые могли быть потеряны во включениях в следствие их разгерметизации. В апатите дочерних фаз включений присутствуют примеси (масс. %): Na_2O (1.23-1.86 масс. %), Y_2O_3 (2.32–3.09), LREE_2O_3 ($\text{Ce}_2\text{O}_3+\text{Nd}_2\text{O}_3$ до 2.2). Клинопироксен (ближе к диопсиду) содержит (масс. %) 12.85 Na_2O и 2.22 CaO . В дочерней фазе флогопита примесь TiO_2 0.55-0.85 масс. %.

4. Выводы

Исследованные карбонатиты щелочного массива Средняя Зима относятся к кальцитовым карбонатитам. Основным породообразующим минералом карбонатитов является кальцит. Второстепенные минералы представлены биотитом ряда аннит-флогопит, фторапатитом, нефелином, ильменитом, пиритом, пирротинном, галенитом, а также вторичными полевыми шпатами – альбитом и калиевым полевым шпатом. Акцессорные минералы карбонатитов - пирохлор, циркон, бурбанкит, магнетит, рутил, титанит, стронцианит и барит. Вторичные минералы представлены хлоритом, скаполитом и цеолитами. Химический состав

магматических минералов карбонатитов Средней Зимы (слюда, фторапатит, пироклор, циркон и др.) схож с таковым минералов близковозрастных щелочных карбонатитовых массивов, таких как Белая Зима и Арбарастах [4, 5].

В цирконе карбонатитов массива Средняя Зима установлено несколько генераций включений, характеризующих состав расплавов редкометалльных карбонатитов и последующую его эволюцию. Согласно изучению первичных расплавных включений, в цирконе расплав карбонатитов имел щелочно-карбонатный состав, с высоким содержанием Ca, Na, CO₂, OH, F и повышенными концентрациями Sr, Ba, Mg, Fe, Mn, Ti, U, редких металлов Nb и Ta, а также Zr и Si (минерал-хозяин включений). Включения были захвачены цирконом на начальных стадиях кристаллизации ликвидусного минерала и по составу максимально близким к составу родоначальных расплавов карбонатитов Средней Зимы. Судя по составу и морфологии кристаллических фаз во включениях карбонаты и рудные фазы кристаллизовались совместно с кристаллизацией циркона, при этом, по всей вероятности, включения захватывали расплав различного состава (по соотношению входящих химических элементов), поскольку состав карбонатной фазы варьирует от стронцианита-баритокальцита к кальциту и/или доломиту. Интересная особенность состава включений зафиксирована на несколько исследованных объектах: если во включении карбонатная фаза представлена доломитом, то рудная фаза кристаллизуется в виде танталита-колумбита, тогда как в случае кальцитовой преобладающей карбонатной фазы - рудная фаза представлена пироклором. Имеет ли место захват различных генераций близких к родоначальным расплавов для кальцитовых и доломитовых карбонатитов в зернах циркона – это вопрос будущих исследований. Тем не менее, состав близкий к родоначальному карбонатитов Средней Зимы зафиксирован, он имеет щелочно-карбонатный состав с высоким содержанием рудных компонентов. При этом надо помнить, что циркон тоже кристаллизовался из более раннего расплава. Первично-вторичные поликристаллические включения в цирконе имеют фосфатно-карбонатно-силикатный состав, с повышенным содержанием редких металлов Nb и Ta, а также высокими содержаниями Ca, Na, K, Mg, Fe, Ti, Al, Sr, LREE, CO₂, OH, F, Cl. Химический состав таких включений и набор дочерних кристаллических фаз, таких как фторапатит, клинопироксен, флогопит, кальцит и рудные фазы, практически тождественен или коррелирует данным по изучению расплавных включений в силикокарбонатитах неопротерозойского массива Арбарастах [5].

4. Финансирование

Исследования выполнены за счет средств гранта РФФИ № 23-17-00098.

5. Литература:

- [1] Yarmolyuk, V.V., Kovalenko, V.I., Sal'nikova, E.B., Nikiforov, A.V., Kotov, A.B., Vladykin, N.V. Late Riphean rifting and breakup of Laurasia: Data on geochronological studies of ultramafic alkaline complexes in the southern framing of the Siberian Craton // *Doklady Earth Sciences*, 2005, vol. 404, iss. 7, pp. 1031-1036.
- [2] Warr, L. N. IMA–CNMNC approved mineral symbols // *Mineralogical Magazine*, 2021, vol. 85, pp. 291-320.
- [3] Atencio, D., Andrade, M. B., Christy, A. G., Gieré, R. & Kartashov, P. M. The pyrochlore supergroup of minerals: nomenclature // *The Canadian Mineralogist*, 2010, vol. 48, pp. 673-698.
- [4] Doroshkevich, A., Veksler, I., Izbrodin, I., Ripp, G., Khromova, E., Posokhov, V., Travin, A. & Vladykin, N. Stable isotope composition of minerals in the Belaya Zima plutonic complex, Russia: Implications for the sources of the parental magma and metasomatizing fluids // *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, # 116, pp. 81-96.
- [5] Prokopyev, I., Doroshkevich, A., Zhumadilova, D., Starikova, A., Nugumanova, Y. N. & Vladykin, N. Petrogenesis of Zr–Nb (REE) carbonatites from the Arbarastakh complex (Aldan Shield, Russia): mineralogy and inclusion data // *Ore Geology Reviews*, 2021, # 131, 104042.

**ПЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГРАНИТОВ
ВЕРХОЯНО-ИНДИГИРСКОЙ И ПРИКОЛЫМСКОЙ ЗОН
ОРОГЕНЕЗА ПО ДАННЫМ ТИПОМОРФИЗМА БИОТИТОВ**

Руслан Протопопов

АО «Якутскгеология», 677009, Россия, г. Якутск, ул. Кальвица, 24

**PETROLOGICAL FEATURES OF GRANITES OF THE
VERKHUYAN-INDIGIRSKY AND PRIKOLYMA OROGENY ZONES
ACCORDING TO THE DATA OF BIOTITES TYPMORPHISM**

Ruslan Protopopov

JSC "Yakutskgeologiya", 24, Kalvica str., Yakutsk, 677009, Russia

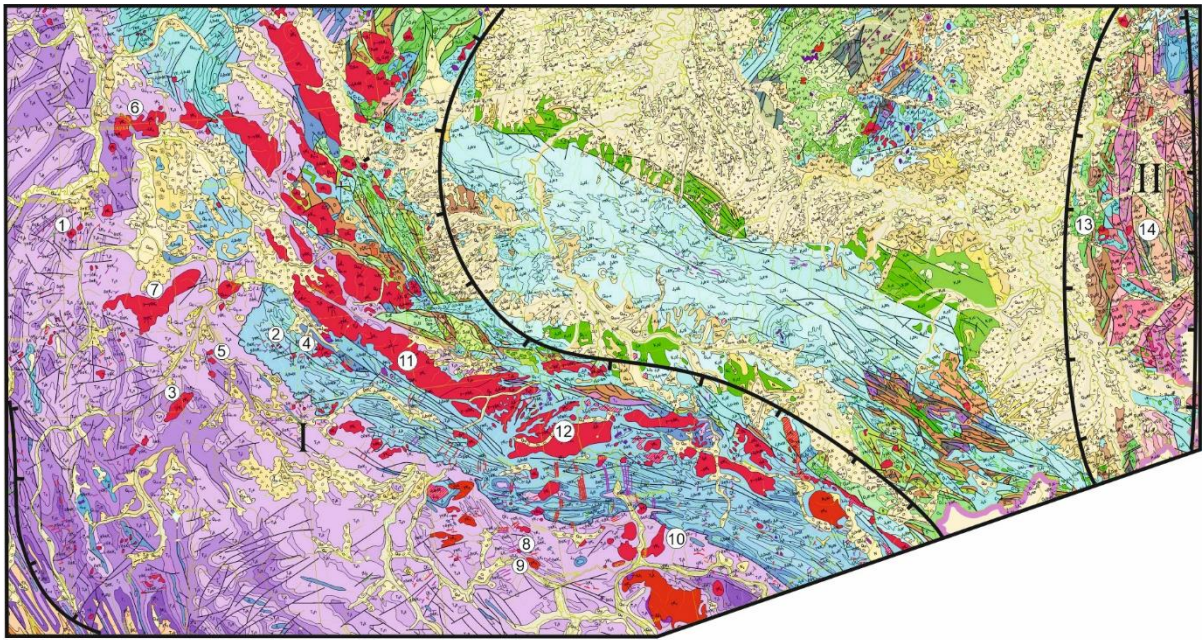
Abstract. Late Jurassic-Early Cretaceous hypabyssal granites of Verkhoyansk-Indigirka and Prikolyma orogenesis zones of the Yana-Kolyma folded region are well distinguished by petrological features. Sensitive indicator of this is the typomorphism of biotites, and the petrogenic and accessory minerals associated with them. Petrological features of Verkhoyansk-Indigirka orogenic zone granites are characterized by high water fluidity, low potassium alkalinity potential, normal and reduced alkalinity and crystallization at 520-680°C, and petrological features of the Kolyma zone characterized by low fluidity of water, high alkalinity, high oxidative potential of oxygen, its fugacity and crystallization of granites at high temperatures - 720-820°C. Petrogenesis of Verkhoyansk-Indigirka orogeny zone granites is determined by the lithosphere of the continental margin. More plastic viscous sandy-clayey strata of the Verkhoyansk folded thrust complex, saturated with juvenile waters are favorable for closed thermodynamic conditions for the formation of granite massifs, greisenization of apical domes with rare metal mineralization and polymetallic-gold ore mineralization in supra-intrusive aureoles. Petrological features of the granites of the Kolyma orogenetic zone are predetermined by the rigid tectonophysics of deeply metamorphosed crystalline strata of the early Proterozoic, Archean and contrast formed Phanerozoic terrigenous-carbonate deposits of continental lithosphere. Gold and polymetallic mineralization are developed in superintrusive halos.

1. Введение

Геолого-петрологическое сравнительное исследование гранитов двух контрастно различающихся по геологическому строению, разделенных своеобразной геодинамики обширными тектоническими структурами Верхояно-Индигорской и Приколымской зон позднемезозойского орогенеза Яно-Колымской складчатой области с точек зрения и научной, и практической представляет не малый интерес (Рисунок 1). Гранитоиды Верхояно-Индигорской зоны орогенеза охвачены изучением обширно [4, 6]. Гранитоиды Приколымской зоны хорошо изучены при проведении геологосъемочных работ масштаба 1:50 000 с поисковыми работами по всей территории Приколымского поднятия (микроконтинента) в 1985-1991 гг. коллективом Геофизической экспедиции № 6 с применением современных методов исследования петрографии, петрохимии, геохимии, типоморфизма петрогенных и акцессорных минералов [3, 5]. При изучении гранитов Верхояно-Индигорской зоны орогенеза использованы данные химических анализов биотитов из опубликованных сводных источников [6].

2. Основной раздел

Петрологические особенности гранитов Верхояно-Индигорской орогенной зоны рассматриваются по колымскому и бакы-дербекинскому магматическим комплексам.



Зоны орогенеза: I - Верхояно-Инди́гирская, II - Приколы́мская.

Массивы рассматриваемые: 1 - Арга-Ыннаххайский, 2 - Бургавлийский, 3 - Безымянный, 4 - Чалбинский, 5 - Ирюнджинский, 6 - Кигиляхский, 7 - Тирехтяхский, 8 - Тонор-Арангасский, 9 - Аляскитовый, 10 - Усть-Нерский, 11 - Чибагалахский, 12 - Порожноцепинский (Верхояно-Инди́гирская зона); 13 - Эджекальский, 14 - Правозджекальский (Приколы́мская зона).

Рисунок 1 – Расположения гранитоидов в Верхояно-Инди́гирской и Приколы́мской зонах орогенеза

Петротипическими представителями колымского комплекса являются Чибагалахский и Порожно-Цепинский массивы, которые в виде батолитов вытянуты вдоль простирания складчатости юрско-триасовых толщ в север-западном направлении. Они прорывают палеозойские терригенно-карбонатные толщи и находятся во вмещающих песчаниково-алевролитовых толщах триаса, достигают алевролитово-песчаниковых толщ юры Иньяли-Дебинского синклиория на границе с Тас-Хаяхтахским антиклинорием. Баки-дербекинский комплекс представлен Арга-Ыннаххайским, Бургавлийским, Безымянным, Чалбинским, Ирюнджинским, Ченкеленьинским, Кигиляхским, Тирехтяхским, Тонор-Арангасским, Аляскитовым и Усть-Нерским массивами в триасовых песчано-глинистых толщах Верхоянского складчато-надвигового пояса. Они являются маловскрытыми вытянутыми и расположенными в поперечные ряды плутонами и штоками. На Приколымском поднятии позднеюрско-раннемеловой гранитный магматизм характеризуется эджекальским комплексом, в составе которого Правозджекальский, Эджекальский, Бургучанский, Лелегодисский и Табакчанский массивы в виде небольших маловскрытых штоков. Наиболее комплексно изучены Правозджекальский и Эджекальский массивы ввиду их представительности по строению и обнаженности. Вмещающими породами гранитов являются раннепротерозойские метаморфизованные в амфиболитовой фации кристаллические сланцы. Достигают они и слабо метаморфизованных в зеленосланцевой фации терригенно-карбонатных толщ палеозоя, реже и позднеюрских терригенных и вулканогенно-осадочных отложений. Баки-дербекинский комплекс с твердым обоснованием датируется раннемеловым возрастом по К-Аг и современным U-Pb SHRIMP-II методом по цирконам [4]. По колымскому (батолитовому поясу) комплексу большинство современных SHRIMP-II датировок по цирконам показывают позднеюрский возраст. О возможном удревнении возрастов при этом логично объяснено Ю.В. Кузнецовым при составлении Госгеолкарты 1000/3 Q-54 ссылаясь на рекомендации некоторых специалистов ВСЕГЕИ и работу Т.С. Хабибулина (2003 г), что кристаллизация циркона

происходит при температуре 900°C задолго до кристаллизации гранитов. Комплексный геолого-тектонический и петрологический анализ свидетельствует о формировании колымского и бакы-дербекинского комплексов в позднеюрско-раннемеловую субдукционно-коллизийную стадию геодинамики Верхоянской континентальной окраины [4]. Поэтому оптимальным является позднеюрско-раннемеловое время образования Колымского гранитного батолитового пояса. По Приколымскому поднятию радиологические датирования K-Ar и последние U-Pb SHRIMP-II методом по цирконам из гранитов эджекальского комплекса показывают позднеюрское время (В.И. Шпикерман). Но с другой стороны наблюдается и наложение гранитного магматизма на позднеюрские отложения (Эджекальский массив) [3]. Таким образом, граниты двух зон сопоставимы как образования позднеюрско-раннемелового орогенеза. Чутким индикатором эндогенных термодинамических процессов является типоморфизм биотитов и ассоциирующих с ними петрогенных и акцессорных минералов. Здесь приводятся результаты петрологических исследований на основе диаграммы окислительно-восстановительного термодинамического режима кристаллизации гранитов Е.В. Негрей и диаграмма оценки глиноземистости-железистости биотитов на фоне водно-калиевого потенциала, щелочности и температуры флюидно-магматического расплава по В.С. Иванову (Рисунок 2, 3) [1, 2, 3]. Петрологические особенности гранитов Верхояно-Индибирской зоны орогенеза характеризуются высокой флюидностью воды, низким потенциалом калиевой щелочности, нормальной и пониженной щелочностью и кристаллизацией при температурах 520-680°C, а Приколымской зоны - низкой флюидностью воды, повышенной щелочностью, высоким окислительным потенциалом кислорода, его фугитивности и кристаллизацией гранитов при высоких температурах в 720-820°C. Это подтверждается и по плагиоклаз-калишпатовой и амфибол-биотитовой термометрам [3]. Здесь граниты аномально богаты магнетитом (8,0 - 20,0 г/т) в отличие от гранитов Верхояно-Индибирской зоны, где главным акцессорием является ильменит. Фактор высокой температуры в 1000°C и выше в апогее генерации магмы видно из диаграммы фазового равновесия FeO – Fe₂O₃ – TiO₂ по магнетиту [3]. Граниты двух зон орогенеза контрастно различаются и по параметрам Si/Al – Mg+Fe/Al. (Таблица 1а, 2в). О гипабиссальной фации глубинности (1-2 км) становления гранитных интрузивов Приколымской зоны свидетельствуют показатели диаграммы Ab-An-Or двуполевошпатового равновесия в 1-2 кбар (0,1-0,2 ГПа) давления, высокие значения Nb/V (7, 4) по Н.Н. Амшинскому, резкие контакты интрузивов без «теневых» образований и структурные реконструкции по эрозионному срезу гранитных массивов [3]. О гипабиссальных фациях гранитов бакы-дербекинского комплекса опубликованы в работах В.А. Трунилиной, В.С. Шкодзинского и других, а граниты Колымского батолитового пояса на основе петрологических анализов считаются относительно глубинными [4, 6]. В Верхояно-Индибирской зоне орогенеза более пластичные и вязкие песчано-глинистые толщи Верхоянского складчато-надвигового комплекса, насыщенные ювенильными водами благоприятны для образования закрытых термодинамических условий становления гранитных массивов, грейзенизации апикальных куполов с редкометальным оруденением [4, 5]. В надинтрузивных ореолах нескрытых гранитных интрузивов характерны малосульфидные золото-кварцевые оруденения. Петрологические особенности гранитов Приколымской зоны орогенеза predeterminedены консолидированной жесткой тектонофизикой глубоко метаморфизованных кристаллических толщ раннего протерозоя, архея и контрастно построенных терригенно-карбонатных отложений фанерозоя континентальной литосферы. Грейзенизация приколымским гранитам не характерна ввиду недостаточной флюидности воды и большей утечки флюидов в относительно хрупкой вмещающей среде, а экзоконтактные и надинтрузивные ореолы размещают рудопроявления и месторождения золото-кварц-сульфидной формации в пропилитах, скарнах, березитах и диафоритах [3, 5].

Таблица 1 а – Химический состав и коэффициенты соотношений атомных количеств петрогенных компонентов биотитов из гранитов Верхояно-Индигирской и Приколымской зон орогенеза

Номера массивов	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Количество усредненных анализов	2	2	6	3	2	7	1	1	1	1
SiO ₂	34,71	34,27	34,51	33,89	34,21	35,65	34,76	33,64	34,44	34,9
TiO ₃	3,09	3,62	3,84	2,88	2,68	3,78	4,20	3,99	4,11	3,28
Al ₂ O ₃	18,29	17,19	15,71	19,87	19,09	15,66	13,20	17,64	18,53	19,62
Cr ₂ O ₃						0,02	0,04			
Fe ₂ O ₃	6,40	7,39	3,23	2,97	3,08	6,52*	8,20*	6,30	11,01	7,09
FeO	18,14	17,62	21,28	21,82	20,89	18,00*	18,00*	15,07	9,82	16,00
MnO	0,13	0,46	0,37	0,21	0,20	0,43	0,33	0,26	0,31	0,57
MgO	7,36	5,72	7,01	3,53	3,97	7,08	7,63	6,25	5,42	5,25
CaO	0,11	0,15	0,63	0,75	4,75	0,02		1,75	0,36	
Na ₂ O	0,12	0,25	0,35	0,18	0,10	0,08	0,20	0,32	0,38	0,14
K ₂ O	8,95	9,88	8,03	8,94	8,70	9,98	9,85	7,76	8,77	9,73
H ₂ O ⁺	2,26	2,04	3,85	3,47	3,44	3,87		4,83	4,60	3,91
H ₂ O ⁻			0,11		0,20					
P ₂ O ₅	0,12	0,04	0,24	0,19	0,16			0,91	0,46	
F	0,53	0,66	0,52	1,26	1,16			1,71	2,73	
Cl				0,12	0,01					
Rb ₂ O	0,07	0,06	0,06	0,15	0,16			0,07	0,15	
Cs ₂ O		0,03	0,01							
Li ₂ O			0,06	0,45	0,41					
Сумма	100,28	100,38	99,81	100,68	100,21	101,09	96,41	100,50	101,09	100,49
f	64,2	70,7	65,5	78,8	77,6	65,5	65,1	65,0	67,2	70,4
al	25,1	25,4	22,2	28,4	27,1	21,7	18,7	25,8	27,1	27,3
Si/Al	1,6	1,6	1,9	1,5	1,5	1,9	2,2	1,6	1,6	1,5
Mg+Fe/Al	1,4	1,4	1,6	1,1	1,2	1,7	2,1	1,3	1,1	1,2

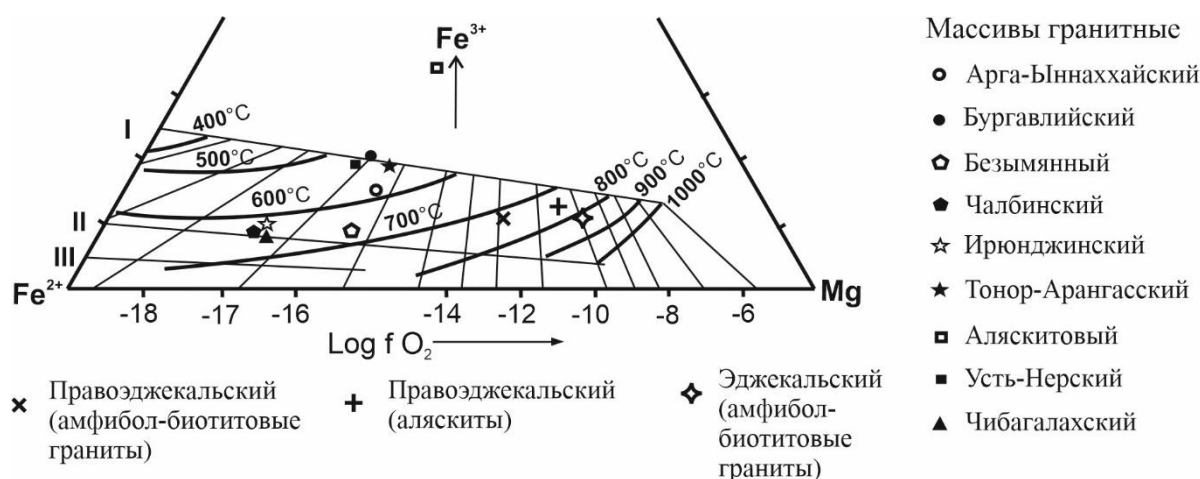


Рисунок 2 – Окислительно-восстановительный термодинамический режим кристаллизации биотитов из гранитов Верхояно-Индигирской и Приколымской зон орогенеза (по диаграмме Е.В. Негрей, 1983) [2].

Жирные линии – температура, тонкие – LogfO₂ фугитивности кислорода. I-III – линии буферных равновесий: I – магнетит-гематит; II – никель-бунзенин; III – кварц-магнетит-фаялит.

Таблица 1 в

Названия массивов	11	12	13	14	15	16	17
Количество усредненных анализов	3	7	1	3	4	4	3
SiO ₂	34,19	35,29	34,93	34,97	36,98	36,06	35,22
TiO ₃	3,09	4,25	4,40	4,11	3,07	3,96	4,60
Al ₂ O ₃	19,93	17,94	18,02	12,41	11,75	11,92	13,03
Cr ₂ O ₃		0,05	0,03				
Fe ₂ O ₃	2,94	2,48*	2,21*	4,88	5,48	5,73	5,00*
FeO	21,28	19,00*	19,00*	14,97	11,01	11,93	14,21*
MnO	0,30	0,48	0,46	0,62	0,89	0,44	0,54
MgO	3,80	7,54	7,12	12,02	15,41	13,88	12,35
CaO	0,72	0,01	0,02	1,18	1,31	1,03	0,06
Na ₂ O	0,22	0,09		0,27	0,37	0,30	0,17
K ₂ O	8,58	10,01	9,78	7,96	6,91	8,10	9,68
H ₂ O ⁺	2,94	3,94	3,90				2,67
H ₂ O ⁻				0,38	0,48	0,28	
P ₂ O ₅	0,24			0,79	0,49	0,70	
F	1,50						
Cl							0,27
Rb ₂ O	0,16						
Li ₂ O	0,46						
Сумма	100,35	101,08	99,87	94,56	94,15	94,33	97,85
f	78,0	61,4	62,3	47,3	36,7	40,9	45,9
al	28,1	24,7	25,2	17,3	15,9	16,5	18,1
Si/Al	1,5	1,7	1,6	2,5	2,7	2,6	2,3
Mg+Fe/Al	1,1	1,4	1,3	2,3	2,5	2,4	2,2

Массивы гранитных интрузивов: 1 – Арга-Ыннаххайский, 2 – Бургавлийский, 3 – Безымянный, 4 – Чалбинский, 5 – Ирюнджинский и Ченкеленьинский, 6 – Кигиляхский, 7 – Тирехтяхский, 8 – Тонор-Арангасский, 9 – Аляскитовый, 10 – Усть-Нерский, 11 – Чибагалахский, 12 – Порожно-Цепинский 1, 13 – Порожно-Цепинский 2 (Верхояно-Индибирская орогенная зона); 14 – Правозджекальский (амфибол-биотитовые граниты), 15 – Эджекальский (амфибол-биотитовые граниты), 16 – Правозджекальский (аляскиты), 17 – Эджекальский (лейкограниты) (Приколымская орогенная зона). Примечание: * - окись и закись железа разделены по аналогии.



3. Выводы

Граниты Верхояно-Индигорской и Приколымской орогенных зон, контрастно отличающихся по геологическому и тектоническому строению сопоставимы по позднеюрско-раннемеловому времени образования, а также как гипабиссальные по фациям глубинности становления, кроме относительно глубинных батолитов Колымского пояса. Петрологические особенности гранитов Верхояно-Индигорской зоны орогенеза характеризуются высокой флюидностью воды, низким потенциалом калиевой щелочности, нормальной и пониженной щелочностью и кристаллизацией при относительно низких температурах (520-680°C). Граниты Приколымской зоны орогенеза образовались в условиях низкой флюидности воды, повышенной щелочности расплава, высокого окислительного потенциала кислорода, его фугитивности и кристаллизовались при высоких температурах (720-820°C). Петрологические особенности гранитных комплексов, их металлогения предопределены геологическими и структурно-тектоническими строениями, геодинамикой и вещественными составами литосферных террейнов. Петрогенез гранитов Верхояно-Индигорской зоны орогенеза обусловлен литосферой континентальной окраины с субдукционной геодинамикой [4]. Пластичные вязкие преимущественно глинистые ювенильно-водоносные толщи благоприятны образованию закрытых термодинамических условий становления гранитных массивов, полной равновесной гомогенизации гранитной магмы, затем обогащению флюидами апикальных куполов, грейзенизации с редкометальным оруденением. При высвобождении накопленного флюида развивается оруденение в надинтрузивных ореолах. Петрогенез Приколымской зоны орогенеза обусловлен консолидированной тектонофизикой глубоко метаморфизованных кристаллических толщ раннего докембрия и архея, контрастно построенных терригенно-карбонатных отложений фанерозоя континентального террейна, где источниками гранитизирующих флюидов повышенной щелочности и парциального давления являются мантийные горизонты по глубинным разломам при тектоно-магматической активизации. Оруденение здесь специализировано на золото и полиметаллы в надинтрузивных ореолах пестроцветных пропицитов, скарнов, диафторитов и березитов [3, 5].

4. Литература:

- [1] Ivanov V.S. On the effect of temperature and chemical activity of potassium on the composition of biotite in granitoids // News Academy of Sciences of the USSR. Geological series. 1970. № 7. P. 20-30.
- [2] Negrey E.V. Petrology of the Upper Paleozoic granites of Central Kazakhstan. Moscow. Science, 1983. 168. p.
- [3] Protopopov R.I. Devonian and cretaceous granitoids Prikolymski rise. Yakutsk: 2010, 147 pp.

- [4] Protopopov R.I. Geodynamics and petrological features of late Mesozoic granitoids the main batholith belt and transverse rows the Supreme-Kolyma orogenic region // Bulletin of the State Committee of Geology. № 1. (13) 2014. P. 41-46.
- [5] Protopopov R.I. Production-methodological and geological survey works with a scale of 1 : 50 000 – the basis of the state geology maps of the Prikolymsky terrane // Geology and Mineral Resources of the North-East of Russia. Proceedings of the XI All-Russian Scientific and Practical Conference April 05-07, 2021. Yakutsk, 2021. P. 109-112.
- [6] Shkodzinsky V.S., Nedosekin Yu.D., Surnin A.A. Petrology of Late Mesozoic igneous rocks of Eastern Yakutia. Novosibirsk: “Science”, Siberian branch, 1992, 238 pp.

ЗОНА OTOCERAS - УНИКАЛЬНЫЙ ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОБЪЕКТ ЮЖНОГО ВЕРХОЯНИЯ

Степан Рожин¹, Александр Игнатъев¹, Афанасий Килясов²

¹ ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова»,
677000, Россия, г. Якутск, ул. Белинского, 58

² ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

OTOCERAS ZONE - A UNIQUE GEOLOGICAL OBJECT OF THE SOUTH VERKHOYANIE

Stepan Rozhin¹, Aleksandr Ignatiev¹, Afanasy Kilyasov²

¹ North-Eastern Federal University, 58, Belinsky str., Yakutsk, 677000, Russia

² Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. The *Otoceras* zone can be considered a unique geological object in the Southern Verkhoyanie. It is of great interest not only among paleontological researchers, but also among geology students, since the location of the “Tomponsky educational geological survey site of NEFU” is located at 638 km of the Yakutsk-Magadan highway in the valley of the Eastern Khandyga River, where Permian-Triassic deposits containing ammonoids of the genus *Otoceras* are exposed.

The *Otoceras* beds are an important stratum for identifying, tracing and correlating the Permian-Triassic boundary deposits in the Notal and Boreal regions. The structure of the *Otoceras* beds on the right bank of the Setorym River involves two sequences of silty mudstones with a thickness of 10 and 18 m. The network consists of two sequences of silty mudstones with a thickness of 10 and 18 m. In the lower sequence (unit 3), two successive ammonoid complexes are established, allowing it to be divided into the *Otoceras concavum* and *Otoceras boreale* zones. The upper sequence (unit 5) contains rare ammonoids of the advanced species *Otoceras* sp. 1, allowing it to be attributed to the subzone of the same name, located in the upper part of the *Otoceras boreale* zone.

1. Введение

Томпонский учебный геолого-съёмочный полигон СВФУ является уникальным природным объектом, на территории которого вот уже на протяжении пяти десятилетий проходят учебную практику студенты геологоразведочного факультета СВФУ. База учебного полигона расположена на 638 км автотрассы Якутск – Магадан в долине р. Восточная Хандыга. За пятьдесят лет существования учебного полигона полевою геолого-съёмочную практику на его базе прошли более 2000 студентов. Здесь они познакомились с особенностями геологического картирования в условиях горно-таежной местности и получили профессиональные навыки, которые применяют в своей повседневной геологической работе [11, 15].

Территория учебного полигона охватывает толщи средне-верхней перми и нижнего триаса. Большой интерес у студентов-геологов вызывает зона *Otoceras*, каждый студент мечтает найти аммонита в конкреции из этой пачки глинистых сланцев и аргиллитов, располагающейся в подошве триасовых отложений. Граница между имтачанской (P₃im) и некучанской свитами (P₃-T₁nc) отражает уникальные по масштабности перестройки в осадконакоплении и развитии биот: генозона *Otoceras* (пачка аргиллитов нижнекучанской подсвиты верхнечансинского подъяруса верхней перми и нижнеиндского подъяруса нижнего триаса) содержит границу между пермской и триасовой системами, которая разделяет палеозой и мезозой. Пермско-триасовая граница, согласно современной МСШ, расположена не в подошве некучанской свиты, а внутри ее нижней подсвиты (внутри генозоны *Otoceras*) [13, 14].

2. Результаты

Пермские отложения территории учебного полигона относятся к среднему и верхнему отделу: Верхнеменкеченская подсвита ($P_{2-3}mn_3$) сложена толщиной черных аргиллитов и алевролитов, изредка – маломощными слоями известковистых полимиктовых песчаников. Чамбинская свита ($P_3 \text{ \textit{cm}}$) представлена преимущественно песчаниками, в верхней части разреза свиты с песчаниками чередуются прослои или пачки алевролитов и аргиллитов 6-8 метровой мощности, отмечаются линзы и пласты внутриформационных конгломератов мощностью до 2-3 м. Имтачанская свита (P_3im) расчленена на две подсвиты. Нижнеимтачанская подсвита (P_3im_1) сложена чередующимися серыми, зеленовато-серыми, темно-серыми мелко- и среднезернистыми песчаниками и алевролитами с отдельными пластами аргиллитов. Верхнеимтачанская подсвита (P_3im_2) характеризуется ритмичным флишоидного типа чередованием известковистых алевролитов, аргиллитов и мелкозернистых глинистых или тонкоглинистых известковистых песчаников.

Терминальная пермь – нижний-средний триас представлены нижним и средним отделами, расчлененными на некучанскую, харчанскую, сеторымскую свиты нижнего отдела и малтанскую свиту среднего отдела.

Некучанская свита отчетливо подразделяется на две подсвиты, чему способствуют резкие отличия литологического состава слагающих толщ, и содержащиеся в отложениях комплексы фауны, прежде всего аммоноидеи.

Нижнекучанская подсвита ($P_3-T_1nc_1$) является прекрасным маркирующим горизонтом благодаря исключительной выдержанности своего литологического состава и присутствию отоцерасовой фауны. Многими исследователями она выделяется как зона *Otoceras* и представляет собой базальные слои триасовой системы. Подсвита сложена 80-100 метровой толщиной интенсивно рассланцованных темно-серых и черных аргиллитов.

Верхнекучанская подсвита ($P_3-T_1nc_2$) отличается преимущественно песчаным составом и значительно большей мощностью, до 500-600 м, по сравнению с нижней подсвитой. Граница с последней проводится по контрастной смене аргиллитов массивными, часто косослоистыми песчаниками, с редкими прослоями алевролитов [11].

В 1955 г. Угамытская геолого-поисковая партия проводила работы в верховьях р. Сунтар (басс. р. Индигирки) Южного Верхоянья, В.И. Коневцев и С.В. Домохотов в "сланцевом горизонте" некучанской свиты собрали небольшую коллекцию аммоноидей (цератитов рода *Otoceras*).

Л.Д. Кипарисова и Ю.Н. Попов предложили для основания триаса новый ярус глобальной стратиграфической шкалы – индский, стратотипом которого предлагались отоцерасовые слои Гималаев [1, 2].

По данным С.В. Домохотова, на р. Сеторым мощность сланцевого горизонта некучанской свиты, рассматриваемого в качестве стратотипа зоны *Otoceras*, составляет 67–88 м [3].

По решению МСК в 1970 г. было проведено рабочее совещание постоянных комиссий по перми и триасу с проведением полевой экскурсии в верховьях р. Хандыги, в результате которой было установлено деление нижнекучанской подсвиты на две зоны – *Otoceras boreale* и *Glyptohiceras extremum*.

Послойное описание обобщенного разреза нижнекучанской подсвиты было выполнено Ю.В. Архиповым [7].

В верховьях р. Восточной Хандыги В.И. Коростелевым проводились геологосъемочные работы масштаба 1:50000, в процессе которых в пределах площади листа была прослежена и изучена нижнекучанская подсвита, являющаяся хорошим маркирующим горизонтом; ее мощность была определена в пределах 80-100 м, из которых нижние 35 м приходились на отоцерасовые слои [6].

Для решения проблемы биостратиграфического деления отоцерасовых слоев в Южном Верхоянье ключевыми стали исследования А.С. Дагиса с коллегами [8].

В результате послойного изучения ряда разрезов нижнекучанской подсвиты басс. р. Сеторым Р.В. Кутыгиным и др. были уточнены литологическое и биостратиграфическое строение разреза, а также мощности всех выделенных и прослеженных в районе пачек

нижненекучанской подсвиты [4, 5, 10]. Кроме разреза нижненекучанской подсвиты руч. Суол был изучен ряд разрезов отоцерасовых слоев по ручьям Уступный, Шагали, Долгочан, Николкин Ключ, Инессин в басс. р. Сеторым.

В основании некучанской свиты А.С. Бяковым выделяется 40-см слой песчаников, петрографически резко отличающийся от дельтовых песчаников верхов имтачанской свиты.

Выше залегает пачка (мощность 10 м) алевроаргиллитов, содержащая многочисленные карбонатно-кремнистые и глинисто-кремнистые конкреции, в которых обнаруживаются остатки аммоноидей, относящихся к зоне *Otoceras concavum*. В интервале 5.45-9.8 м от подошвы пачки располагается зона *Otoceras boreale*. Выше по разрезу в пачке однородных алевроаргиллитов (мощность 18 м) описаны аммониты, определенные как *Otoceras* sp.

3. Выводы

Таким образом, в строении отоцерасовых слоев в правобережье р. Сеторым участвуют две толщи алевроаргиллитов мощностью 10 и 18 м. В нижней толще (пачка 3) установлены два последовательных аммоноидных комплекса, позволяющие разделить ее на зоны *Otoceras concavum* и *Otoceras boreale*. Верхняя толща (пачка 5) содержит редкие аммоноидеи продвинутого вида *Otoceras* sp. 1, позволяющие относить ее к одноименной подзоне, располагающейся в верхней части зоны *Otoceras boreale* [10].

Бяков А.С. в нижней части отоцерасовых слоев Томпонского полигона установил обширный позднечансинский комплекс двустворчатых моллюсков, появление которого связывается с завершением первого эпизода вымирания позднепермской фауны [12].

4. Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность Р.В. Кутыгину (ИГАБМ СО РАН, г. Якутск) за ценные советы и замечания. Работа выполнена в рамках государственного задания ИГАБМ СО РАН (FUFPG-2024-0005).

5. Литература:

- [1] Popov Yu.N. *Otoceras* from the Lower Triassic of the Eastern Verkhoyansk region. *Materialy po geologii i poleznom iskopaemym Severo-Vostoka SSSR*, 1956, iss. 10, pp. 152–155 (in Russian).
- [2] Kiparisova L.D., Popov Yu.N. Division of the Lower Triassic System into Stages. *Doklady AN SSSR*, 1956, vol. 109, no. 4, pp. 842–845 (in Russian).
- [3] Domokhotov S.V. The Induan Stage and the *Otoceras* Zone of the Eastern Verkhoyansk region. *Materialy po geologii i poleznom iskopaemym Yakutskoj ASSR*, 1960, iss. I, pp. 111-120 (in Russian).
- [4] Kutygin R.V., Budnikov I.V., Biakov A.S., Davydov V.I., Kilyasov A.N., Silantiev V.V. First findings of *Otoceras* (Ceratitida) in the Kobyuma Zone of the Southern Verkhoyansk Region, Northeastern Russia. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta-Seriya Estestvennye Nauki*, 2019, vol. 161, no. 4, pp. 550–570 (in Russian).
- [5] Kutygin R.V. *Otoceras* beds in the Setorym River basin and the problem of the Permian–Triassic boundary in the Southern Verkhoyanie. In: Lebedeva N.K., Goryacheva A.A., Dzyuba O.S., Shurygin B.N. (Eds.). *Paleontology, Stratigraphy and Paleogeography of the Mesozoic and Cenozoic in Boreal Regions*. Novosibirsk, IPGG SB RAS, 2021, pp. 110–114.
- [6] Korostelev V.I. Triassic deposits of the Eastern Verkhoyansk region. Yakutsk, Knizhnoe izdatel'stvo, 1972, 174 pp. (in Russian).
- [7] Arhipov Yu.V. Stratigraphy of the Triassic deposits in East Yakutia. Yakutsk, Knizhnoe izdatel'stvo, 1974, 312 pp. (in Russian).
- [8] Dagens A., Ermakova S. Induan (Triassic) ammonoids from north-eastern Asia. *Rev. paleobiol.*, 1996, vol. 15, no. 2, pp. 401–447.
- [9] Ermakova S.P., Kutygin R.V. The Induan Stage in the Eastern upper Yana region. *Russian Geology and Geophysics*, 2000, vol. 41, no. 5, pp. 649–656.

- [10] Kilyasov A.N., Kutygin R.V. On the lithological and biostratigraphic division of *Otoceras* beds on the right bank of the Setorym River, Southern Verkhoyanie, 2022, pp. 61-67. (in Russian).
- [11] Educational geological survey practice at the Tomponsky test site named after V.I. Korostelev: textbook. Vol.2. Zhizhin V.I., Oksman V.S., Rozhin S.S., Pulyaev N.A., Filippov V.R. - Yakutsk: NEFU Publishing House, 2012. 92 pp. (in Russian).
- [12] Biakov A.S., Kutygin R.V., Goryachev N.A., Burnatny S.S., Naumov A.N., Yadrenkin A.V., Vedernikov I.L., Tretyakov M.F., Brynko I.V. Discovery of the Late Changhsingian Bivalve complex and two fauna extinction episodes in Northeastern Asia at the end of the Permian // Doklady Biological Sciences. 2018. Vol. 480, Iss. 1. P. 78–81.
- [13] Zakharov Y.D., Biakov A.S., Horacek M. Global Correlation of Basal Triassic Layers in the Light of the First Carbon Isotope Data on the Permian–Triassic Boundary in Northeast Asia // Russian Journal of Pacific Geology. 2014. Vol. 8. No.1. P. 1–17.
- [14] Biakov A.S., Zakharov Yu.D., Horacek M., Richoz S., Kutygin R.V., Ivanov Yu.Yu., Kolesov E.V., Konstantinov A.G., Tuchkova M.I., Mikhailitsyna T.I. New data on the structure and age of the terminal Permian strata in the South Verkhoyansk region (northeastern Asia) // Russian Geology and Geophysics. 2016. V. 57, № 2. pp. 282–293.
- [15] Tretyakova O.G., Popov V.F., Rozhin S.S., Tretyakova N.M. Didactic foundations of on-site geological practices at the geological exploration faculty of the North-Eastern Federal University named after. M.K. Ammosova. Moscow, publishing house Moscow Pedagogical State University, journal Pedagogy and Psychology of Education, 4/2023. (in Russian).

УДК 551.345

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД ВЕРХОВЬЕВ Р. КОЛЫМЫ

Дмитрий Абрамов^{1,2}, Ольга Макарьева^{1,3}, Анастасия Землянскова^{1,3}, Андрей Остахов^{1,4},
Наталья Нестерова^{1,4}

¹ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет» Институт наук о Земле
199034, Россия, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7–9

² ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова»,
119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, 1

³ ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет»,
685000, Россия, г. Магадан, ул. Портовая, 13

⁴ ФГБУ «Государственный гидрологический институт», 199034, Россия, , г. Санкт-Петербург, 2-
я линия В.О., 23

PERMAFROST TEMPERATURE REGIME IN THE UPPER KOLYMA RIVER

Dmitrii Abramov^{1,2}, Olga Makarieva^{1,3}, Anastasia Zemlyanskova^{1,3}, Andrey Ostashov^{1,4},
Natalia Nesterova^{1,4}

¹ Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg State University, 7-9, University nab. St. Petersburg,
199034, Russia

² Lomonosov Moscow State University, 1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

³ North-Eastern State University, 13, Portovaya str., Magadan, 685000, Russia

⁴ State Hydrological Institute, 23, 2 line, St. Petersburg, 199034, Russia

Abstract. For year-round monitoring of the permafrost in the upper Kolyma basin ten thermometric wells up to 15 m deep were drilled and equipped in 2021-2022. The wells are located at altitudes from 618 to 1182 m in characteristic mountain landscapes such as rocky talus, mountainous tundra and sparse larch-forest. Continuous 4-hour monitoring of soil temperature at various depths is carried out. Data were obtained on the average annual temperature of ground, the depth of seasonal thawing/freezing. Further development of the regional monitoring network is planned on the basis of the data and experience gained.

1. Введение

Магаданская область, расположенная в зоне распространения многолетнемерзлых пород (ММП) является одним из стратегически важных регионов, по добыче россыпного золота и количеству прогнозных ресурсов коренного золота занимает первое и второе место в России соответственно. Для обеспечения инженерно-хозяйственной деятельности в регионе необходимо изучение криолитозоны, так как с ее трансформацией может быть связан значительный ущерб для инфраструктуры региона [1].

Для оценки состояния и динамики ММП, а также построения прогнозов и оценки геокриологических рисков, основной характеристикой является температура грунта. Наиболее востребованный метод для оценки реакции ММП на изменение условий – установка режимных наблюдений на термометрических скважинах. Тем не менее, для регионов криолитозоны России сеть наблюдений за температурой грунтов очень разрежена, а ряды данных имеют разную продолжительность. Геотехнический мониторинг, выполняющийся на предприятиях, не

учитывает фоновые условия состояния ММП, что не позволяет в полной мере обеспечить надежность прогнозов и рекомендаций по строительству и эксплуатации инженерных сооружений [2].

В связи с развитием государственной сети геокриологического мониторинга Росгидромет планирует оборудовать не более трех термометрических скважин глубиной 30 м в населенных пунктах Сусуман, Усть-Омчуг и Омсукчан (Рисунок 1). При успешной реализации планов Росгидромет первые данные о температуре ММП будут получены только в 2026 г [3]. На территории Магаданской области расположена сеть скважин Северо-Восточной мерзлотной станции ИМЗ СО РАН, сведения о данных по двум действующим скважинам опубликованы в глобальной сети мониторинга криолитозоны (Global Terrestrial Network for Permafrost). На метеорологических станциях Росгидромет Магаданской области в г. Магадан и г. Сусуман ведутся наблюдения за температурой грунтов до глубины 3.2 м. С учетом разнообразия природных условий региона такое количество скважин является недостаточным.

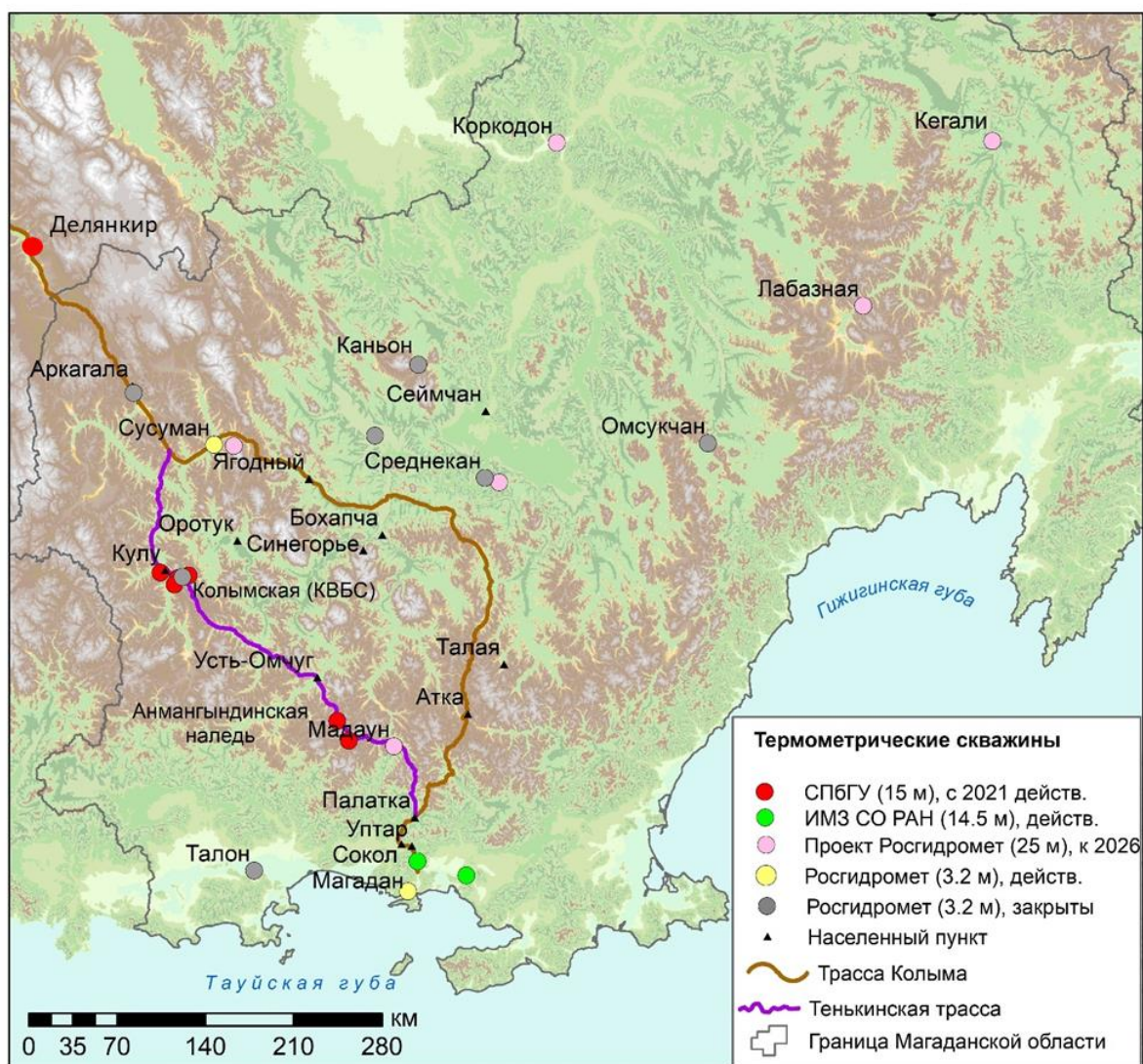


Рисунок 1 – Схема наблюдательных пунктов Магаданской области за всю историю изучения

2. Обустройство мониторинговых скважин

Территория исследования

Термометрические скважины расположены в непосредственной близости от Тенькинской трассы в пределах Тенькинского городского округа Магаданской области: одна из них в долине р. Бускэчэн, одна в долине р. Делянكير, четыре – в бассейне р. Анмангынды (приток р. Детрин, правый приток р. Колымы), четыре – в бассейне р. Кулу.

В физико-географическом отношении Тенькинский район располагается в пределах Верхне-Колымского нагорья на западе Магаданской области. Площадь района составляет 35.6 тыс. км². Рельеф горный, расчлененный многочисленными водотоками, характеризуется большими перепадами абсолютных высот – до сотен метров.

Климат района – континентальный. Средняя годовая температура воздуха по данным метеостанций Усть-Омчуг (1946-2020 гг.) и Колымская водно-балансовая станция (КВБС) (1949-2014 гг.) составляет – 9.8 °С и –11.3 °С, средняя температура наиболее холодного месяца (январь) –33.4 °С и –34.0 °С, средняя температура воздуха наиболее теплого месяца (июль) +14.6 °С и +13.6 °С соответственно. Средние месячные значения температуры воздуха отрицательны в течение семи месяцев с октября по апрель включительно. Количество осадков в пос. Усть-Омчуг и на КВБС составляет 341 и 354 мм в год соответственно. В холодный период года выпадает около 30-40% осадков. Снежный покров формируется к середине октября и разрушается в конце мая.

Методика исследования

Бурение скважин проводилось в два этапа. В конце августа 2021 г. были пробурены 4 скважины глубиной от 5 до 15 м в бассейне р. Анмангында и еще 1 на границе Магаданской области и Республики Саха (скв. Делянкир). Бурение проводилось ударным способом на установке УРБ 2А2М без извлечения керна.

Второй этап бурения еще пяти скважин произведен в июле 2022 года с помощью буровой установки с отбором и описанием керна. Глубина всех скважин, оборудованных на втором этапе, составила 15 м.

Все скважины обсажены пластиковой трубой, с внешней стороны засыпаны грунтом, а сверху изолированы от проникновения атмосферного воздуха и влаги. Для наблюдения используются логгеры фирмы «Импеданс» (г. Москва). Интервал измерения температуры составляет 4 часа. Девять из десяти скважин имеют глубину 15 м.

Глубина расположения датчиков на 5 и 15-метровых термокосях представляет собой следующую схему: от поверхности до глубины 0.5 м датчики расположены через 0.1 м, далее до глубины 1.5 м через 0.25 м, от 1.5 до 5 (15) м через 0.5 м, дополнительный датчик расположен на глубине 4.75 (14.75) м.

Результаты исследования

К настоящему моменту получены ряды данных о температуре пород за гидрологический год (01.10.2021 – 30.09.2022) по 4 из 10 скважин, а также распределение температуры пород по глубине к окончанию летнего сезона 2023 г. на пяти других скважинах. За неполный год получены данные по скважине «Делянкир» (период 01.10.2021 – 15.03.2022).

Данные позволяют оценить характеристики ММП территории исследования, такие как среднегодовая температура пород T_{cp} , глубина ξ и скорость сезонного оттаивания/промерзания (Таблица 1).

Наиболее суровые геокриологические условия наблюдаются в скважинах, расположенных на высоте более 1000 м: скв. «Гольцы», «Перевал Кулу», «Сопка». Они отличаются низкой среднегодовой температурой пород: -3.8; -2.4; -3.2 °С соответственно.

Скважины, расположенные в долинах рек на более низких абсолютных высотах и отличающиеся наличием густой растительности, имеют более высокую температуру пород. Две из этих скважин расположены в таликах (скв. «Наледь» и «Солонцовый»). В скв. «Наледь» подрусловой талик мощностью 8.5 м обусловлен обогревающим влиянием поверхностных и подземных вод, тогда как образование талика в скв. «Солонцовый» на данном этапе объяснить трудно, учитывая малую глубину (5 м) скважины и недостаток метеорологических данных.

Таблица 1 – Характеристики исследуемых скважин

Скважина	Широта	Высота, м	Элемент рельефа	Литологический состав отложений	H ₀	ξ , м
----------	--------	-----------	-----------------	---------------------------------	----------------	-----------

Гольцы	61° 50'	1182	Плоский водораздел	Глыбовая осыпь, подстилаемая гранодиоритами	-3.8	1.9
Перевал Кулу	61° 45'	1170	Плоский водораздел	Дресва, подстилаемая песчано-алевритовыми сланцами	-2.4	1.3
Сопка	60° 50'	1027	Плоский водораздел	Дресва, подстилаемая глинистыми сланцами	-3.2	1.3
Бускэчен	60° 40'	978	Н/п терраса р. Бускэчен	Галечник с песчаным и супесчаным заполнителем	-0.6	1.6
«Верхний»	61° 50'	961	Н/п терраса	Песок с прослоями супеси, подстилаемый трещиноватыми гранодиоритами	-0.6	2.6
Солонцовый	60° 50'	803	Н/п терраса	Супесь с включениями щебня	1.5	2.6
Делянкир	63° 50'	801	Н/п терраса	Галечник с супесчаным заполнителем	-6.9	-
Наледь	60° 50'	744	Пойма	Галечник с песчаным заполнителем	-0.1	3.6
ГП2	60° 50'	712	Н/п терраса р. Анмангынды	Суглинок с включениями гальки и щебня	-1.8	0.9
Поселок Кулу	61° 50'	618	Н/п терраса р. Кулу	Супесь с включениями щебня и дресвы	-2.5	1.7

3. Выводы

Таким образом, в пределах одного района геокриологические условия существенно отличаются. По полученным данным среднегодовая температура мерзлых грунтов составляет от – 0.1 °С до – 3.8 °С. Глубина сезонного оттаивания колеблется в пределах 0.9 – 2.6 м. А глубина сезонного промерзания в обнаруженных таликовых зонах составляет 2.6 м. Дальнейший мониторинг и развитие сети позволит проследить динамику, выявить тренды изменения температурного режима, а также даст возможность делать прогноз изменения криолитозоны района исследований.

4. Благодарности

Исследование проводится при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета в рамках проекта «Комплексная оценка естественных и антропогенных факторов интенсификации водообменных процессов криолитозоны в условиях изменения климата».

5. Литература:

- [1] Dmitry A Streletskiy et al Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost / Environ. Res. Lett. – 2019. – 14 (2019) 025003
- [2] Melnikov V. P. et al. Climate warming and permafrost thaw in the Russian Arctic: Potential economic impacts on public infrastructure by 2050 //Natural Hazards. – 2022. – Т. 112. – №. 1. – С. 231-251.
- [3] Verkulich S. R., Demidov N. E., Anisimov M. A. Development of a project for the organization of monitoring of high-latitude Arctic permafrost based on the Roshydromet observation network .Russian Polar Research – 2021. – Т. 43 – №1. – p. 23-27.

ОЦЕНКА ПОСТУПЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ЛЕТНЕЙ АТМОСФЕРЫ

Татьяна Аянитова¹, Владимир Макаров²
ФГБУН «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН»,
677010, Россия, г. Якутск, Мерзлотная, 36

ASSESSMENT OF CHEMICAL ELEMENT INPUT FROM THE SUMMER ATMOSPHERE

Tatyana Ayanitova¹, Vladimir Makarov²
Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36, Permafrost str., Yakutsk, 677010, Russia

Abstract. The results of monitoring observations for chemical composition and the amount of precipitation of chemical components with precipitation during the warm period of 2023. The chemical composition of precipitation remains stable calcium bicarbonate, slightly mineralized (10-34 mg/l), approximately neutral (pH = 7.19). The maximum contrast of influx with precipitation in different periods of the warm season (spring/autumn) is typical for hydrocarbonates, chlorides, sulfates, nitrogen compounds, Sr, Ba, F, P. The total density of atmospheric precipitation is minimal in May - 1.52, maximum in June - 19.09 and July - 14.05 g/m². An environmental assessment of the density of deposition of chemical elements showed that the maximum value of deposition of priority atmospheric pollutants (S, C, H) does not exceed the environmental norm. The average level of precipitation of the sum of nitrogen compounds is an order of magnitude higher than the environmental norm, and the maximum in June is more than twice the level of an environmental emergency. Ecologically unfavorable periods of abnormal levels of pollutants in the atmosphere are confined to periods of maximum precipitation volumes.

1. Введение

Выпадение химических загрязняющих веществ из атмосферы – одна из больших проблем в области охраны окружающей среды, как на национальном, так и международном уровнях [1,2]. Атмосферные выпадения представляют собой конечный продукт ряда сложных процессов, включающих эмиссию первичных продуктов химических реакций, их химические преобразования в воздухе, физический перенос загрязняющих веществ в атмосфере и, наконец, выпадение сухих и мокрых осадков. Химический состав атмосферных выпадений остаётся ключевым вопросом при определении последствий выпадений и распространения загрязняющих атмосферу веществ [3,4]. Основная масса загрязнителей поступает с влажными выпадениями атмосферных осадков. Известна взаимосвязь загрязняющих веществ, присутствующих в осадках, и ухудшение состава поверхностных вод, а затем и почвенного покрова. Одной из наиболее важных задач является обеспечение экологической безопасности селитебных зон. Экологическая опасность загрязнения природной среды городов стала одной из актуальных проблем современности. В настоящее время интенсивно изучается техногенное накопление микро- и макроэлементов в окружающей среде городов [5,6]. Между тем, практически отсутствуют данные по геохимическим особенностям северных городов, расположенных в криолитозоне.

Цель исследований – выявить особенности миграции и концентрации химических элементов в атмосфере Якутска - северного города, расположенного в криолитозоне.

Основные задачи исследований включали определение величины атмосферной нагрузки на поверхностные воды и почвенного покрова; выявление особенностей химического состава атмосферных выпадений и дать экологическую оценку атмосферных осадков в Якутске.

2. Материалы и методы

Изучение объема испарения с поверхности грунтов и атмосферных осадков проведено на комплексном геоэкологическом стационаре Института мерзлотоведения СО РАН «Туймаада» (КГСТ), в теплый период 2023 г. КГСТ расположен в Центральной Якутии, на II надпойменной

террасе р. Лены в пригородной юго-западной части г. Якутска и представляет собой почти горизонтальную поверхность с альтитудой около 110 м (Рисунок 1).

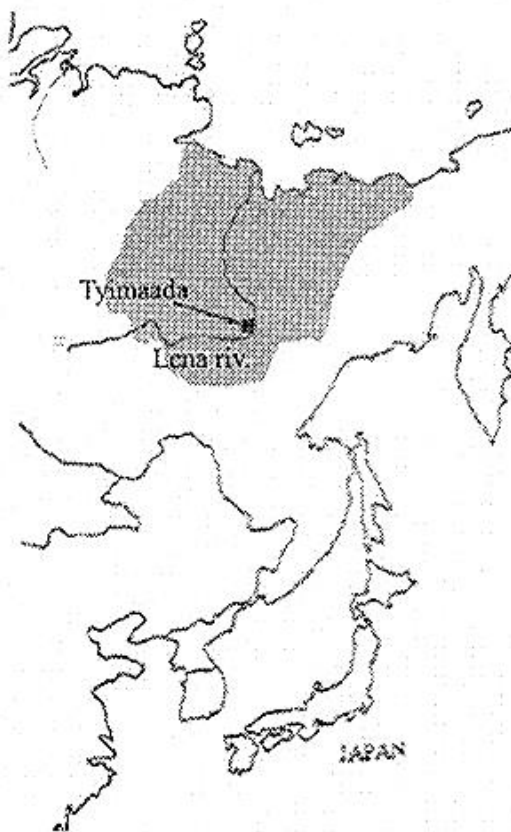


Рисунок 1 – Расположение КГСТ в Центральной Якутии

Площадка мониторинга находится на расстоянии около 100 м от автодороги. Аппаратура установлена в центре, на дощатой площадке, на высоте 1,2 м над поверхностью земли. Прибор надежно закреплен, лицевая сторона аппаратуры располагается с подветренной стороны.

Выбор места для установки аппаратуры по сбору осадков отвечает следующими основными параметрами:

- место установки аппаратуры обычное, где отсутствуют специфические источники загрязнения осадков.
- в радиусе 50 м от аппаратуры нет объектов, затрудняющих отбор образцов (линий электропередач, электропроводов и т.п.).
- вблизи аппаратуры нет никаких объектов (деревьев, высоких кустарников).
- ландшафт исключает запыление воздуха.

Химический анализ осадков выполняется в лаборатории подземных вод и геохимии криолитозоны ИМЗ СО РАН (аналитики Т.А. Аянитова, Л.Ю. Бойцова, С.А. Потапова и О.В. Шепелева). В образцах осадков определяется содержание макро- и мезокомпонентов: SO_4^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} ; микроэлементов – Cs, Li, Sr, Ba, F, P; измеряется величина рН, Eh и электропроводности (ЕС).

Количество выпадений из атмосферы (Р) поступающих с осадками на земную поверхность рассчитывалось по формуле:

$$P = \frac{100 \cdot C \cdot V}{\pi \cdot r^2}, \text{ мг/м}^2,$$

где С - концентрация в растворе образца, мг/мл; V - исследуемый объем, мл; r – радиус горлышка сосуда с образцом, мм.

В таблице 1 приведен перечень основных особенностей, достоинств и недостатков принятого метода отбора осадков.

Таблица 1 – Основные особенности, достоинства и недостатки метода фильтрации.

Достоинства	Особенности
<ul style="list-style-type: none"> – Собирает все виды выбросов; – контроль над испарением позволяет устанавливать объемы осадков; – нет необходимости проводить фильтровальные работы в лаборатории, что экономит время; – вызывает небольшую абсорбцию воздуха; – способы фильтрации и отделения снижают до минимума возможные изменения, порождаемые микроорганизмами 	<ul style="list-style-type: none"> – Требуется осторожное обращение с воронкой (возможно использование стеклянной воронки); – в качестве фильтровального материала желательно использовать фибры; – необходимо проводить анализ промывочной воды после промывки воронки и нерастворимых частиц (осадков)
Недостатки	
<ul style="list-style-type: none"> - Отсутствует возможность уничтожения сухих выбросов и, следовательно, ограничен диапазон изучаемых форм выбросов; – ячеиковая структура фильтра подвержена засорению осадками; – отсутствует защита от проникновения насекомых; – низкая аккумулирующая степень сбора сухих образцов 	

Период сбора пробы осадков – один месяц. В течение этого периода в фильтровальном аппарате собирается достаточное количество материала для анализа [7,8]. Образцы отбираются в первый понедельник месяца. Обоснование комплекса определяемых элементов в образцах атмосферных осадков, имеющих важное экологическое значение, показано в таблице 2.

Таблица 2 – Компоненты анализа и необходимость определения.

Измеряемые параметры	Обоснование
SO ₄ ²⁻	Серная нагрузка
NO ₃ ⁻	Азотная нагрузка
NH ₄ ⁺	Азотная нагрузка
Cl ⁻	Обусловлено веществами морского происхождения
Na ⁺	Обусловлено веществами морского происхождения
Ca ²⁺	Обусловлено веществами почвенного происхождения
pH	Основной параметр, характеризующий кислотность-щелочность
Электропроводность	Характеризует общее количество растворенных веществ
Eh	Величина определяются, главным образом, содержанием кислорода
Cs ⁺	Супертотксичный элемент
Li ⁺	Эссенциальный элемент 2-го класса опасности
Sr ²⁺	Тотксичный элемент 2-го класса опасности
Ba ²⁺	Тотксичный элемент 4-го класса опасности
F ⁻	Жизненно необходимый, но тотксичный 2-го класса опасности
HPO ₄ ²⁻	P – жизненно необходимый, но сильно тотксичный элемент. Главный компонент эвтрофирования водоёмов.

3. Результаты и обсуждение

Результаты наблюдений за химическим составом атмосферных осадков в теплый период 2023 г. приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Химический состав атмосферных осадков в теплый период года, мг/л.

Компоненты	Теплый период 2023 года		
	Среднее	Min	Max
pH	7,19	6,84	7,53
Минерализация	18,2	9,7	33,6
EC ,ms/cm	28,6	23,0	40,0
Eh, мВ	393	370	407
HCO ₃ ⁻	16,35	10,67	23,66
SO ₄ ²⁻	1,01	0,80	1,30

NO ₂ ⁻	0,060	0,025	0,140
NO ₃ ⁻	0,820	0,600	1,200
Cl ⁻	0,956	0,500	1,800
Ca ²⁺	2,660	1,500	3,800
Mg ²⁺	0,300	0,300	0,300
Na ⁺	0,750	0,400	1,400
NH ₄ ⁺	3,460	0,200	11,8
Si ²⁺	0,0035	0,0019	0,0097
Ba ²⁺	0,0027	0,0004	0,0057
F ⁻	0,0186	0,0025	0,0362
HPO ₄ ²⁻	0,0798	0,0004	0,3629
Осадки, мм	20,49	7,01	47,13

Ежемесячное количество атмосферных осадков за период наблюдений изменялось от 7 мм (май) до 45-47 мм (июнь и июль), при среднемесечном объеме выпадений 20,5 мм. Кислотность осадков колебалась в пределах значений pH от 6,84 до 7,53 (от слабокислых до щелочных) и составляла в среднем pH 7,19. Величина электропроводности осадков, характеризующая общее количество растворенных веществ в атмосферных осадках в теплый период года, изменяется в небольшом диапазоне 23-40 $\mu\text{S}/\text{см}$ (минимум в мае-июле, максимум в сентябре), при средних значениях около 29 $\mu\text{S}/\text{см}$. Это связано с тем, что весной в результате повышения температуры и схода снежного покрова в приземных слоях атмосферы начинает развиваться конвекция, и незакрепленные растительным покровом частицы почвы поднимаются в воздух, а выпадающие осадки вымывают и адсорбируют из них растворяющиеся вещества. Суммарная плотность атмосферных выпадений была минимальной в мае -1,52 и максимальной в июне - 19,09 и июле - 14,05 г/м, соответственно (Таблица 4).

Таблица 4 – Плотность атмосферных выпадений в 2023 г., г/м².

Период наблюдений	H ⁺ 10 ⁻²	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	Ca ²	Mg ²	Na ⁺	NH ₄ ⁺	Сумма выпадений
29.04 – 31.05	0,102	0,897	0,109	0,002	0,072	0,151	0,126	0,025	0,118	0,017	1,518
31.05 – 29.06	0,346	8,175	0,452	0,040	0,452	0,497	2,148	0,170	0,481	6,671	19,086
29.06 – 29.07	0,226	8,575	0,537	0,017	0,679	0,283	1,753	0,170	0,283	1,753	14,050
29.07 – 31.08	0,095	6,861	0,424	0,054	0,231	0,231	0,810	0,116	0,154	0,617	9,498
31.08 – 29.09	0,147	5,893	0,224	0,009	0,159	0,249	0,697	0,075	0,149	0,149	7,605
Среднее	0,183	6,080	0,349	0,024	0,319	0,282	1,107	0,111	0,237	1,842	10,351
Минимальное	0,102	0,897	0,109	0,002	0,072	0,151	0,126	0,025	0,118	0,017	1,518
Максимальное	0,346	8,575	0,729	0,054	0,679	0,497	2,148	0,170	0,481	6,671	19,086

Выполнена экологическая оценка объема выпадений ряда приоритетных атмосферных загрязнителей. Среднегодной поток выпадения, рассчитанный по сумме ежемесячных выпадений составил: для серы - 0,120, азота - 1,508, углерода - 1,192 г/м² год, водорода - 0,183·10⁻² г/(м²·год). Средняя величина показателей выпадений приоритетных атмосферных загрязнителей (S, C, H), не превышает экологической нормы. Средний уровень выпадения суммы соединений азота на порядок выше экологической нормы, а максимальное поступление соединений азота из атмосферы, в июне, более чем в два раза превышает уровень чрезвычайной экологической ситуации (Таблица 5).

Таблица 5 – Экологическая оценка объема летних выпадений приоритетных атмосферных загрязнителей, 2023 г.

Параметры [9]	Сера, г/м ² год	Азот, г/м ² год	Углерод, г/м ² год	Ионы водорода, 10 ⁻² г/м ² год
Среднее	0,120	1,508	1,192	0,183
Максимальное	0,185	5,292	1,681	0,346
Экологическая норма	< 0,32	< 0,28	-	< 20

4. Выводы

Анализируются результаты мониторинговых наблюдений за химическим составом и величиной выпадения химических компонентов с атмосферными осадками на поверхностные воды и почвенный покров в теплый период 2023 г.

С мая по сентябрь химический состав атмосферных осадков остается стабильным гидрокарбонатно-кальциевым, слабоминерализованным (10-34 мг/л), преимущественно около нейтральным (рН=7,19).

Содержание большинства химических элементов в осадках выше в июне и понижается во второй половине теплого времени. Максимальная контрастность поступления с осадками в различные периоды теплого времени года (весна/осень) характерна для гидрокарбонатов, хлоридов, сульфатов, соединений азота, Sr, Ba, F, P: КК = 2-10. Более равномерно в течение теплого времени года поступление с осадками остальных элементов.

Суммарная плотность атмосферных выпадений была минимальной в мае -1,52, максимальной в июне - 19,09 и июле - 14,05 г/м². Повышение плотности атмосферных выпадений связано с увеличением объема поступления с осадками в основном гидрокарбонатов, соединений азота и кальция.

Экологическая оценка объема выпадений ряда приоритетных атмосферных загрязнителей показала, что среднелетний поток выпадения составил: серы - 0,120, азот - 1,508, углерод - 1,192 г/м² год, водород - 0,183·10⁻² г/(м² год). Максимальная величина выпадений приоритетных атмосферных загрязнителей (S, C, H), не превышает экологической нормы. Средний уровень выпадения суммы соединений азота на порядок выше экологической нормы, а максимальное поступление соединений азота в июне, более чем в два раза превышает уровень чрезвычайной экологической ситуации. Экологически неблагоприятные периоды аномальных содержаний загрязняющих веществ в атмосфере приурочены к периодам максимальных объемов выпадения атмосферных осадков.

5. Благодарности

Исследования выполнены при поддержке комплексной программы фундаментальных научных исследований ИМЗ СО РАН (Проект СО РАН АААА-А20-120111690008-9).

6. Литература:

- [1] Israel Yu.A. Ecology and control of the state of the natural environment. – L.: Gidrometeoizdat, 1984. – 560 p.
- [2] Assessment on Acidifying Pollutants, Arctic Haze and Acidification in the Arctic. The Arctic Monitoring and Assessment Project (AMAP). – Oslo, Norway, 2005. – pp. 86.
- [3] Spedding D.J. Air Pollution. – Oxford: Clarendon Press, 1974. – 76 p.
- [4] Isidorov V.A. Organic chemistry of the atmosphere. – L.: Chemistry, 1985. – 264 p.
- [5] Urban Ecology (2004) Ed. N.S. Kasimova. M.: Scientific world, 624 p.
- [6] Fukasawa T., Onta S., Murao N., Yamagata S., Makarov V.N. Aerosol observation in the Siberian Arctic // J. of Global Environment Engineering. – 1997. – Vol. 2. – pp. 1–9.
- [7] Methodological recommendations for geochemical assessment of urban contamination with chemical elements. - M.: IMGRE, 1982. – 112 p.
- [8] Reznikov A.A., Mulikovskaya E.P., Sokolov I.Yu. Methods for analyzing natural waters. – M., 1970. – 488 p.
- [9] Criteria for assessing the environmental situation of territories to identify zones of environmental emergency and zones of environmental disaster. – M.: Ministry of Environmental Protection of the Russian Federation, 1992. – 48 p.

ОПЫТ ПОЧВЕННО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ И ПОЧВЕННО-КАРТОГРАФИЧЕСКИХ РАБОТ В ЗОНАХ ИНТЕНСИВНОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

Ирина Белозерцева^{1,2}, Наталия Власова¹, Ирина Воробьева¹, Андрей Сороковой¹, Дарья Лопатина¹, Алексей Шеховцов¹, Надежда Зверева¹, Никита Скосырский¹

¹ ФГБУН Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН

Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1

² ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»,

664003, Россия, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1

EXPERIENCE OF SOIL-GEOCHEMICAL AND SOIL-MAPPING WORKS IN ZONES OF INTENSIVE WILDLIFE MANAGEMENT

Irina Belozertseva^{1,2}, Natalia Vlasova¹, Irina Vorobyeva¹, Andrey Sorokovoy¹, Daria Lopatina¹, Alexey Shekhovtsov¹, Nadezhda Zvereva¹, Nikita Skosyrsky¹

¹ Institute of Geography V.B. Sochava SB RAS, 1, Ulaanbaatar str., Irkutsk, 664033, Russia

² Irkutsk State University, 1, Karl Marx str., Irkutsk, 664003, Russia

Abstract. Concentration of large ecologically dangerous industrial productions in Siberia, lack of the effective clearing equipment and a complex of adverse meteorological factors led to that in its territory there were areas with an unsuccessful ecological situation. The largest sources of soil pollution are combines of ferrous and nonferrous metallurgy. There is some data of researches from authors of technogenic impact on soils, which locate close to aluminum manufacture. By results of the works lead by author, the characteristic of a chemical compound of soils territories oil fields and gas of a Leno-Angarsk plateau and territory of extraction of gold and tin in East Sayan and in Transbaikalian edge is given. On the basis of long-term researches in territory of Russia and Mongolia mapping degradation and pollution of soils in territory of pool of lake Baikal is carried out.

1. Введение

Общая площадь нарушенных земель Сибири составляет 126 тыс. га. На долю предприятий горнодобывающей и металлургической промышленности приходится 80 % нарушенных земель [1]. Ежегодно нарушается около 3 тыс. га земель, происходит более 1 аварии на нефтедобывающих предприятиях и на почвы вытекает до 2 т нефти. Наибольшие масштабы аварий, связанных с разливами нефти и утечкой газа зафиксированы в Томской, Тюменской и Иркутской областях [2]. В Сибири находится 1/3 городов России с наиболее сильной степенью загрязненности. В перечень городов с наибольшим уровнем загрязнения почв входят Норильск, Новокузнецк, Братск, Шелехов, Иркутск, Улан-Удэ и др. Возросли площади бросовых земель в Сибири. Более половины сельскохозяйственных земель Байкальского региона имеют сильную степень эродированности [3, 4]. В 1994-2023 гг. авторами в составе комплексных географических экспедиций проведены почвенно-геохимические и почвенно-картографические работы в зонах интенсивного природопользования Байкальского региона (Иркутской агломерации, газоконденсатного месторождения на территории Ленно-Ангарского плато, добычи золота в Восточном Саяне и бассейне р. Онон и пр.). Анализы почв проведены в ИГ СО РАН по стандартным методикам. Приведем некоторые результаты исследований в зонах интенсивного природопользования.

2. Результаты исследований

Горнопромышленный комплекс представляет собой опасный источник разрушения и загрязнения почв. Особенно это хорошо видно на примере территорий добычи нефти, газа, угля. Наибольших масштабов воздействия горнопромышленный комплекс приобретает в связи

с авариями, разливами нефти, утечкой газа. В результате проведенных почвенно-геохимических исследований выявлено, что почвы большинства буровых площадок газоконденсатного месторождения на территории Ленно-Ангарского плато относятся к слабо загрязненным, когда превышение содержания ряда элементов (Pb, Zn, Cu, Ni, Cr, Ba) равно 1,5-2 ПДК. Почвы буровых площадок в центральной, наиболее освоенной части газоконденсатного месторождения, где концентрация элементов первого класса опасности (Pb и Zn) превышает ПДК в 3-7 раз, относятся к категории сильного загрязнения. Наряду с техногенным источником солевого загрязнения имеет место также природный источник – пластовые рассолы, свойственные гидрогеологической среде данного района. При глубинном бурении случаются аварийные выбросы напорных подземных вод. Сильная минерализация выявлена в почве вблизи нерекультивированной буровой скважины в верховьях р. Типуй (1,7 %) и в районе буровой скважины № 18 (5,6 %), на которой произошла авария в 2004 г. Авария связана с выбросом на поверхность 2200 м³ напорного пластового высокоминерализованного рассола (рапы) с глубины около 2000 м (зона контакта бельской и усольской свит нижнего кембрия) и стеканием рапового потока в долину р. Орлингская Нюча. В пространственное распределение нефтепродуктов в почвенном покрове существенный вклад вносит их накопление в техноземах, в 2-10 раз превышающее фоновое содержание. Фоновое содержание нефтепродуктов в почвах территории Ковыктинского газоконденсатного месторождения составляет 21,7 мг/кг. Очень высокое содержание нефтепродуктов, превышающее ОДК (1 г/кг) обнаружено в районе одной законсервированной буровой скважины.

Артели по добыче золота, которые находятся в Забайкалье, вскрывая и перемалывая десятки километров речных долин - оставляют «каменные сады», где наблюдаются многометровые отвалы гравия, а реки разделены на сеть канав. За 20 лет работы ими преобразовано до неузнаваемости 70 % рек Кыринского района. Восстановление почв и растительности происходит медленно из-за малого количеству осадков в Забайкалье. По результатам исследования физико-химических свойств почв в Забайкальском крае выявлено их подщелачивание в почво-грунтах после добычи золота и олова. Обнаружено повышенное содержание в грунтах отвалов после добычи олова - Fe, Mn, Cu, Pb, Cd и Zn. Содержание марганца здесь превышает ПДК в 1,8 раз, а свинца – в 11. Концентрации цинка превышают ОДК в 7,8 раз, а меди – в 2,5 раза их фоновые значения. В районе отвалов после добычи золота наблюдается повышенное содержание Mn и Ba, превышающее их фоновые концентрации в 1,6 - 3 раза.

В Восточном Саяне золото добывают методом кучного выщелачивания. Характерной особенностью данной технологии, определяющей её экологическую опасность, является использование высокотоксичного реагента - цианида натрия для извлечения золота из руды. Верхние горизонты слоисто-аллювиальной почвы вблизи золотодобывающего предприятия обогащены Fe, Ni, Cu, Cr, Ba, Pb и Mn. Концентрация последнего здесь в 2-5 раз выше, чем в гумусовом горизонте других почв. Содержание в органогенном слое Ni, Cu и Pb превышает ПДК и ОДК в 2-2,5 раза.

В Сибири находится 1/3 городов России с наиболее сильной степенью загрязнённости. Главные загрязнители почв урбанизированных территорий – это тяжелые металлы, пестициды, нефтепродукты и их высокотоксичные производные. Самыми мощными источниками загрязнения почв ТМ в городах являются комбинаты черной и цветной металлургии, а в сельской местности – минеральные удобрения, содержащие эти металлы в качестве примесей. В Байкальском регионе работает три алюминиевых завода (Иркутский, Братский, Тайшетский). Более 60 лет работает Иркутский алюминиевый завод (ИркАЗ). Наиболее экологически опасный загрязнитель почвенной среды – фтор, максимально накапливающийся в зоне ИркАЗа, достигая 10-14 ПДК, в санитарно-защитной зоне завода – 3-6 ПДК, в жилой части города – 1-2 ПДК. В почвах также накапливается ряд ТМ. Концентрация их в 3-20 раз выше фоновой. Общий ареал загрязнения почв от Иркутско-Черемховского территориального промышленного комплекса протягивается с юго-востока на северо-запад на 60 км при ширине 10-15 км.

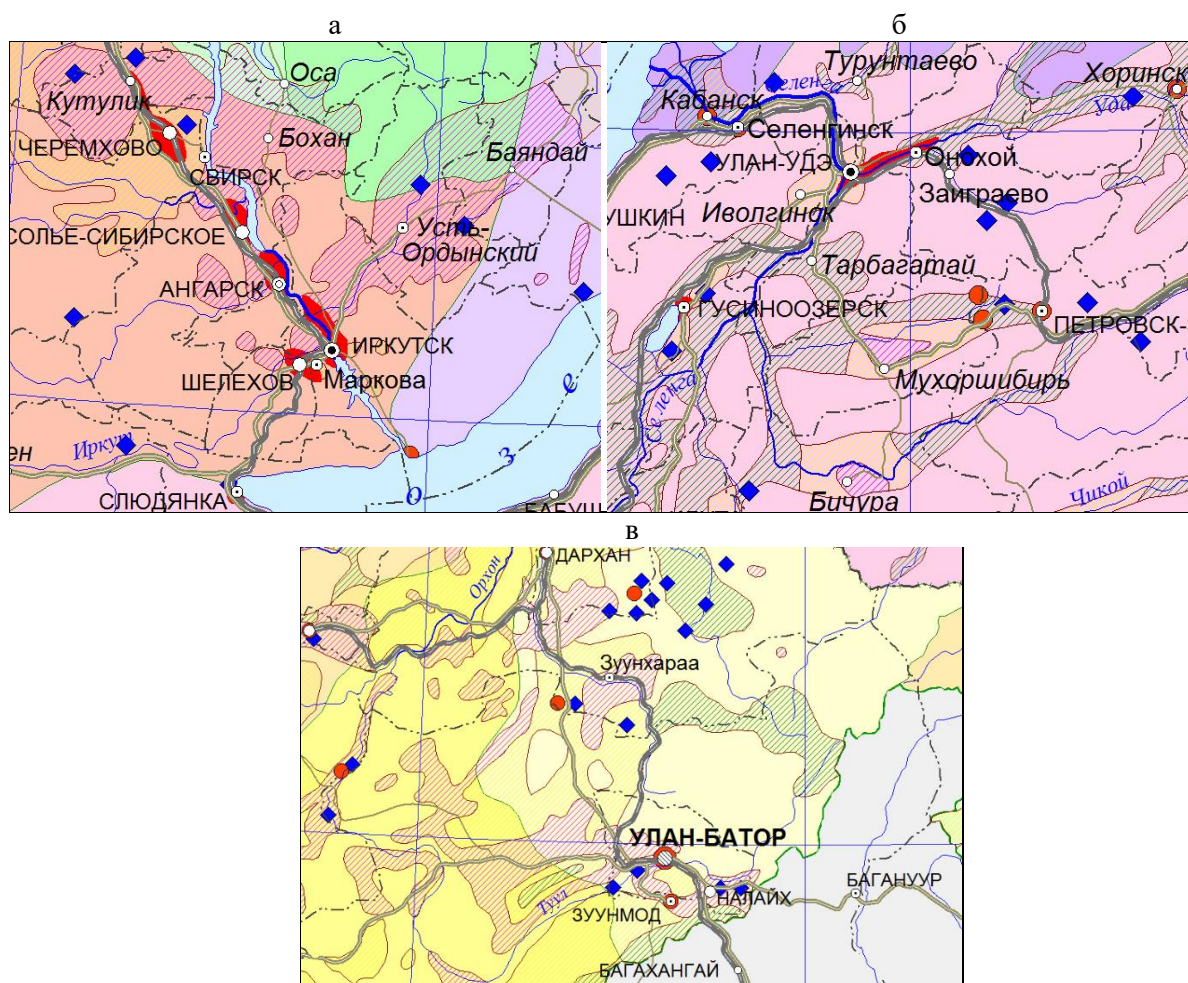
Анализ полученных данных по загрязнению почв урбанизированных центров (гг. Иркутск, Улан-Удэ, Улан-Батор) Байкальского региона показал, что наиболее загрязненными являются почвы в г. Иркутск с самым большим набором загрязняющих элементов (F, Al, Pb, Mn, Cr, Co, Ni, Ba, V, As), с показателем суммарного загрязнения исследованных элементов Z_c от 4 до 63 вследствие наличия большой техногенной нагрузки и относительно высокой сорбционной способности почв. Основные источники загрязнения - предприятия нефтехимической и металлургической промышленности, ТЭЦ, котельные и автотранспорт. Повышенные содержания токсических веществ в почвах, превышающие фон, выявлены по направлению преобладающих ветров вдоль долины р. Ангара. На втором месте по уровню загрязнения почв Pb, Co, Cu, Zn, As находится г. Улан-Удэ. Почвы города имеют показатель суммарного загрязнения Z_c от 5 до 24, что варьирует от среднего до низкого уровня. Загрязнение локального характера вблизи ТЭЦ, котельных, промышленных предприятий, автомобильного и железнодорожного транспорта. Наименьшее загрязнение почв зафиксировано в г. Улан-Батор (Z_c от 2 до 23) несмотря на высокую антропогенную нагрузку (с самой большой численностью населения и объемом выбросов теплоэнергетического комплекса, автотранспорта, транспортных, ремонтных и других предприятий), так как почвы имеют легкий гранулометрический состав. Содержание Zn, Cd, Pb, Ni, Cu, As в почвах превышает гигиенические нормы. Благодаря ливневым осадкам во второй половине лета загрязняющие вещества мигрируют в поверхностные и грунтовые воды [5].

Бессистемная раскорчевка лесов и распашка почв расположенных на недопустимых по крутизне уклону, интенсивный выпас скота, несоблюдение противоэрозионных мер в регионах Сибири сказалось на усилении эрозионных процессов. На территории Бурятии в разной степени эродировано до 47 % сельскохозяйственных земель, а на Иркутско-Черемховской равнине – до 64 %. В целом по территории 25 % сельскохозяйственных угодий, в той или иной степени эродированы. Более половины сельскохозяйственных земель имеют сильную степень эродированности. Возросли площади бросовых земель в Сибири. Пахотные почвы, обладают в сравнении с исходными лесными почвами большей мощностью гумусового горизонта, но меньшим содержанием гумуса. Серые почвы после сведения лесной растительности и особенно после нескольких лет распаивания очень быстро утратили признаки оподзоленности. Структура темно-серых почв характеризовалась высокой водопрочностью в целом состоянии. Длительное использование почв под посев сельскохозяйственных культур привело к значительному ухудшению водопрочности.

Часть сельскохозяйственных земель расположена вблизи крупных городов и промышленных предприятий, например ИркАЗа. В почвах сельскохозяйственных земель вблизи свалок, городов и промышленных предприятий Иркутской области выявлены повышенные концентрации нефтепродуктов, фенолов, ТМ. Удаленная от крупных городов часть сельскохозяйственных земель области заброшена, и в общем, составляет около 70 % от всех угодий. Почвы заброшенных земель в основном имеют средние и высокие показатели плодородия, и рекомендуются к использованию в земледелии, в некоторых случаях с применением органических и минеральных удобрений. Около 2 % территории заброшенных земель (с малопродуктивными сильнокаменистыми переуплотненными почвами на водоразделах более 650 м над ур. м.) имеют очень низкие показатели плодородия и не рекомендуются к использованию в сельском хозяйстве. В Забайкалье и северной Монголии установлены достаточно высокие уровни плодородия почв заброшенных земель. Однако они рекомендуются в основном для пастбищного хозяйства из-за малого количества осадков. Подавляющее большинство пастбищ в настоящее время представляют собой сложное сочетание нарушенных участков в различной степени. На локальных участках в огражденных пастбищах при оседлой форме скотоводческого хозяйства (при пастбищной нагрузке до 4 голов/га) наблюдается средняя степень деградации ландшафтов, при которой происходит уплотнение, например, серогумусовой почвы до $1,3 \text{ г/см}^3$ (при фоновых значениях – $0,94 \text{ г/см}^3$) и уменьшение продуктивности наземной массы разнотравно-злаковой степной растительности на 29,6 % (до 38 г/м^2). По сравнению с сопредельной территорией, например, с северной

Монголией, где максимальная пастбищная нагрузка в 5 раз больше (более 10 голов/га), деградация ландшафтов в Республике Бурятия еще не достигла критического уровня, при которой происходят необратимые изменения в ландшафтах.

Опыт почвенно-геохимических исследований, проведенных в зонах интенсивного природопользования на территории Сибири, позволил систематизировать данные по Байкальскому региону. По данным многолетних исследований с привлечением опубликованных материалов других организаций совместно с сотрудниками Байкальского института природопользования СО РАН и Института географии и геоэкологии академии наук Монголии была построена карта деградации и загрязнения почв Байкальского региона (Рисунок, Таблицы 1 и 2).











♦ - земли, нарушенные горнодобывающей промышленностью (карьеры, терриконы, отвалы и т.п.)
 Кратность превышения ПДК токсических веществ в почве:
 а) б) - 1-10 ПДК а) урбанизированных ареалов, б) населенных пунктов

Рисунок – Фрагменты модификации карты «Деградация и загрязнение почв бассейна оз. Байкал и прилегающей территории» [6]: а) Иркутский, б) Улан-Удэнский и в) Улан-Баторский ТПК




Таблица 1 – Легенда к карте «Деградация и загрязнение почв». Природная дифференциация территории и потенциальная опасность загрязнения почв

Природная область	Природная провинция	Почвы	Геохимические классы	Интенсивность миграции вещества	Потенциальная опасность техногенно-химического загрязнения
-------------------	---------------------	-------	----------------------	---------------------------------	--

Среднесибирская	 Лено-Ангарская средне- и низкогорная среднетаежная	Подзолистые, дерново-подзолистые, в т.ч. остаточо-карбонатные, подзолы иллювиально-железистые, подбуры иллювиально-железистые с темногумусовыми и серогумусовыми почвами	Кальциевый, переходный от кислого к кальциевому, местами кислый и окисдно-железистый, [Ca, H-Ca], [H, O-Fe]	Средняя и высокая	Средняя и слабая
Южносибирская	 Енисейско-Восточноаянская горно-таежная, высокогорно-тундровая и редколесная, подгорная южно-таежная и подтаежная остепненная	Дерново-подзолистые, в т.ч. остаточо-карбонатные, местами перегнойно-темногумусовые, темногумусовые, серые, черноземы глинисто-иллювиальные, подзолы иллювиально-железистые, подбуры оподзоленные, грубогумусированные, в т.ч. перегнойные	Переходный от кислого к кальциевому в сочетании с кислым, [H-Ca] с [H]	Контрастная (от умеренной до высокой)	От умеренной до слабой
	 Хамардабано-Южнозайкальская среднегорно-таежная, лесостепная и горно-котловинно-степная	Подбуры, дерново-подбуры, буроземы грубогумусовые, дерново-подзолы, подзолы, криоземы, литоземы, карболитоземы перегнойные, серые метаморфические, черноземы, черноземовидные, черноземы квазиглеевые, каштановые, светлогумусовые, аллювиальные местами солонцы и солончаки	Кислый, переходный от кислого к кальциевому и окисдно-железистый, кальциевый, местами солонцеватый и солончаковатый, [H, H-Ca, O-Fe], [Ca] и [Ca-Na-Cl, SO ₄]	Контрастная (от слабой до высокой)	От сильной до слабой
Байкальская	 Прибайкальская среднегорная, подгорная, низкогорная среднетаежная	Торфяно-подбуры, подбуры (в т.ч. оподзоленные), торфяные эутрофные, торфяно-глееземы, дерново-подзолистые, в т.ч. остаточо-карбонатные, подзолы иллювиально-железистые, дерново-подбуры, дерново-подзолистые, местами темногумусовые, серогумусовые и каштановые	Кальциевый и переходный от кислого к кальциевому, [Ca, H-Ca]	Средняя	Средняя
Байкало-Джунгарская	 Байкало-Алдано-Джунгарская высокогорная и среднетаежная, котловинно-долинная	Подбуры типичные и грубогумусированные, сухоторфяно-подбуры, дерново-подбуры, подзолы, дерново-подзолы (глеевые), подзолистые, литоземы, петроземы, карбо-литоземы перегнойные, глееземы, торфяные эутрофные, аллювиальные, каштановые и серые метаморфические	Кислый и окисдно-железистый, частично – переходный от кислого к кальциевому, [H, O-Fe], [H-Ca]	Интенсивная	Очень слабая
Хангайская	 Хэнтэйская высоко-, средне-, низкогорная, горно-долинная	Криоземы, крио-литоземы грубогумусовые, дерново-подбуры, темногумусовые, горные темно-каштановые маломощные щепнистые, темногумусовые метаморфизованные, горные черноземы дисперсно-карбонатные маломощные щепнистые с темно-каштановыми, аллювиальными, местами торфяными эутрофными	Кальциевый и переходный от кислого к кальциевому, [Ca, H-Ca]	Высокая и средняя	Слабая и средняя
	 Хангайская высоко-, средне-горно-таежная, горно-долинная, местами лесостепная	Крио-литоземы перегнойно-темногумусовые, крио-литоземы грубогумусовые, литоземы темногумусовые, криоземы, дерново-подбуры, горные темно-каштановые маломощные щепнистые, горные черноземы дисперсно-карбонатные маломощные щепнистые, темно-каштановые, каштановые, каштановые гидрометаморфизованные, темногумусовые, черноземы, перегнойно-гидрометаморфические (в т.ч. засоленные), гумусово-гидрометаморфические (в т.ч. засоленные), торфяные эутрофные и аллювиальные	Кальциевый и переходный от кислого к кальциевому, [Ca, H-Ca]	Высокая и средняя	Слабая и средняя
	 Орхон-Туулская лесостепная и степная провинция	Темно-каштановые, горные темно-каштановые маломощные щепнистые, горные черноземы дисперсно-карбонатные маломощные щепнистые, каштановые, темно-каштановые, каштановые гидрометаморфизованные,	Кальциевый и переходный от кислого к кальциевому, местами солонцеватый и солончаковатый, [Ca, H-Ca], [Ca-Na-Cl, SO ₄]	Контрастная (от слабой до высокой)	От сильной до слабой

темногумусовые, гумусово-гидрометаморфические (в т.ч. засоленные), перегнойно-гидрометаморфические (в т.ч. засоленные), торфяные эутрофные, аллювиальные, перевеянные пески, местами солонцы и солончаки.

Таблица 2 – Степень деградации почв сельскохозяйственных угодий

Степень деградации почв сельскохозяйственных угодий	Диагностические признаки деградации почв пашен	Диагностические признаки деградации почвенной среды пастбищ	Эродированность почв пахотных и пастбищных угодий, % от площади с/х земель
 Низкая	В почвенном профиле сохраняются все генетические горизонты почв	Небольшое уплотнение почвы в пределах фона, уменьшение продуктивности подземной биомассы до 1,6 раз	< 10
 Умеренная	Под пахотным слоем сохраняются нижележащие генетические горизонты верхней части профиля (агро-почвы: агро-чернозёмы и др.)	Уплотнение почвы до 1,21 г/см ³ , уменьшение подземной биомассы до 5 раза	10-25
 Высокая	Глубокопреобразованные почвы, в профиле которых под пахотным слоем залегают трансформированные генетические горизонты или порода (агрозёмы)	Уплотнение почвы до 1,46 г/см ³ , разрушение дернового горизонта, уменьшение подземной биомассы до 22 раз	> 25

3. Выводы

В результате проведенных работ выявлено, что наиболее трансформированными и загрязненными участками почв на территории газоконденсатного месторождения Иркутской области являются площадки размещения буровых скважин. В почвах площадок буровых скважин наблюдается слабое засоление и повышенное содержание ТМ, превышающее санитарно-гигиенические нормы. В почвах на территории добычи редкоземельных элементов в Бурятии и Забайкальском крае установлены повышенные содержания токсичных элементов. Проведена сравнительная характеристика загрязнения и трансформации урбанизированных и сельскохозяйственных территорий Иркутской области, Бурятии и Монголии. Выявлена различная степень трансформации и уровень загрязнения почв Прибайкалья, Забайкалья и Монголии, что обусловлено уровнем антропогенной нагрузки, природными условиями и физико-химическими свойствами почв. Почвы сформированы в различных природных зонах, что определяет различные условия аккумуляции и миграции загрязняющих веществ. Основными источниками загрязнения являются промышленные предприятия, ТЭЦ, котельные и автотранспорт. Перевод ТЭЦ и котельных на газ решило бы часть экологических вопросов, сократило бы техногенные выбросы. В Байкальском регионе имеются относительно большие почвенные ресурсы сельскохозяйственных земель в виде залежных. Большая их часть характеризуется средним и высоким уровнем плодородия, в Прибайкалье они рекомендуются для земледелия, а в Забайкалье – для ведения пастбищного хозяйства вследствие более сухого климата. Почвы сельскохозяйственных земель на водоразделах, находящиеся на высоте более 650 м над ур. м., по агрохимическим показателям рекомендуется вывести из использования.

4. Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке регионального гранта РНФ и Министерства экономического развития и промышленности Иркутской области (проект № 23-27-10013 (05-62-629/23), <https://rscf.ru/project/23-27-10013/>).

5. Литература:

[1] Gorbachev V.V. Monitoring of disturbed lands of the northern territories of the Russian Federation. Land Monitoring Center of Federal State Unitary Enterprise

- "Goszemkadastrsremotka" - State Design and Survey Institute of Land and Cadastral Surveys named after P.R. Popovich, 2010.
- [2] Halperin A.M. Engineering and geological support of industrial and environmental safety of open-pit mining. - M.: Moscow State Mining University, 2006, issue 8.
 - [3] Hismatullin S.D. Erosion on agricultural lands of the Irkutsk region // Geography and natural resources, 1991, vol. 4, pp. 49-61.
 - [4] Bazhenova O.I. Ecological and geomorphological consequences of conservation of agricultural land in the basin of Lake Baikal // Geography and natural resources, 2009, vol. 3, pp. 55-61.
 - [5] Dorjsuren D. The Features of Water Resources Accumulation in Ulaanbaatar City Area and Scientific Approaches to Proper Use. Summary of Sc.D., Mongolia, Ulaanbaatar, 2020, 32 p.
 - [6] Belozertseva I.A., Sorokova A.A., Dorzhgotov D., Beshentsev A.N. Soil degradation and pollution // Atlas of the development of the Baikal region, 2017. [Geoportal electronic resource]: Map № 139. <http://atlas.isc.irk.ru>

ИССЛЕДОВАНИЕ УЧАСТКА «КРИСТАЛЛ» МЕТОДОМ ГЕОЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ

Семен Вавилов, Виталий Неклюдов

Виллойская научно-исследовательская мерзлотная станция ФГБУН «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова» СО РАН, 678185, Россия, п. Чернышевский, 4

STUDY OF THE "CRYSTAL" SITE USING THE METHOD GEOELECTROTOMOGRAPHY

Semyon Vavilov, Vitaly Neklyudov

VNIMS Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 4, Chernyshevsky, 678185, Russia

Abstract. Sites of industrial nuclear explosions in the permafrost zone have always been the object of public attention. Of course, there must be control of their condition for compliance with all safety requirements, for which it is necessary to monitor their condition on the instructions of the responsible institutions. The method of ERT has proven itself to be an effective tool in a wide variety of studies of the permafrost zone. This report presents the results of its application in the study of the nuclear repository of an emergency peaceful nuclear weapon in the Daldyno-Alakit region, where an attention is drawn to its capabilities for monitoring the hydrogeocryological state of this area.

1. О мирном ПЯВ на участке «Кристалл»

В 1974 г., на удалении 2.5 км от карьера «Удачный на левом берегу ручья Улахан-Бысытта, на глубине 98 м был проведен один из нескольких на территории РС(Я), инженерно-геологический подземный ядерный взрыв (ПЯВ), мощностью 1.7 кт. Взрыв оказался аварийным и на поверхности образовалась воронка диаметром 60 м и глубиной 6 м, которая в последствии была заполнена поверхностными водами.

В 1992 г., над зоной эпицентра (над устьем боевой скважины), был насыпан защитный экран из вскрышных пород карьера «Удачный», объемом 433,7 тыс. т. Также, был создан льдогрунтовой слой из намороженных пород толщиной 0,6 м, который, для предохранения от таяния в летний период времени, был засыпан теплоизоляционным слоем из тех же пород толщиной 3 м. Возведенный саркофаг имел размеры около 150 м в диаметре и 7-20 м по высоте. В 2007 г. саркофаг был вздвигнут из засоленной породы нижних горизонтов карьера кимберлитовой трубки «Удачная» (что явилось причиной появления повышенной электропроводности массива) и приобрел размеры около 240x290 м с прежней высотой 7-20 м. В этом же году, в рамках рекультивационных работ, на площадке был удален верхний слой почвенного покрова с растительностью, а также были пробурены и обустроены пять контрольно-наблюдательных скважин глубиной около 5 метров.

Общий современный вид саркофага показан на рисунке 1 с указанием отметок на высокой восточной и низкой западной стороне и, стрелками, направлений возможного проявления барражного эффекта через тело саркофага. Площадка объекта «Кристалл» огорожена металлическим забором (желтым пунктиром, рисунок 1) вокруг устья боевой скважины ПЯВ «Кристалл» с примерным размером 400 × 300 м.

Саркофаг расположен на склоне долины реки Улахан-Бысытта. Примыкающая к саркофагу поверхность имеет типичный для криолитозоны рельеф в виде сети русел деллевых стоков. Дешифровка космонимков⁴ поверхности приведена на рисунке 2. Как видно из приведенной расшифровки, тело саркофага может оказаться уязвимым к перманентному фактору воздействия площадных и склоновых надмерзлотных вод сезонно талого слоя и дождевых вод стекающих с прилегающего к саркофагу склона долины (также, см. Рисунок 4).

⁴ Выполнено С.И. Сериковым, ИМЗ им. П.И. Мельникова СОРАН

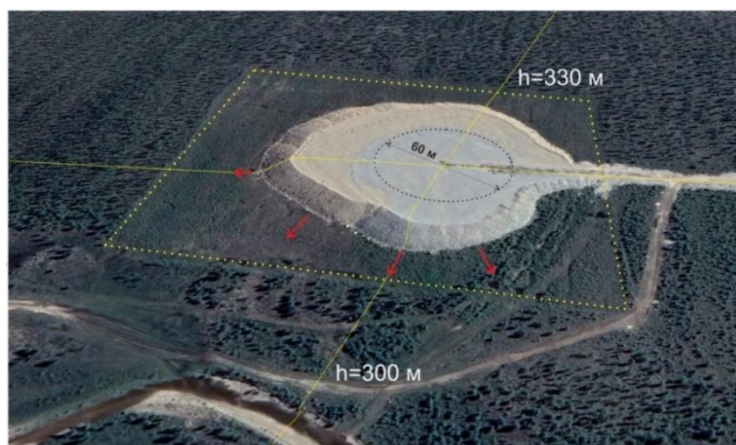


Рисунок 1 – Аэроснимок саркофага «Google earth»

Наличие металлического забора (дополнительный аккумулятор тепла в летний период) приводит к растеплению и протаиванию лунок его опор и к аккумуляции поверхностных вод в виде обширных луж, что приводит их к затоплению, а также к выпучиванию в весенне-зимний период некоторых из них (заваливание опор забора).



Рисунок 2 – Дешифровка аэроснимка:

1 - Современный ручей; 2 - Контур отсыпки; 3 - Периметр ограждение; 4 - Баражный эффект; 5 - Участки появления фрагментов уступов структурно-денудационных процессов; 6 - Участки интенсивного стока по деллевым ложбинам; 7 - Ложбины пассивного стока по деллям в результате препятствия дорожным полотном; 8 - Термоэрозия по старой дороге.

2. Геокриогенные черты строения участка «Кристалл»

Некогда зачищенная от мертвого леса, площадка саркофага сегодня имеет собственную геокриогенную морфо-структуру, представленную участками А-Д (рис.3). Участок «С» охватывает саркофаг с северо-восточной стороны (и находится несколько выше по рельефу), визуально не имеет с ним гидравлической связи, но имеет систему вероятно питающих саркофаг трещин морозобойного растрескивания, частично унаследованную от криогенных форм микрорельефа долины (рис.2) и, возможно, связанных с ней.

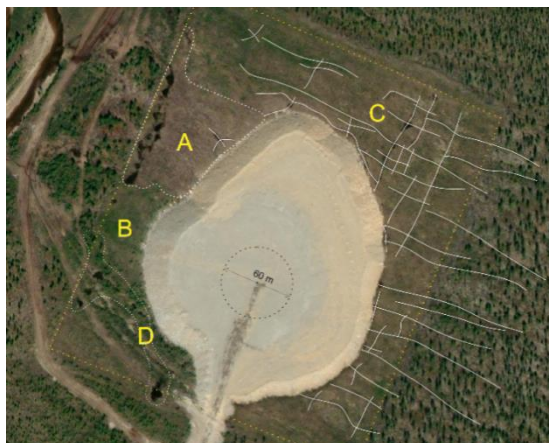


Рисунок 3 – Схема геокриогенной обстановки.

Участок «А» расположен, несколько ниже, в стороне от 60 метровой воронки взрыва. Эта территория не имеет своей трещинной системы, но и растительности, что вероятно связано с прошлыми фильтрациями из воронки через ее северную сторону, в связи с чем и были проведены дополнительные насыпки в 2007 г.

Участок «В» расположен ниже по рельефу от воронки взрыва, однако при этом не имеет никаких проявлений угнетенности растительного покрова.

Участок «D» представлен заболоченностью местности, а также не имеет признаков вегетативного угнетения.



Рисунок 4 – Фото геокриогенной обстановки саркофага.

Предположения об участии системы трещин в питании саркофага атмосферными водами участка «С» следуют из фотографий растительного покрова этой местности (рис.4), на которых зафиксировано проявления морозобойного растрескивания и трещины, заполненные метеорными водами, которые фильтруются во вмещающие породы.

3. Гидрологический аспект мирного ПЯВ «Кристалл»

Опытно-промышленный взрыв «Кристалл» выполнен практически в толще ММП, которая, подстилается пластом кембрийских подмерзлотных вод под высоким давлением. Соответственно, его вскрытие взрывом привело не только к подъему минерализованных рассолов по ослабленным породам канала боевой скважины в диапазоне средне-, верхнекембрийского горизонта, но и латеральному вытеснению трещинно-кавернозно-поровых вод обоих пластов в ранее образованную зону пониженного давления депрессионной воронки карьера «Удачный» и, как результат, была зафиксирована радиоактивность подземных вод в карьере на глубинах 600 м [1].

В настоящее время, согласно [2], криогидрологическая система участка ПЯВ «Кристалл» не представляют собой радиационной опасности, поскольку активность трития и стронция в них на 3 и 10 порядков меньше опасных уровней УВ НРБ-09, соответственно, а радиационный фон составляет менее 20 мкР\час, что соответствует безопасному уровню [НРБ-09,2009].

Хотя «аварийные» площадки ПЯВ «Кристалл» и «Кратон-3» сегодня регулярно мониторятся силами республиканских геоэкологов, вышеописанная гидрологическая обстановка не позволяет считать тему закрытой окончательно. Не исключено, что на остальных 10 площадках мирных ПЯВ республика Саха (Якутия) тоже целесообразно проведение мониторинговых мерзлотно-геофизических работ.

По вышеуказанным причинам, на площадке «Кристалл» проводились также и наземные геофизические исследования геокриогенного состояния его грунтов. Одно из таких полевых исследований было проведено силами ВНИМС ИМЗ им. П.И. Мельникова в 2021г.

4. Результаты электротомографического исследования саркофага «Кристалл»

Результаты работ ВНИМС на площадке «Кристалл» методом геоэлектротомографии на пяти (4) профилях, представлены на рисунке 5, где показана полная геоэлектрическая картина, интерпретация которой выявила ряд фактов.

1. На всех разрезах, грунтовый саркофаг совершенно четко отличается отстилающей толщи ММП как объект умеренных УЭС, соответствующих талым породам. В пределах грунтового саркофага выделяется слой мощностью 3-5 м аномальной проводимости как совокупность нескольких аномалий, и геометрия которого в целом подобна геометрии саркофага.

2. Боевая скважина, на пересечении двух соосных профилей №№3,5 представлена как вертикальная зона пониженных УЭС с аномалией на ПР5.

3. ПР5 имеет аномалию в пределах деятельного слоя вне саркофага в диапазоне пикетов 390-450 профиля, соответствующего участку «С» морозобойного растрескивания области исследования (рис.3). На этом же ПР5 на пикетах 435-465, вне тела саркофага, в толще ММП, в диапазоне отметок 255-285 м фиксируется обширная аномалия проводимости. Данная аномалия имеет своим началом компактную аномалию ПР3 и, возможно, простирается латерально в пределах деятельного слоя до ПР5.

4. По данным геоэлектрических разрезов за пределами участка саркофага, аномалия выявлено не было.

5. Выводы

По геофизическим данным состояние основания саркофага ПЯВ «Кристалл» удовлетворительное, ядро саркофага находится в мерзлом состоянии, тогда как верхняя часть характеризуется низкими значениями УЭС, что может свидетельствовать о ее талом состоянии, также это может быть связано с отсыпкой засоленной породой верхней части саркофага.

По результатам проведенных работ установлено:

1) Наличие склоновых аномалий низких сопротивлений и аномалии участка морозобойного растрескивания;

2) Саркофаг, расположенный в нижней части склона ССЗ экспозиции, с явно выраженными формами криогенного микрорельефа, значительно подмывается в своём основании в результате фильтрации вод формирующихся за счёт атмосферных осадков и вод сезонно-талого слоя

3) Наличие выраженных форм морозобойного растрескивания вокруг саркофага.

Указанные факты позволяют сделать предположение, что, сложившиеся условия, возможно, способствуют развитию таких негативных инженерно-геологических процессов как растепление грунтового ядра и фильтрации грунтовых вод через тело саркофага.

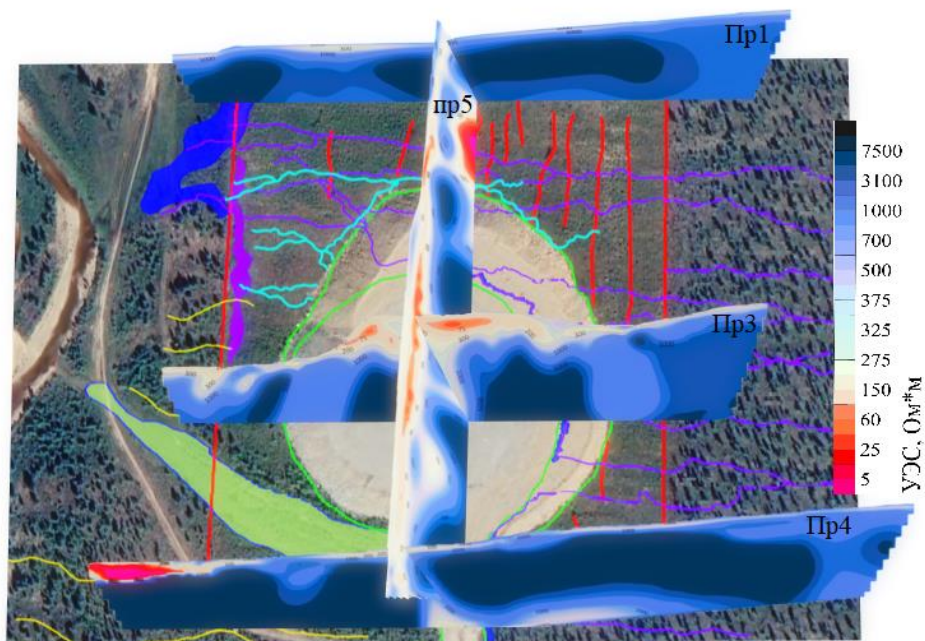


Рисунок 5 – Результаты работ методом электротомографии.

6. Заключение

В заключение следует отметить, что геоэлектрический разрез участка «Кристалл» имеет особенности, требующие инженерно-геокриологической оценки его геокриогенного состояния средствами контроля динамики электропроводности грунтов саркофага.

Оценка полученных результаты приводит к выводу о необходимости разработки методики и техники геофизического контроля саркофага и подобных ему объектов. Также, целесообразно заложить на его территории 2-3 наблюдательных скважины для контроля температурного состояния саркофага.

На самом участке необходимо продолжение мониторинга его геокриогенного состояния для оценки воздействия грунтовых вод и атмосферных осадков, и контроля состояния отсыпки (размытие, осыпание, трещинообразование, фильтрующие каналы в основании сооружения). Наконец, необходимо проверить наличие собственно ледяного экрана и проверить надёжность всего сооружения

7. Благодарности

Работа выполнена в рамках базового проекта СО РАН № 122011800076-2 и финансовой поддержке ПАО АЛРОСА. Авторы выражают благодарность научному сотруднику ИМЗ СОРАН Серикову С.И. за помощь по дешифровке космоснимков участка.

8. Литература:

- [1] Golubov B.N., Sapozhnikov Yu.A., Goralchuk A.V. Migration of radionuclides from the cavity of the underground thermonuclear explosion "Kristall" to the Udachny diamond mining quarry // Radiation safety of the Republic of Sakha (Yakutia): Materials of the II Republican scientific and practical conference. Yakutsk: YAF GU "Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences", 2004. - pp. 182-192.
- [2] Artamonova S.Yu., Bondareva L.G., Antonov E.Yu., Kozhevnikov N.O., Geocological model of the peaceful underground nuclear explosion area Kristall (Yakutia) // Geoecology, engineering geology, hydrogeology, geocryology. - 2012. - No. 2. - S., 143-158.

ПОЧВЕННЫЕ НОВОБРАЗОВАНИЯ ПОСТТЕХНОГЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Татьяна Васильева, Яна Легостаева

ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

SOIL NEW FORMATIONS OF POST-TECHNOGENIC TERRITORIES

Tatiana Vasileva, Yana Legostaeva

Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. In modern conditions, soil new formation are a marker of technogenic impact, so now we are faced with the need to introduce a group of technogenic soil neoplasms. In the course of many years of research into the geocological situation in regions where mining of minerals from the depths of Yakutia is intensively carried out, the formation of various crusts, deposits and efflorescence on the surface of the soil cover was revealed. Analysis of the mineralogical composition of technogenic surface new formations revealed that, regardless of their forms and properties, gypsum is always present, dense crusts with polygonal fracturing necessarily contain montmorillonite, or a mixed-layer mineral of the mica-montmorillonite type; iron hydroxides dominate in the composition of deposits and dense films.

1. Введение

Под новообразованиями в почвах понимают морфологически оформленные выделения и скопления вещества в почвенном материале, отличающиеся от вмещающего их почвенного материала по составу и сложению, и являющиеся следствием почвообразовательного процесса [1]. Почвенные новообразования весьма специфичны и могут находиться на поверхности, внутри почвенных агрегатов или в порах и трещинах [2]. Особенности их генезиса и морфологии тесно связаны с происхождением, развитием и эволюцией почв, свойствами вмещающих горизонтов, характером почвообразующих пород, степенью гидроморфизма и другими локальными особенностями [3, 4]. Для каждого типа почвы в зависимости от зональности и географического расположения характерен свой особый набор новообразований, положением в профиле и приуроченностью к определенным генетическим горизонтам [5].

Принято считать, что новообразования – это результат определенного процесса, характерного для какого-либо типа почвы [1]. Поэтому они имеют важное диагностическое значение. В современных условиях новообразования, в частности поверхностного характера, это еще и маркер техногенного воздействия на почвы. Поэтому сейчас мы сталкиваемся с необходимостью введения еще одной группы почвенных новообразований – техногенные. По аналогии можно предложить следующее: напочвенные поверхностные образования, сформированные на посттехногенных территориях, морфологически оформленные, отличающиеся от почвенного материала по цвету, сложению и составу, являются техногенными почвенными новообразованиями. Они могут быть использованы в качестве маркеров при идентификации процессов деградации почвенного покрова, в том числе распознавании техногенного засоления. Так как техногенное воздействие на почвы происходит повсеместно на огромных площадях и выражается не только в уничтожении или трансформации почв, но и изменении условий почвообразования при внешне сохраненной морфологии почвенного профиля. Соответственно актуальность разработки идентификации почвенных новообразований природного и антропогенного характера, обоснование внесения новой группы и подробный анализ на классификационном уровне подтверждена реалиями современных исследований.

2. Методика исследований

В ходе многолетних исследований геоэкологической ситуации в регионах, где интенсивно идет добыча полезных ископаемых из недр Якутии, было выявлено образование различных корок, налетов и высолов на поверхности почвенного покрова. Образцы отобраны на территории Далдынского, Алаakit-Мархинского и Верхнемунского кимберлитовых полей (Северо-Западная Якутия), в районе нижнего течения р. Марха (левый приток р. Вилуй) и долины Туймаада (Центральная Якутия), золоторудных месторождений Селляхско-Хотунского рудного узла (Западная Якутия), золоторудных бассейнов Алданского нагорья (Южная Якутия), месторождений общераспространённых ПИ Западной, Центральной и Южной Якутии.

Образцы почвы высушены на воздухе при комнатной температуре и просеяны через сито диаметром 1 мм.

Изучение минералогического состава выполнено методом рентгенофазового анализа на дифрактометре D2 PHASER «Bruker» (Германия), съемка образцов проводилась на трубке с медным анодом (CuK α), при напряжении 30 кВ и силе тока 10 мА, с шагом 0,05°, интервал съемки 4,5-65° (2 θ), вращение 30 об./мин, экспозиция 1 секунда в точке, для диагностики минералов использовали базу данных PDF-2 (ЦКП ОФХМА ИГАБМ СО РАН).

Фотографии образцов сделаны на поляризационном микроскопе MT9430L (Meiji Techno, Сайтама, Япония) М.В. Кудриным (ИГАБМ СО РАН).

3. Результаты исследований и их обсуждение

Новообразования – это индикатор условий почвообразовательных процессов. Корочки, пленки, налеты, выцветы, сформированные на поверхности – это наиболее молодые новообразования, связанные, преимущественно с антропогенным воздействием на почвенный покров. Используя принципы систематизации, разработанные С.А. Захаровым (1930), И.П. Герасимовым (1946); Р. Брюэром (1964), А.В. Македоновым (1966), В.А. Ковдой (1973), Б.Г. Розановым (1976, 1983), Ф.Р.Зайдельман, А.С.Никифоровой (2001), техногенные поверхностные новообразования характеризуются не только по морфологии, минералогическому составу, форме, происхождению, но и по характеру воздействия на почвы. Например, на постагрогенных территориях Центральной Якутии характерны формирования поверхностных корок и мягких солевых налетов, белого цвета с желтоватыми и серыми оттенками. По составу они представляют собой полиминеральные смеси. Основными минералами новообразований являются водные сульфаты кальция и натрия: гипс CaSO $_4$ ·2H $_2$ O, тенардит Na $_2$ SO $_4$ и мирабилит Na $_2$ SO $_4$ ·10H $_2$ O (Рисунок 1). Территория представляет собой понижения древней аллювиальной равнины, где распространены сильно засоленные сульфатами почвы. Исследованные участки в свое время относились к территориям, используемым для орошаемого земледелия и пастбищного животноводства [6]. На таких почвах нередко протекание вторичного засоления вследствие бездренажного орошения и применения минерализованной воды, а также перегрузки пастбищ в результате уплотнения и уничтожения травянистой растительности.

На термограммах наблюдаются различная потеря массы, связанные с испарением гигроскопической и структурной воды. При этом плотность налета соответствует количеству гигроскопической воды и это, на наш взгляд, одна из важных характеристик техногенных новообразований почв. При испарении сначала выпадают наименее растворимые соли, следовательно при сульфатном составе раствора сначала выделяется гипс, следующими по очереди выпадают тенардит, мирабилит, галит, гексагидрит и т.д.

Для почв промышленно освоенных территорий наиболее контрастно проявляются новообразования на поверхности примитивных и постлитогенных почв. Для примера взяты образцы с различными налетами и примазками на алевролитах золоторудного месторождения Верхоянья.

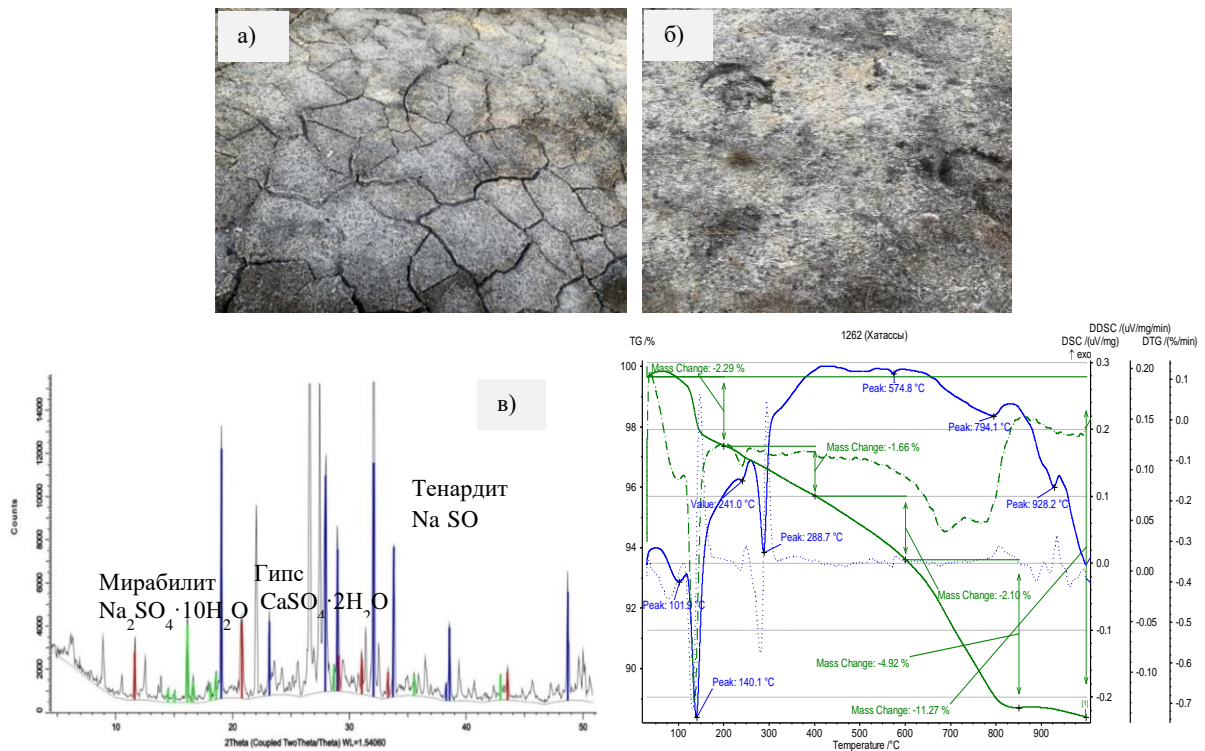


Рисунок 1 – Плотная корочка на поверхности агроземов (а), пригородная территория г. Якутск, Покровский тракт; пушистый налет на поверхности постагрогенных ландшафтов (б), пригородная территория г. Якутск, с. Хатассы; (в) дифрактограмма и термограмма пушистого налета.

Новообразования представлены в виде тонкодисперсных твердых налетов и примазок мощностью не более миллиметра на маломощном органическом материале. Им свойственно присутствие, гипса, ярозита $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$, эпсомита $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ или гексагидрита $MgSO_4 \cdot 6H_2O$ и гидроокислов железа (Рисунок 2).

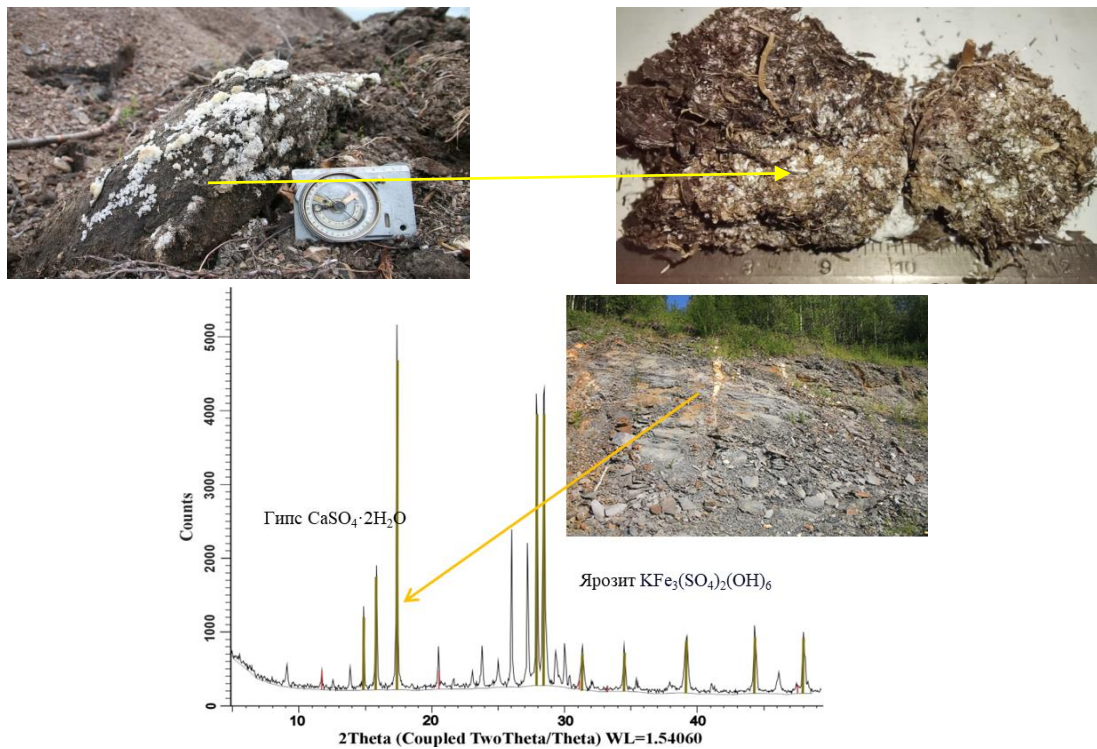


Рисунок 2 – Почкообразные налеты и примазки на породе, Южное Верхоянье

Почвы постлитогенного отдела представлены литоземами, карбо-литоземами, криоземами и глееземами. Характер и минералогия новообразований в зонах техногенеза также во многом зависит от литологического состава почв и характера воздействия на них. На участках с сохранившимся почвенным покровом, но в результате воздействия отвалов пустых пород или в районе аварийных разливов пульпы на территориях промышленных площадок алмазоперерабатывающих предприятий формируются рыхлые налеты на поверхностных органических и плотные пленки на оголенных органических сильно щебнистых горизонтах (Рисунок 3).

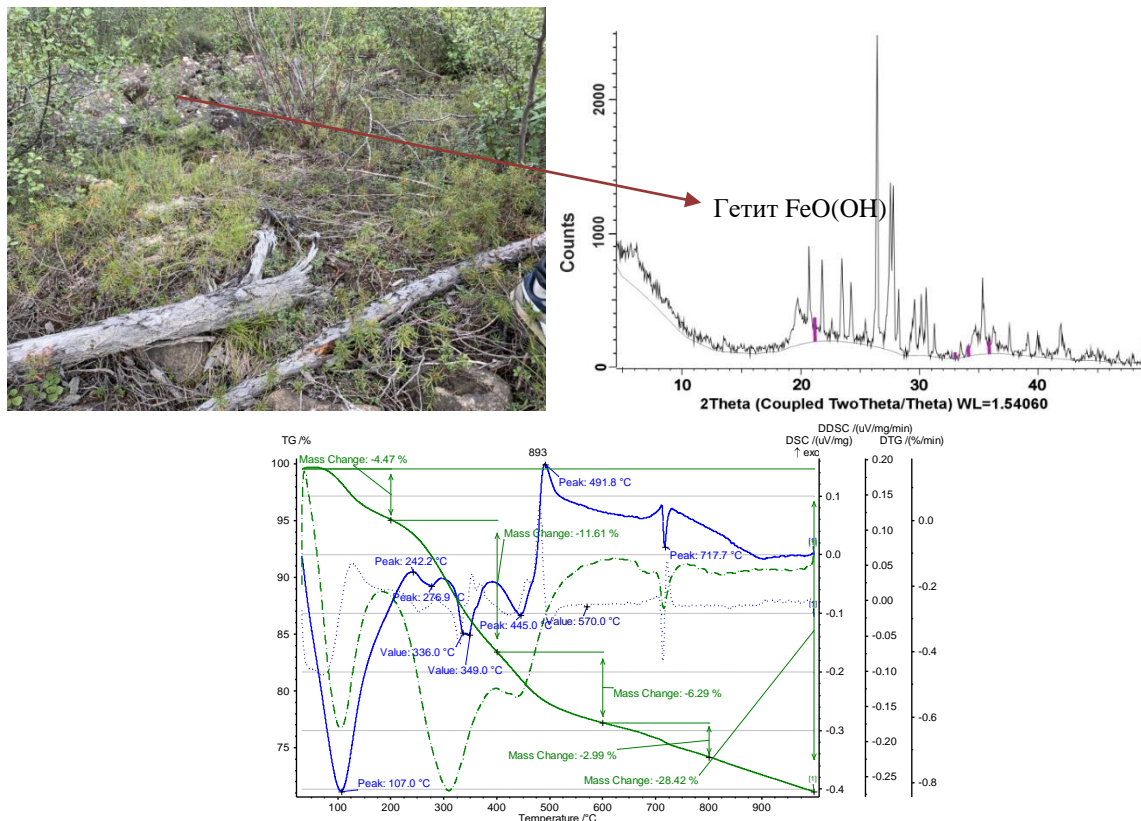


Рисунок 3 – Литоземы, Алакит-Мархинское кимберлитовое поле, территория промышленной площадки АГОКа АК АЛРОСА, образование ржаво-коричневых плотных пленок на щебнистых выходах в импактной зоне отвалов трубки Комсомольская

В минералогическом составе доминируют монтмориллонит, либо смешаннослойные минералы слюда-монтмориллонитового типа, гидроокислы железа и гипс. Не выявлены арсенаты, фосфаты и другие соли. При образовании плотных корок и налетов всегда присутствует монтмориллонит.

Поверхностные новообразования золоторудных бассейнов Алдана представлены, как правило, довольно плотными налетами на поверхности почвы и выделяются частым присутствием скородита $FeAsO_4 \cdot (H_2O)_2$, затем следуют ярозит и гидроокислы железа. Это, прежде всего, влияние золотоносных рудных пород пирит-арсенопиритового состава, при разложении которых образуются сульфаты и арсенаты.

Наибольшее разнообразие в минералогическом составе техногенных новообразований в ареалах воздействия открытых карьеров общераспространенные полезные ископаемые, таких, как например, карьеры строительных материалов. На поверхности почв в импактных зонах открытых карьеров по добыче строительного камня, щебня, глины, песка выявлено широкое разнообразие форм: налеты, «пушистые» образования, комковатые и почковидные агрегаты (Рисунок 4).

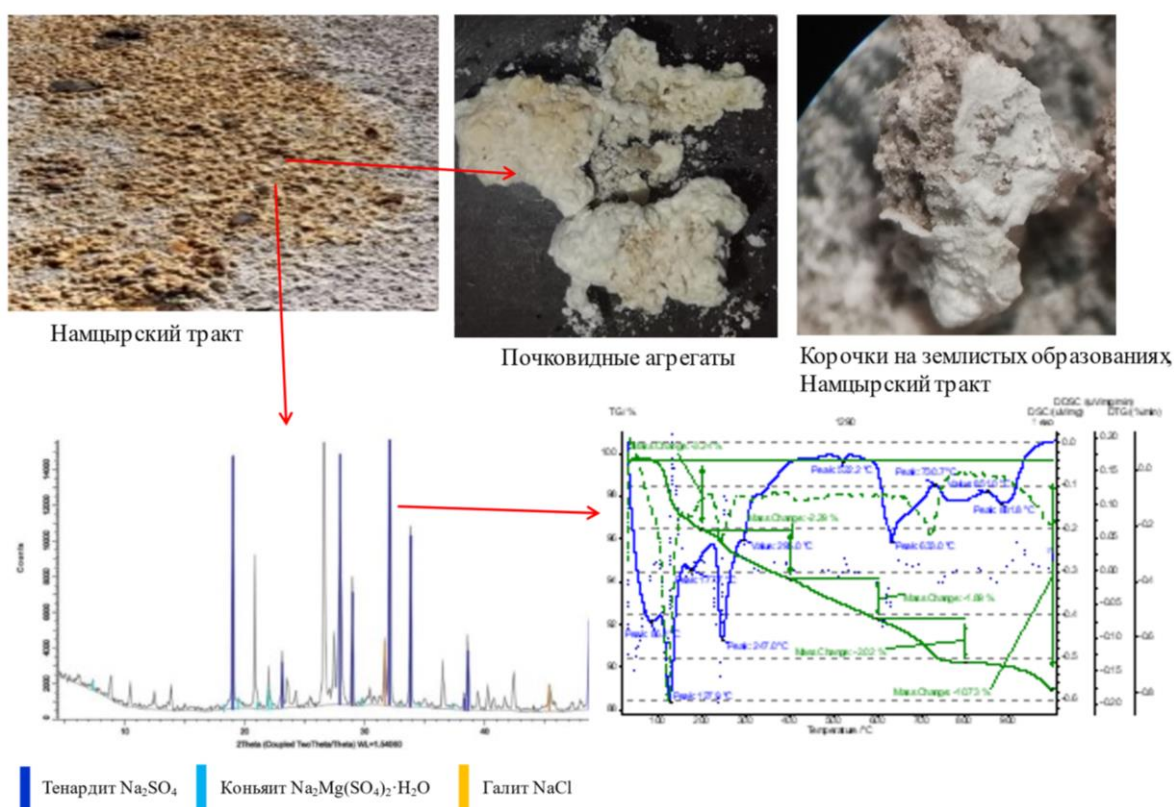


Рисунок 4 – Поверхностные новообразования в зоне воздействия карьеров щебня на Намцырском тракте, г. Якутск

Минералогический состав представленных сульфатов также не однороден: тенардита Na_2SO_4 , мирабилита $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, бледита $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, старкеита $\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, гексагидрита $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, коньяита $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, а также присутствует галит NaCl .

4. Выводы

Техногенные поверхностные новообразования являются откликом почв на воздействие. Специфический их состав и форма — это совокупность свойств почвенного материала и геолого-минералогических характеристик с характером техногенного воздействия из вне. Анализ минералогического состава техногенных поверхностных новообразований выявил, что вне зависимости от их форм и свойств всегда присутствует гипс, плотные корки с полигональной трещиноватостью обязательно содержат монтмориллонит, либо смешаннослойный минерал слюда-монтмориллонитового типа, в составе налетов и плотных пленок доминируют гидроокислы железа.

5. Благодарности

Работа выполнена в рамках Госзадания Минобрнауки РФ FUFG-2024-007 «Мантыйный магматизм, эволюция литосферы и рудоносность восточной части Сибирской платформы, геоэкология недропользования»

6. Литература:

- [1] Orlov, D.S., Sadovnikova, L.K., Sukhanova, N.I. Soil chemistry. Moscow: Higher School, 2005, 561 pp.
- [2] Yamnova, I.A., Golovanov, D.L. Morphology and genesis of gypsum pedofeatures and their representation on detailed soil maps of arid regions // Eurasian Soil Science, 2010, vol. 43, no. 8, pp. 848-857.

- [3] Zelentsova, A.E., Nikiforov, A.N. Comparative analysis of the chemical composition of pedogenic neoplasms as an element of reconstruction of the environment of the past // In the book: Reflection of bio-, geo-, anthropospheric interactions in soils and soil cover: materials of the VII International Scientific Conference dedicated to the 90th anniversary of the Department of Soil Science and Soil Ecology TSU. Tomsk: Publishing House of Tomsk State University, 2020. pp. 227-230.
- [4] Kallas, E.V. Soil science with the basics of geology and agroecological land use. Tomsk: Tomsk University Publishing House, 2021, 334 pp.
- [5] Vasilyeva, T. I. Sulfate minerals on the surface of agrozeims of abandoned pastures in the Tuymaada valley // Geology and mineral resources of the North-East of Russia: Materials of the XIII All-Russian scientific and practical conference with international participation, dedicated to the 30th anniversary of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia) and the 40th anniversary of the geological exploration faculty of NEFU named after. M.K. Ammosova. Yakutsk: North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosova, 2023. pp. 431-434.
- [6] Kholodov, V. N. Caliches: A newly-formed boundary carbonate material in soils // Lithology and Mineral Resources, 2007, vol. 42, no. 3. pp. 246-256.

ИЗУЧЕНИЕ ЛИТОГЕННОГО АСПЕКТА ПРИ КАМНЕОБРАЗОВАНИИ В ОРГАНИЗМЕ ЧЕЛОВЕКА

Татьяна Васильева, Олеся Шадринова
ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

ON THE QUESTION OF THE DEPENDENCE OF THE BIOMINERALS COMPOSITION ON GEOECOLOGICAL FACTORS

Tatiana Vasileva, Olesya Shadrinova
Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. The work provides data on the mineralogical and microelement composition of biliary neoplasms. We studied gallstones (choleoliths) from eight residents of Yakutia, obtained using external lithotripsy in medical clinics in Yakutsk. The mineral composition of the studied choleoliths is represented by cholesterol, carbonates and calcium phosphates. Trace element impurities in gallstones are in descending order: Zn>Mn>Cu>Ni>Pb>Cd>As>Ti, Zr, Bi. Further study of the mineralogical and elemental composition of biominerals formed in the human body will make it possible to obtain general assessments of the formation of microelement status, determined by both natural and man-made factors in the area of human residence.

1. Введение

Минеральным новообразованиям в организме человека до недавнего времени уделяли внимание только с точки зрения медицины. В то время как изучение органоминеральных образований можно выделить как новое направление в минералогии техногенеза, так как условия окружающей среды и воздействие техногенных факторов влияют на строение, минералогический и микроэлементный состав человеческих биоминералов [1]. Сейчас эти вопросы широко изучаются во всем мире с привлечением минералогов, которые используют свои методы исследования для изучения причин и механизмов формирования патогенных камней в организме человека [2, 3]. Поступление различных химических элементов в организм определяется содержанием их во внешней среде, с которой человек непосредственно связан. При неблагоприятной экологической ситуации они начинают накапливаться в организме человека. Так, токсичные вещества могут накапливаться в желчи, одной из важных функций которой является их удаление, при невозможности выведения почками [4].

В работе приведены первые данные о минералогическом и микроэлементном составе желчных новообразований. Изучение элементного состава биообразований как интегральных накопителей информации о внешнем воздействии в течение достаточно длительного времени, иногда годы и десятилетия, позволит получить наиболее общие оценки формирования микроэлементных дисбалансов, обусловленных как природными, так и техногенными факторами внешнего влияния.

2. Методы и объем материала исследований

Материалом для исследований послужила начальная стадия сбора коллекции камней жителей РС(Я), полученных с помощью дистанционной литотрипсии в медицинских клиниках г. Якутска.

Исследованы желчные камни восьми пациентов размером от 1-2 см до 5-6 см, количество камней от одного человека варьировало от 1 до 14.

Минералогический состав желчных камней исследовали методом рентгенофазового анализа и термического анализа (аналитик Н.Н. Емельянова, ЦКП ИГАБМ СО РАН), микроколичества элементов группы железа (Cu, Zn, Pb, Cd, Co, Ni), содержание марганца, титана, циркона,

висмута и мышьяка исследовали с помощью эмиссионного спектрального анализа (аналитик А.С. Васильева, ЦКП ИГАБМ СО РАН).

3. Предварительные результаты

Многообразие участвующих в камнеобразовании компонентов желчи находит отражение в химической композиции желчных камней, которые по доминанту разделяют на холестериновые, пигментные и смешанные, причем первые встречаются значительно чаще [1]. На рисунке 1 представлены некоторые экземпляры холеолитов, отобранных для исследования.



Рисунок 1 – Общий внешний вид образцов желчных камней

Морфология камней достаточно разнообразна. Как правило, описываемые холеолиты коричневых оттенков, встречаются светло-серые и черные. Форма также различна от округлой, эллипсоидной, ромбовидной до мозаичной, зернистой, возникающей при срастании нескольких первичных камней с последующим обрастанием общими слоями. Вес варьирует от 0,31 до 6,32 г. На рисунке 2 представлено фото наиболее крупного камня, вес которого 6,32 г.



Рисунок 2 – Внешний вид самого большого холеолита в собранной коллекции

При визуальном исследовании срезов камней обращает внимание разрез периферии. Холестериновые камни имеют радиальную исчерченность: холестерин здесь выкристаллизован в форме грубых перекладин, направленных радиально [5]. В центре камня перекладины расположены менее правильно, перекрещиваясь вокруг микроскопического пигментного комочка. Считается, что между перекладинами отлагаются пигмент и соли кальция, постепенно уменьшаясь в количестве по направлению к периферии [1]. Это зависит от неодинаковой интенсивности отложения кальция в различные периоды роста. На рисунке 3 приведено изображение холеолитов в разрезе, где хорошо видны послойные структуры, составляющие основу желчного камня.

Минеральный состав исследованных холеолитов представлен преимущественно холестерином, дополнительные фазы: карбонаты кальция CaCO_3 – фатерит или кальцит; фосфат кальция $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ – апатит $\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$. Фатерит – редкая гексагональная модификация CaCO_3 . Обычно образуется как биоминерал, в частности при формировании раковин гастропод, в этом случае со временем по мере старения превращается арагонит, а затем переходит в кальцит [3].

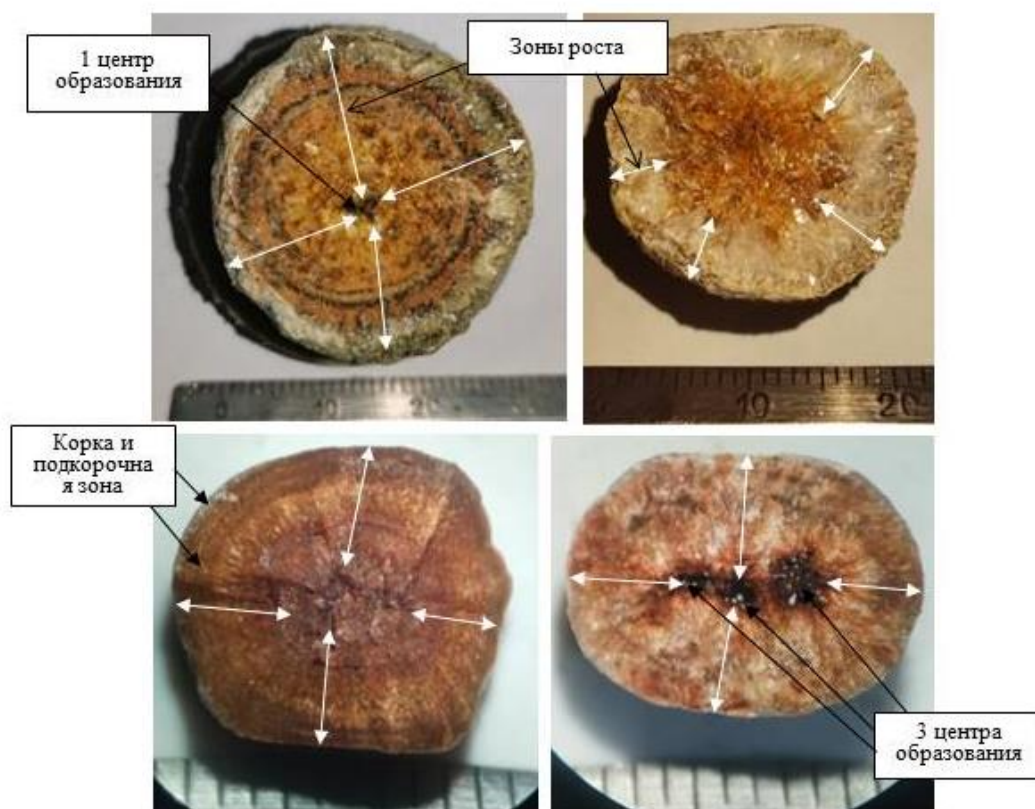


Рисунок 3 – Холеолиты в разрезе

Желчные камни исследованы на содержание 32 элементов, из них содержание Au, Ta, Sb, Ga, W, Cr, Ge, Ba, Be, Nb, Sn, V, Mo, Li, La, In, Sc, Yb, Y, Ag, Co, Sr меньше предела чувствительности метода исследования, количество Cu, Zn, Pb, Cd, Ni, Mn, As, Ti, Zr и Bi колеблется в диапазоне от 0,001 до 6 масс. % (табл.1).

Таблица 1 – Содержание некоторых элементов в желчных камнях, масс.%

№ образца	Cu	Zn	Pb	Cd	Ni	Mn	As	Ti	Zr	Bi
2701	0,135	6,303	0,143	н/о	0,188	0,427	0,008	н/о	н/о	н/о
2702	0,126	0,472	0,102	н/о	0,164	0,212	0,001	н/о	н/о	н/о
2703	0,080	н/о	0,091	0,017	0,106	0,246	0,008	н/о	н/о	н/о
2704	0,085	н/о	0,092	н/о	0,110	0,102	0,011	н/о	н/о	н/о
2705	0,099	0,381	0,105	0,093	0,154	0,211	0,002	н/о	н/о	н/о
2706	0,899	н/о	0,153	0,022	0,540	0,272	0,008	н/о	н/о	0,005
2707	0,099	0,427	0,057	н/о	0,092	0,186	0,001	0,005	0,005	н/о
2708	0,111	0,870	0,038	н/о	0,074	0,210	н/о	н/о	н/о	н/о

3. Обсуждение полученных результатов

Практически все элементы в желчных камнях имеют биогенное происхождение [6]. Элементы, присутствующие в окружающей среде в подвижной форме и легко усваиваемые по трофической цепи (Si, Al, Fe, Cu, Ca, Zn и Mn), легко усваиваются и накапливаются в процессе метаболизма в различных концентрациях в желчи и, соответственно, в желчных камнях [7]. Поэтому концентрация и содержание элементов в органах и тканях связаны не только с местом обитания, с питанием и другими условиями [8].

Жители Якутии отличаются высоким содержанием практически всех проанализированных элементов в желчных камнях по сравнению с другими регионами Сибири и Забайкалья (табл. 2). Кроме этого, в холеолитах жителей Якутии зафиксированы кадмий и мышьяк. Как нетрудно заметить в холеолитах женщин концентрация всех элементов выше, чем в желчных камнях

мужчин. На данный момент подтвердить или опровергнуть этот вывод на основании литературных данных невозможно, т.к. нет подобных исследований. Так же, как не выделены определенные возрастные закономерности.

Процентное содержание выявленных в желчных камнях элементов убывает в следующем порядке: Zn>Mn>Cu>Ni>Pb>Cd>As>Ti, Zr, Bi. Некоторые образцы имеют высокое содержание относительно других желчных камней Zn, Mn и Pb (образец № 2701), As (обр.2704), Cd (обр. 270), Cu, Pb и Ni (обр.2706).

Таблица 2 – Содержание элементов в желчных камнях для разных регионов, в масс. %

Элемент	Новосибирский регион [10]	Омская область [8]	Забайкалье [1]	Якутия		
				Среднее, n=8	женщины, n=5	мужчины, n=3
Mn	0,0426	0,0085	0,076	0,233±0,012	0,240±0,012	0,222±0,011
Cu	0,0433	0,0033	0,018	0,204±0,010	0,269±0,013	0,097±0,005
Pb	0,0011	0,0025	0,002	0,098±0,005	0,109±0,005	0,078±0,004
Zn	0,0055	0,0011	–	1,057±0,053	1,440±0,072	0,417±0,021
Ni	–	0,0005	0,0012	0,179±0,009	0,219±0,011	0,122±0,006
Bi	–	0,0005	0,002	0,001	0,001	0,000
As	Нет данных			0,005	0,006	0,003
Cd				0,017±0,001	0,004	0,037±0,002

Исходя из выводов О. А. Головановой с соавторами [9] в желчных камнях кальций – доминирующий элемент, а различное содержание и распределение микроэлементов в желчных камнях являются особенностью региона. И если следовать этому постулату, то преобладание Zn, Mn, Cu и Ni в исследованных холеолитах может быть свидетельством того, что их обладатели долгое время проживали в Вилюйской группе районов, где в компонентах среды, в том числе в воде, выявлено активное накопление никеля, меди, марганца, цинка, связанное как с внедрением кимберлитового магматизма, так и с активной добычей алмазов.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности научных исследований на стыке медицины, геологии и геоэкологии, и целесообразности дальнейшего углубленного изучения биологической роли геоэкологических факторов с расширением спектра медицинских проблем.

4. Выводы

Изучение биоминеральных новообразований человеческого организма минералогическими и геохимическими методами создает предпосылки для дальнейшего развития междисциплинарного научного направления медицинской геологии, созданной на стыке медицины, геологии, минералогии и техногенеза. Она исследует как лечебные свойства минералов и возможности их использования в качестве лекарственных препаратов, компонентов для лекарств и медицинской техники, так и влияние различных геохимических и геофизических факторов на здоровье человека, условия возникновения геохимических эндемий. Изучив новообразования биоминералов можно определить дисбаланс микроэлементов в организме человека, а также оценить геоэкологическую ситуацию в месте его постоянного проживания, выявить признаки техногенной нагрузки на окружающую среду.

5. Благодарности

Работа выполнена в рамках выполнения проекта FUEM2019-0003 Государственного задания Минобрнауки РФ. Авторы благодарят пациентов Республиканской больницы № 2 - Центр экстренной медицинской помощи и Республиканская больница №1 - Национальный центр медицины имени М.Е.Николаева, предоставивших материалы для исследования. И Я.Б. Легостаеву за консультации и помощь в осмыслении материала.

5. Литература:

- [1] Korago A. A. Introduction to biomineralogy. St. Petersburg: Nedra, 1992. 280 p.
- [2] Krivonosov Yu. S., Asadchikov V. E., Buzmakov A. V., Ivanova A. G., Artemov V. V., Rusakov A. A., Pantyushov V. V., Sayfutdinov R. G., Minaev N. V., Minaeva S. A., Syachina M. A., Popov V. K. Physical Methods for Determining the Phase Composition of Gallstones // Crystallography Reports, 2019, vol. 64, no. 6, pp. 920-925.
- [3] Golovanova O. A., Frank-Kamenetskaya O. V., Punin Yu. O. Features of pathogenic mineral formation in the human body // Russian Journal of General Chemistry, 2010, vol. 54, no. 2, pp. 124-136.
- [4] Palchik N. A., Moroz T. N. Relationships between mineral and microelement compositions in pathogenic organomineral formations // Mineralogy of technogenesis, 2005, vol. 6, pp. 140-148.
- [5] Golovanova O.A., Yudina L.N., Borbat V.F. Determination of gallstone components and parameters of the stone-forming environment // ChemChemTech, 2004, vol. 47, no. 10, pp. 125-129.
- [6] Sheleketina I.I. Modern ideas about the genesis and principles of typing gallstones // Academy of Medical Sciences of Ukraine, 1996, vol. 2, no. 4, pp. 631-643.
- [7] Vernadsky V.I. Biosphere. Moscow: Mysl, 1967, 280 p.
- [8] Skalny A.V., Lomakin Yu.V., Lakarova E.V., Berezkina E.S. Current problems of analytical research in bioelementology // Problems of Biological, Medical and Pharmaceutical Chemistry, 2011, no. 6, pp. 14-18.
- [9] Golovanova O. A., Belskaya L. V., Berezin N. Yu. Quantitative spectral trace element analysis of pathogenic biominerals from residents of the Omsk region // Journal of Applied Spectroscopy, 2006, vol. 73, no 6, pp. 792-796.

ВЫЯВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРА И ПРИРОДЫ ОБХОДНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ НА ГТС ЗАПАДНОЙ ЯКУТИИ С ПОМОЩЬЮ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Сергей Великин, Рудольф Чжан

ФГБУН «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН»,
677010, Россия, г. Якутск, Мерзлотная, 36

IDENTIFYING THE CHARACTER AND NATURE OF BYPASS FILTRATION AT THE GTS OF WESTERN YAKUTIA USING GEOPHYSICAL METHODS

Sergey Velikin, Rudolf Zhang

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36, Permafrost str., Yakutsk, 677010, Russia

Abstract. The report presents the results of geophysical work to identify hydraulic structures at landfalls in the permafrost zone of thawed zones associated with bypass filtration in the frozen soils of landfalls. Based on many years of research, the reasons for the formation and promotion of intensive bypass filtration in the permafrost zone of Western Yakutia are analyzed. A hypothesis has been proposed for the loss of stability of hydraulic structures in the conditions of western Yakutia, based on the formation of the geocryological situation of the territory in the Holocene. The results obtained confirm the hypothesis put forward and can be used in the design, construction and operation of hydraulic structures in the permafrost zone.

1. Введение

В июле 2022 г. сотрудники ИМЗ, совместно с сотрудником МГУ Бобачевым А.А., проводили исследования на участке Иреляхского водохранилища. Целью проводимых инженерно-геофизических исследований являлось определение методами электроразведки геокриологических условий грунтов в береговых примыканиях, где уже многие годы наблюдается обходная фильтрация. Для исследований использовался метод электротомографии (ЭТ) с установками в наземном и донном вариантах. С помощью проведенных работ удалось довольно уверенно выделить и протрассировать талые зоны, связанные с обходной фильтрацией и геокриологическим состоянием береговых примыканий, образованных в результате эксплуатации водохранилища (основного источника водоснабжения г. Мирный и его промышленных предприятий) [1]. Анализ полученных результатов, в сопоставлении с многолетним опытом работ по геофизическому мониторингу гидротехнических сооружений Мало-Ботуобинского района, позволил по мнению авторов выявить природу возникновения обходной фильтрации, обусловленную геокриологическими особенностями региона.

2. Результаты исследований

Как для наземных, так и для акваторных работ использовалась трехэлектродная комбинированная установка Шлюмберже. Для учета сопротивления воды проводилась резистивиметрия с кондуктометром СОМ-100 производства фирмы НМ Digital (США).

На рисунке 1 представлены геоэлектрические разрезы захватывающие береговые примыкания вблизи Иреляхской дамбы, на которых талые участки, образованные влиянием вод водохранилища и фильтрационными процессами, отчетливо выделяются областями пониженных удельных электрических сопротивлений. Полученный материал оказался весьма интересным с точки зрения природы полученных аномалий, т.к. подобные геоэлектрические разрезы в береговых примыканиях встречались авторами и на других водохранилищах Малоботуобинского района Западной Якутии.

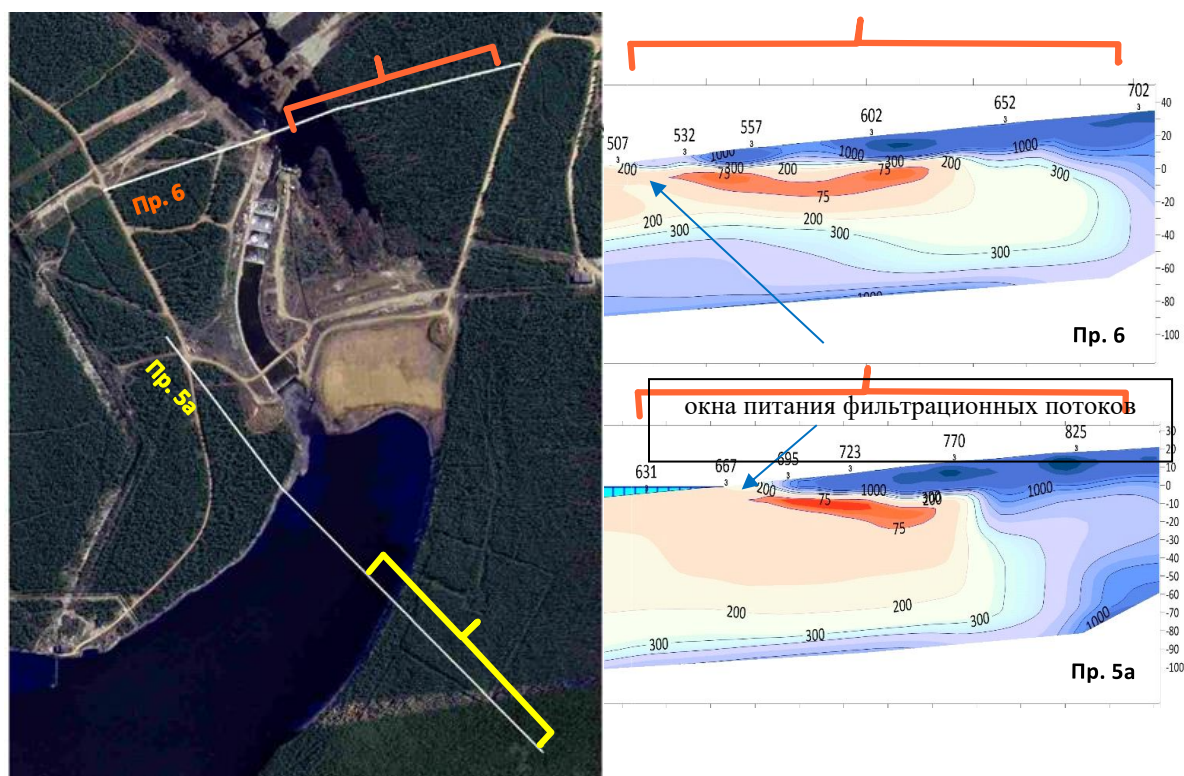


Рисунок 1 – Иреляхский гидроузел. Выделение окон питания фильтрационных потоков с помощью электротомографии

Причиной этого явления, в качестве гипотезы, можно связать с тем обстоятельством, что как известно в начале голоценового времени, с 10-9 до 5-4 тысяч лет назад, имел место так называемый голоценовый оптимум, в течение которого происходила деградация мерзлых толщ [2], [3], [4]. На рассматриваемой территории многолетнее протаивание достигло 30-40м от дневной поверхности. После возвращения холодного климата началось быстрое промерзание пород. В условиях водоразделов и крутых склонов, с учетом сложившейся на тот момент гидрогеологической обстановки, промерзала зона аэрации.

Все это привело к тому, что в настоящий момент береговые массивы на участках долин с крутизной бортов более 10-150, сложенные мерзлыми скальными и полускальными образованиями часто имеют открытую трещиноватость. В частности, подобный факт был зафиксирован в материалах изысканий под строительство Иреляхского гидроузла трестом «Гипрозолото» в 1956 г. [4]. В геологическом строении правого борта присутствуют субгоризонтальные пласты трещиноватых доломитов. По материалам документации строительного котлована, их трещинная пустотность достигает 1.36 – 4.18%. Ширина раскрытия трещин достигает 100 – 150мм, протяженность до 15 м. Системы трещин ориентированы преимущественно перпендикулярно и параллельно оси плотины, причем последние способствуют перетокам воды вдоль напорного фронта к наиболее проницаемым зонам. В силу особенностей истории формирования мерзлоты в регионе, крутые борта долин промерзали в условиях неполного водонасыщения [6]. Это привело к образованию открытой или только частично заполненной льдом трещиноватости. В нашем случае развитие обходной фильтрации проходило по коллекторам, образованным трещиноватыми доломитами [4].

Оценивая общие закономерности формирования мерзлых толщ [5], можно предположить, что в связи с асимметричным строением долины на участке ГТС, в пределах более крутого правого борта верхний доломитовый горизонт на момент промерзания находился в зоне аэрации и в состоянии неполного водонасыщения. Соответственно он мог иметь открытую трещинную пустотность и после замерзания. Это подтверждается описанием одной из скважин участка [4], где в этом горизонте встречена льдистость в виде мелких кристалликов.

Проведенные ВНИМС в более ранние годы (2002-2004г.г.) исследования показали, что в летнее время воды водохранилища сильно прогреваются, что в свою очередь способствует развитию обходной фильтрации в бортовых примыканиях и быстрому протаиванию подстилающих мерзлых пород. Например, в правобережном примыкании перед Иреляхской плотиной, выявлена и подтверждена скважинными температурными исследованиями наиболее интенсивная фильтрация (Рисунок 2), где по данным температурной водной съемки выявлены более высокие температуры чем вдоль правого берега.

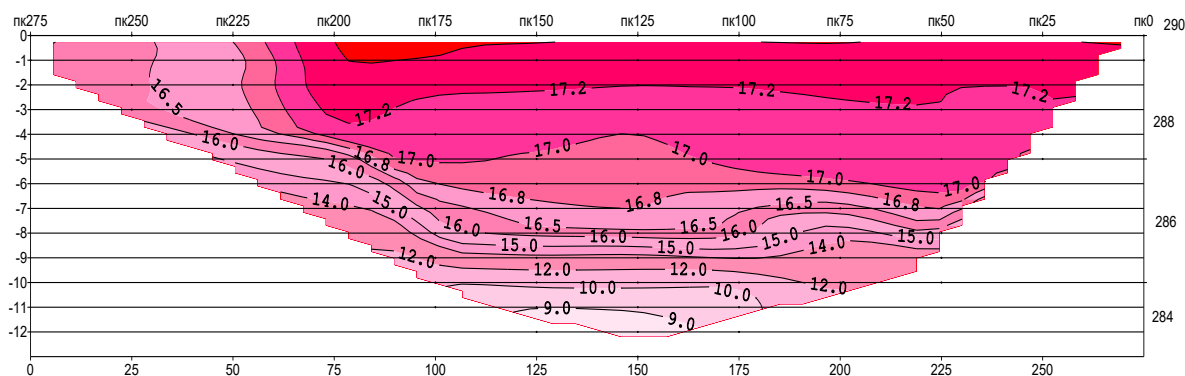


Рисунок 2 – Иреляхский гидроузел. Температура воды 20.08.2002 г. ПР 180 (200м от оси плотины)

Следует отметить, что формирование в береговых массивах на склонах крутизной более 15-25о протяженных трещин отседания, с открытостью до 30-40 см, довольно типично для Малоботуобинского района западной Якутии. Этому явлению есть целый ряд подтверждений на береговых примыканиях к головным сооружениям гидротехнических узлов. Пример подобных трещин в районе правобережного примыкания дамбы водохранилища Сытыкан показан на рисунках 3а и 3б.



а)



б)

Рисунок 3 – Правый берег Сытыканского водохранилища. Разрез строительного котлована для создания цементно-мерзлотной завесы: а) общий вид стенки строительного котлована, б) детальный снимок участка стенки

Опыт работ авторов на целом ряде ГТС Малоботуобинского района позволяет предполагать, что наблюдаемая, почти повсеместно, обходная фильтрация на гидротехнических сооружениях в основном связана с наличием зоны аэрации образованной в голоцене и замёрзшей в период неполного её водонасыщения. Т.е. вполне возможно наличие протяженных субгоризонтальных полостей, частично заполненных льдом, склоновая часть которых закупорена делювиально-коллювиальными льдистыми отложениями.

Так, например, на Сытыканском водохранилище, с помощью логгерных температурных наблюдений, проведенных в период начала паводка, было выявлено, что в начальный период паводка наблюдается быстрое понижение температур в незаполненной водой части коллектора. Предположительно, что поступление воды вытесняет холодный воздух заполняющий коллектор, затем, по мере его заполнения в ходе паводка, температура обусловленная поступающими из водохранилища фильтрационными водами начинает повышаться (Рисунок 4).

Эти процессы обуславливают специфический рост таликовой зоны, который удалось выявить многолетними мониторинговыми температурными наблюдениями. На рисунках представлены отдельные моменты механизма заполнения коллектора, в частности узкой температурной аномалией отмечен основной коллектор поступления фильтрационных вод. В дальнейшем, фильтрационные процессы начинают протаивать нижележащую толщу мерзлых пород, причём на достаточно ощутимую глубину до десятков метров.

В нашем конкретном случае, на участке правобережного примыкания Сытыканского гидроузла, удалось проследить начало продвижения фильтрационного потока по узкому каналу, связываемому нами, как уже указывалось выше с древней зоной аэрации. На рисунке 5 представлено характерное изменение температуры крупного участка примыкания в процессе замерзания в холодный период и последующего отепления и протаивания в летний период, и выявить участок основного канала фильтрации по резкому уменьшению его температуры в связи с падением уровня и температуры вод водохранилища (октябрь - февраль).

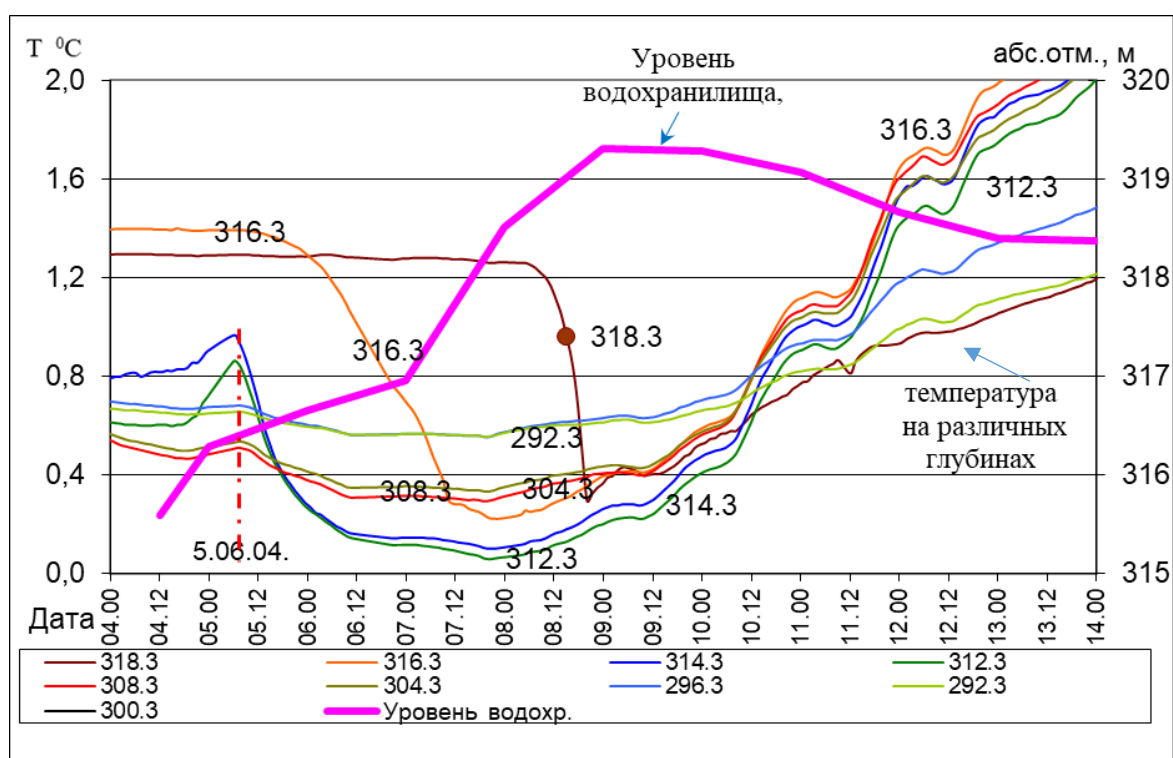
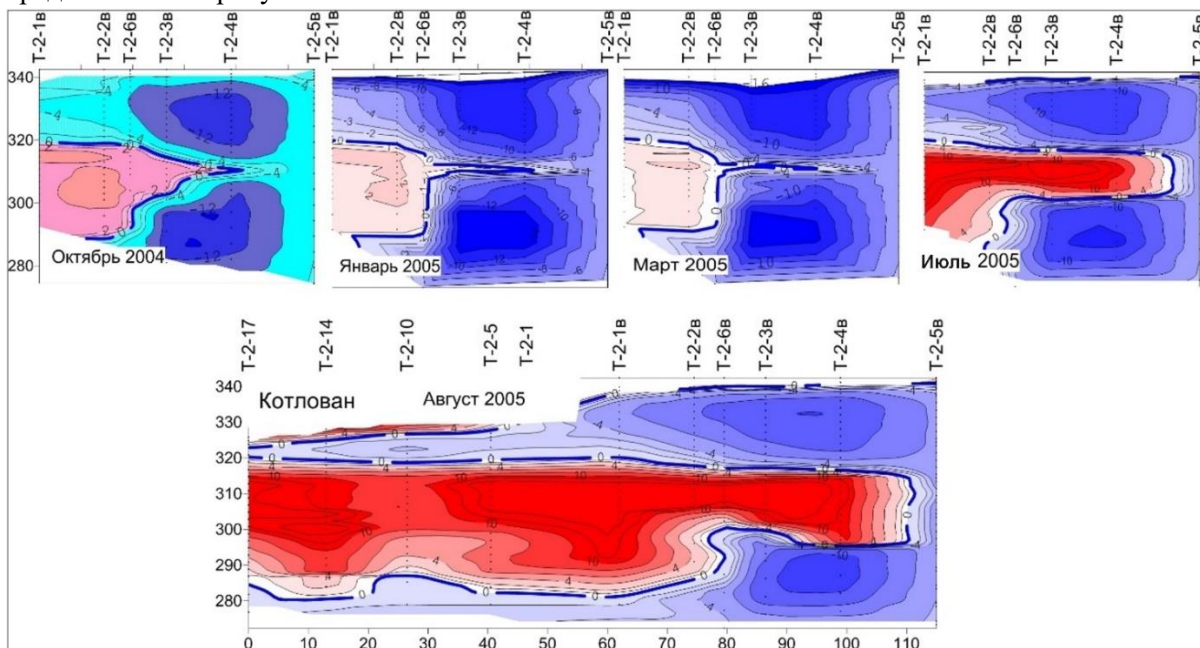


Рисунок 4 – Динамика температур по скважине на различных глубинах в момент начала паводка на Сытыканском водохранилище

Нужно отметить что своевременное выделение созданной захороненной древней зоной аэрации, это с одной стороны возможность упрощения ее цементации, что хорошо для восстановительных мероприятий, а с другой стороны, при незнании ее положения и параметров, эта зона основное место возможного аварийного прорыва создаваемой в ходе противофильтрационных мероприятий мерзлотно-цементационной завесы. Эта опасность может возникнуть во время ее создания, так как на не зацементированной части упомянутой

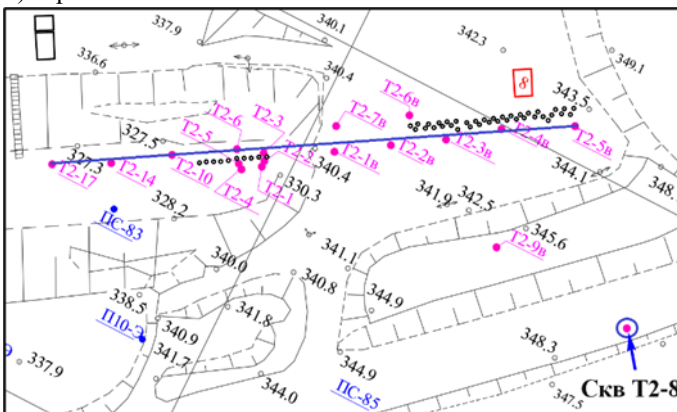
зоны аэрации должно резко возрасти давление фильтрационного потока, что собственно и представлено на рисунке 5.



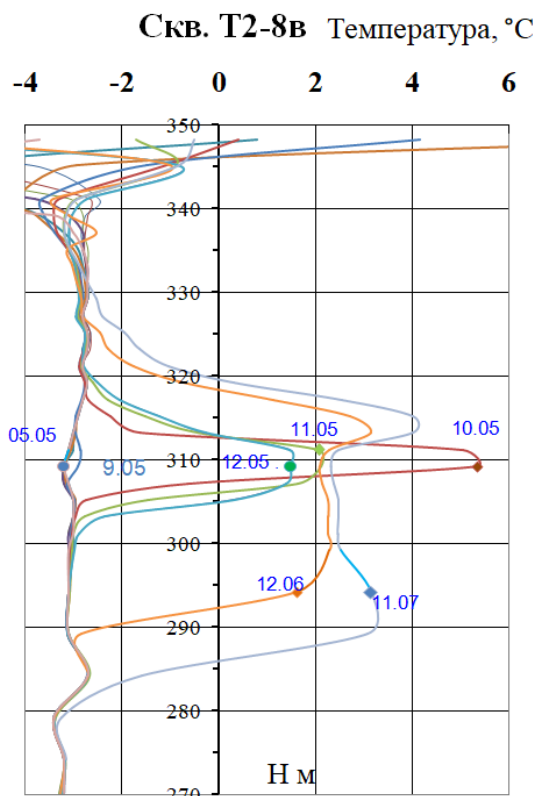
а) динамика температуры по профилю скважин вдоль цементно-мерзлотной завесы



б) строительный котлован



в) схема расположения наблюдательного профиля скважин на участке строительного котлована (цементно-мерзлотной завесы)



г) скв. 2-8в динамика температуры за 2005-2006 г.г

Рисунок 5 – Механизм образования фильтрации по зоне аэрации, образованной в голоцене.

Таким образом выявление и контроль потенциальных участков фильтрационных процессов связанных с наличием древних зон аэрации, замороженных в период неполного водонасыщения, является важными задачами инженерного мерзлотоведения и мерзлотной

геофизики. Тем более, что сам процесс отепления предсказать заранее очень сложно, и в ряде случаев он может проходить очень быстро.

3. Выводы

Вышеприведенные примеры и результаты наблюдений позволяют предположить, что в условиях Мало Ботуобинского района механизм обходной фильтрации во многих случаях связан с наличием древних зон аэрации, образованных в период голоценового оптимума и замороженных в условиях неполного водонасыщения. Причем своевременное их выявление, а также определение связи уже возникших процессов обходной фильтрации с наличием древних зон аэрации может сыграть существенную роль при проектировании как самих гидротехнических сооружений, так и мероприятий по ликвидации негативных процессов с ней связанных. Поэтому необходимость разработки комплекса методов и методик выявления и контроль потенциальных участков фильтрационных процессов связанных с наличием древних зон аэрации, замороженных в период неполного водонасыщения, является важными задачами инженерного мерзлотоведения и мерзлотной геофизики.

4. Благодарности

Работа выполнена в рамках базового проекта СО РАН № 122011800076-2 и финансовой поддержке ПАО АЛРОСА.

5. Литература:

- [1] Bomkin S.V. Sukhno A.M. Classification of mechanisms for the development of emergency situations at ground hydraulic structures in the permafrost zone. News of Universities. Series Construction. 2011.No. 3. With. 52-63. Geocryology of the USSR. Central Siberia. Moscow. "Bosom". 1989.
- [2] General permafrost science. Ed. Kudryavtseva V.A. Moscow, Moscow publishing house. Univ., 1978.
- [3] Olovin B.A. Filtration permeability of permafrost soils. – Novosibirsk. VO—Sciencel. Siberian publishing company, 1993.
- [4] Report on survey work for the design assignment for the construction of a reservoir dam on the Irelyakh River. Research 1956-1957 “Giprozoloto”
- [5] Romanovsky N.N. Groundwater of the permafrost zone. M., MSU. 1983
- [6] Shepelev V.V. Suprapermafrost waters of the permafrost zone / V.V. Shepelev; resp. ed. R.W. Zhang; Ross. acad. Sciences, Sib. Department, Institute of Permafrost Studies named after. P.I. Melnikova. – Novosibirsk: Academic Publishing House “Geo”, 2011. – 169 p. – ISBN978–5–904682–34–7

**ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОКОНТРАСТНЫХ АНОМАЛИЙ В
ДОННЫХ ОСАДКАХ РЕК НА ТЕРРИТОРИИ С ФОНОВЫМ СОДЕРЖАНИЕМ
ЭЛЕМЕНТОВ В ПОЧВЕ**

Сергей Воробьев

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова»,
119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, 1

**PROCESSES OF FORMATION OF HIGH-CONTRAST ANOMALIES IN RIVER
BOTTOM SEDIMENTS IN THE TERRITORY WITH BACKGROUND CONTENT
OF ELEMENTS IN SOIL**

Sergey Vorobyev

Lomonosov Moscow State University, 1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

Abstract. Geochemical surveys on a scale of 1:200000 on the southeastern rim of the Anabar Shield revealed high-contrast extended scattering streams of titanium, iron, vanadium, niobium and other elements with the content of elements by an order of magnitude or more exceeding their content in the eluvio-deluvial formations on the banks of adjacent river slopes. In some parts of the riverbed with the length of more than 20 km, the content of titanium dioxide in bottom sediments reaches 30% with the value of geochemical background of alluvium equal to less than 1%. The model of migration of mineral particles in bottom sediments allowed estimating the values of parameters characterizing the rates of arrival of loose formations from river banks and their subsequent movement along the channel, as well as the rates of accumulation of heavy and mechanically stable mineral particles in bottom sediments. These data make it possible to establish the proportionality coefficients between the productivity of ore elements in the dispersion streams and secondary halos on the coastal slopes. This information is necessary for estimation of inferred mineral resources.

1. Введение

В 2021-22 г геохимическая партия ФГБУ на территории, именуемой как Мюнюсяхская площадь, провела съемку по потокам рассеяния масштаба 1:200000 на юго-восточном обрамлении Анабарского щита, в административном отношении район работ относится к Оленекскому улусу Якутии. Положение точек опробования на геологической карте с указанием содержания двуоксида титана показано на рисунке 1.

Территория, где выявлены высокопродуктивные потоки, сложена архейскими породами верхнеанабарской (ARva) и далдынской (ARkl) серий северо-восточного простирания. Они представлены разнородными по составу гнейсами, метабазами и метапелитами амфиболитовой и гранулитовой фаций метаморфизма с редкими разрозненными линзовидными телами магнетитовых кристаллических сланцев, протяженностью до 3 км и мощностью до 250 м. [1].

Ландшафт этой части Анабарского массива представлен каменистой болотистой тундрой, дренируемой многочисленными притоками рек, по ландшафтно-геохимическим условиям относится к денудационно-аккумулятивным равнинам с чехлом автохтонных образований переменной мощности.

В русле реки Малая Куонамка выявлены высококонтрастные потоки рассеяния титана, железа, марганца, ванадия и других элементов протяженностью около 15 км. В таблице 1 приведены содержания компонентов в донных осадках и почве покрова в области геохимического фона и бассейне водосбора реки Малая Куонамка.

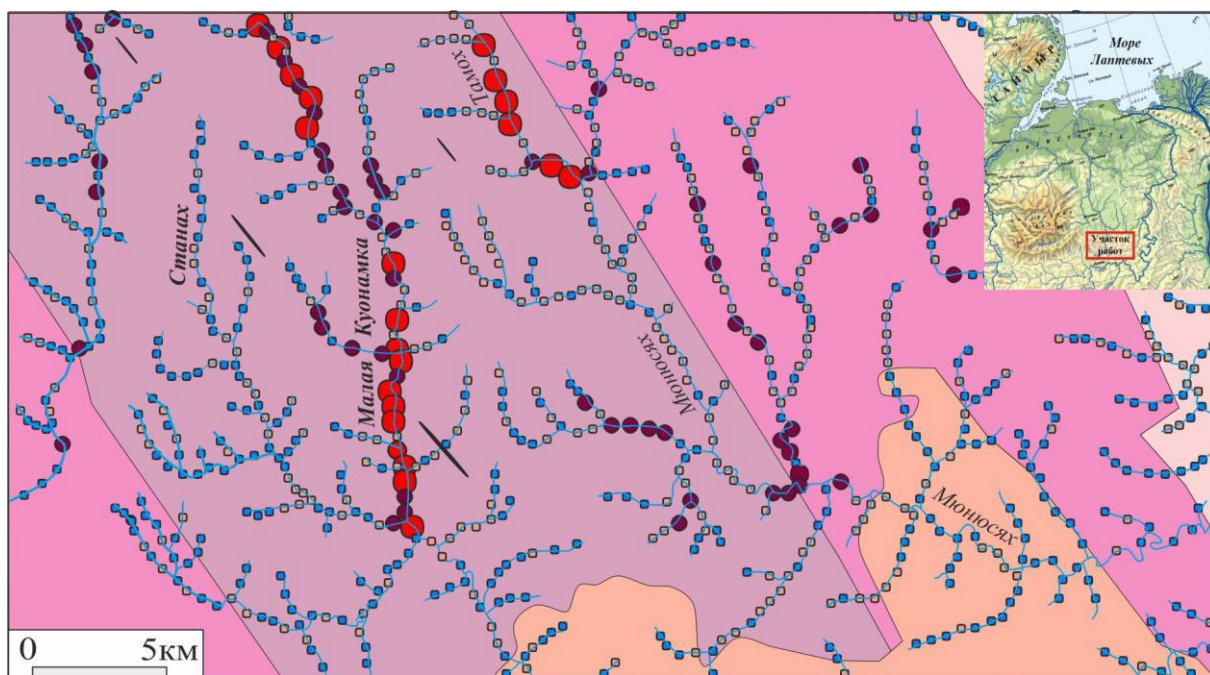


Рисунок 1 – Распределение содержаний оксида титана в донных осадках Мюнюсяхской площади:
 1. Песчаники, доломиты. 2. Биотит – амфиболитовые гнейсы. 3. Гиперстенные гнейсы. 4. Биотит-гранатовые, диопсид-каполитовые породы. 5. Магнетитовые кристаллические сланцы [1].

По данным опробования элювио-делювиальных образований береговых склонов в бассейне водосбора реки нет геохимических аномалий. Распределение оксида титана в современной коре выветривания бассейна водосбора однородно по всей его территории, среднее содержание двуокиси титана в почве равно 0,95%, что соответствует кларку глинистых сланцев [2].

Таблица 1 – Средние содержания компонентов в рыхлых образованиях Мюнюсяхской площади, %

Компонент	Na_2O	MgO	Al_2O_3	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	Fe_2O_3	V
Бассейн водосбора р. Малая Куонамка									
Аллювий n= 51	2,27	1,76	9,38	0,63	3,18	10,40	0,16	20,71	0,63
Почва n= 39	3,42	2,25	16,35	1,33	4,10	0,91	0,08	6,86	0,11
Область геохимического фона									
Аллювий n=727	2,75	1,74	13,71	1,81	3,36	0,95	0,10	6,02	0,10
Почва n= 227	2,37	1,97	14,94	2,23	2,96	0,89	0,09	6,93	0,12

Состав донных отложений реки Малая Куонамка резко отличается от состава почвы на ее береговых склонах. На отдельных участках русла, содержание двуокиси титана в донных осадках достигает 28% при величине местного геохимического фона аллювия равным 0,95%. Главной минеральной формой титана в донных отложениях аномального участка является титаномагнетит с высоким содержанием железа, ванадия, марганца и других элементов [2]. Высокая удельная плотность и механическая устойчивость его зерен обусловили формирование в приустьевой части реки россыпи подобной аномалии протяженностью около 15 км. В ее пределах содержание макроэлементов (Al, K, Na, Ca), слагающие алюмосиликатные минералы основной массы аллювия, в 1,5-2 раза ниже фона, это обусловлено тем, что их частицы менее устойчивы к механическим воздействиям, чем титаномагнетит, и интенсивно измельчаются и вымываются водой.

На левом фрагменте рисунка 2 показаны точки опробования донных отложений и почв в бассейне водосбора реки Малая Куонамка, на правом - графики распределения содержания оксидов титана, железа и марганца в донных осадках и почве от верховья к устью реки. Распределения оксидов титана и сопутствующих ему элементов в аллювиальных отложениях полностью совпадают, что указывает на их сходный механизм миграции

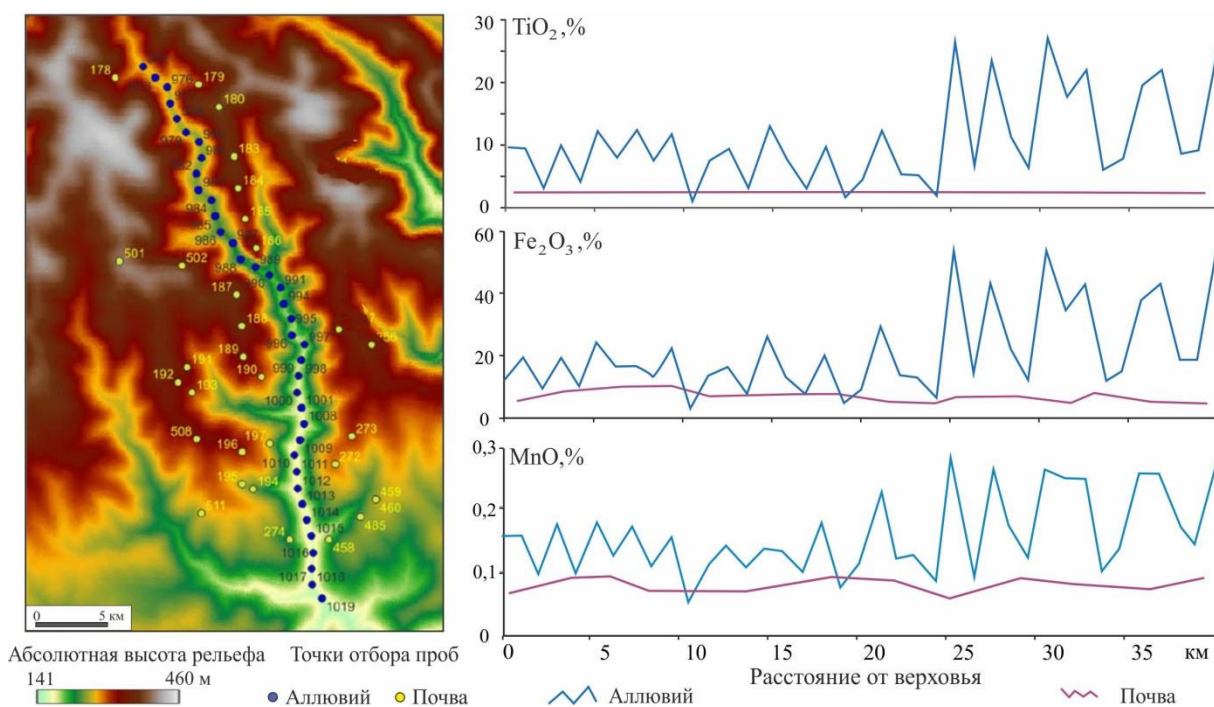


Рисунок 2 – Строение рельефа бассейна водосбора реки Малая Куонамка по данным [3] с указанием точек пробоотбора и графики распределения содержания макроэлементов в аллювии и почве

В русле реки выделяются два интервала с разным содержанием элементов в аллювии, условно именуемых как верхний и приустьевой. В донных осадках верхнего участка среднее содержание TiO_2 равно 7,3%, в приустьевом - 13,9%. На всем протяжении реки содержание титана и сопутствующих ему элементов в почве береговых склонов постоянно, поэтому можно предположить, что формирование геохимических аномалий обусловлено строением рельефа бассейна водосбора. На рисунке 2 видно, что приустьевая часть русла имеет более широкую речную долину, чем в верховье, по данным ресурса ArcticDEM [3] уклон его ложа на этом интервале реки в среднем в 1,5 раза меньше, чем на вышерасположенном участке. Для оценки влияния строения рельефа на формирование состава аллювия необходимо определить численные значения параметров, характеризующих закономерности распределения содержаний элементов по речному руслу, это может быть выполнено, исходя из модели миграции элементов в донных отложениях, транспортируемых водным потоком.

2. Параметры потока рассеяния реки Малая Куонамка

Модели взаимосвязи состава донных отложений рек и почв на их берегах впервые были разработаны в середине прошлого столетия [4]. Исходя из предположения, что главным фактором формирования потока рассеяния является смещение снесенной с берегов почвы с русловым аллювием, соотношение между количествами (продуктивностями) элемента донных отложениях рек (P') и на береговых склонах (P), выражается равенством: $P' = k' P$. Аналитических выражений, характеризующих физическую суть коэффициента пропорциональности k' предложено не было, его численные значения определялись сравнением продуктивностей геохимических аномалий в обеих средах, полученные оценки распространялись на территории со сходными геологическими и ландшафтными условиями. Однако, как показывает практика, величина k' часто имеет противоположные значения в

пределах одной и той же рудной зоны на территории с одним ландшафтом. Поэтому необходимы методы определения этого показателя по данным состава донных отложений до работ по выявлению геохимических аномалий на береговых склонах.

Уравнение баланса масс на любом участке русла, включает в себя три основных составляющих: 1 - поступление элювио-делювиальных образований с берегов в русло; 2 - перераспределение минеральных частиц аллювия в процессе миграции по руслу; 3 - вынос или накопление элементов при гипергенных преобразованиях минеральных частиц аллювия.

Математическая модель, описывающая изменение состава донных отложений водотоков как функции вышележащей площади водосбора приведена в работе [5]. Однако, как показывает практика геохимических съемок по потокам рассеяния, содержание элементов в донных осадках слабо зависит от вариаций площади водосбора, скачкообразно возросшая площадь водосбора, при впадении притоков, незначительно меняет содержание элементов в донных осадках главного русла, поэтому уравнение баланса масс, приведенное в работе [5], в этих случаях можно преобразовать к более простому виду:

$$(1) \quad dC'_x/dx = \alpha \cdot C_x - (\alpha + \gamma) \cdot C'_x ,$$

где C_x и C'_x - содержание элемента в почве на берегах вдоль русла и в аллювии, соответственно; x - расстояние от начала русла; α - коэффициент аллювия; γ - кинетическая константа.

Коэффициент аллювия α , имеет размерность m^{-1} и характеризует соотношение удельных расходов материала на единицу длины русла, транспортируемого водным потоком по руслу реки и поступающего с метеорными водами с береговых склонов. Кинетическая константа γ , имеет ту же размерность и характеризует интенсивность накопления - выноса минеральных частиц из аллювия при его движении по руслу, по своей физической сути она равна нормированной разности скоростей поступления рыхлого материала в русло (U_r) и выноса (U_m) из него минеральных частиц водным потоком: $\gamma = \mu(U_r - U_m)/U_r$, μ - гидродинамическая константа. В силу этого γ - знакопеременная величина, при выносе загрязнителя из аллювия она имеет отрицательный знак, при накоплении - положительный.

Решение уравнения (2) позволяет найти зависимость между содержанием элемента в аллювии реки (C'_x) и в почве (C_x) на ее берегах:

$$(2) \quad C'_x = \int_0^x \alpha \cdot C_x \cdot e^{(\alpha+\gamma)x} dx \cdot e^{-(\alpha+\gamma)x}$$

Содержание элементов на берегах реки Малая Куонамка постоянно на всем ее течении, поэтому зависимость (2) можно, преобразовать, подставив в нее функцию, описывающую их распределение вдоль русла, $C_x = C_0 - \text{const}$. После математических преобразований зависимость (2) выражается формулой:

$$(3) \quad C'_x = C_0[\alpha/(\alpha-\gamma) + \alpha/(\alpha-\gamma)e^{-(\alpha-\gamma)x}]$$

Из полученного уравнения следует, что с удалением от истока содержание элементов в донных осадках выходит на постоянный уровень и пропорционально их содержанию в почве на береговых склонах. Коэффициент пропорциональности между ними зависит от соотношения значений коэффициента аллювия и кинетической константы, $k' = \alpha/(\alpha-\gamma)$. Численные значения констант α и γ можно определить методом оптимизации коэффициентов уравнения (3) по данным распределения содержания элементов в донных отложениях. Из уравнения (3) следует, что коэффициент пропорциональности k' так же равен отношению средних содержаний и продуктивностей элемента в аллювии русла и почве на его берегах, $k' = \overline{C'_x} / \overline{C_x} = P'/P$. Близость его численных значений, полученных двумя независимыми способами, служит критерием достоверности оценок коэффициентов α и γ . Величины коэффициента аллювия α , кинетической константы γ и коэффициента пропорциональности k' , а так же средние содержания элементов в донных осадках ($\overline{C'_x}$) и почве на береговых склонах ($\overline{C_x}$) верхнего и приустьевого интервалов русла реки Малая Куонамка приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры потоков рассеяния русла р. Малая Куонамка

Оксид	$\overline{C}_x, \%$	Верхний интервал реки					Нижний интервал реки				
		$\overline{C}'_x, \%$	k_1	α	γ	k_1	$\overline{C}_x, \%$	k_2	α	γ	k_2
TiO ₂	0,95	7,28	7,7	3,85	3,32	7,2	14,2	14,9	4,6	4,31	15,3
Fe ₂ O ₃	6,91	14,61	2,1	1,21	0,65	2,2	28,1	4,1	2,23	1,72	4,3
MnO	0,085	0,14	1,6	0,22	0,07	1,5	0,19	2,2	0,62	0,36	2,4

Примечание. Значения констант α и γ имеют размерность 10^{-3} м^{-1} .

Коэффициенты пропорциональности между содержанием оксидов титана, железа и марганца в донных отложениях и почве в верхнем и приустьевом участках реки Малая Куонамка различаются в среднем 1,8 раза, что соответствует отношению уклонов русла на этих участках реки. Значения коэффициента аллювия α и кинетической константы γ связаны линейной зависимостью и согласовано меняются на разных участках реки. Они являются параметрами, характеризующими процесс миграции минеральных частиц аллювия в русле под воздействием течения воды и накопления в них элементов, образующих тяжелые и механически устойчивые минеральные соединения. Установление точной функциональной взаимосвязи численных оценок этих параметров с формой и крутизной рельефа требует дополнительных исследований.

3. Выводы

Получены уравнения, описывающие взаимосвязь состава донных отложений водотоков и почв на их берегах. По данным распределения оксидов титана, железа и марганца в донных осадках реки Малая Куонамка в юго-восточной части Анабарского щита определены численные значения констант, определяющих величину коэффициентов пропорциональности между количествами этих компонентов в обоих типах рыхлых образований. Методы оценки коэффициентов пропорциональности могут быть использованы для оценки прогнозных ресурсов минерального сырья по данным геохимических съемок по потокам рассеяния и эколого-геохимических работах.

4. Благодарности

Автор выражает свою искреннюю благодарность сотрудникам ФГБУ «Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов» за предоставленные материалы и консультации.

5. Литература:

- [1] Ivliev K.A. State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:200,000. Series Anabarskaya. Sheet R-49-XXIX, XXX (r. Stannakh). Moscow. 1995.
- [2] Trofimov A.P. et al. Geochemical signatures of diamond, uranium, rare-metal nodules and fields of South-Eastern Anabar / FGBU "IMGRE", Moscow, Russia. 2022. Collection of abstracts of the All-Russian scientific and practical conference "Improving the efficiency of multi-scale geochemical work in the geological study of subsurface resources". 2022 pp.16-19.
- [3] Porter et setera "ArcticDEM - Strips, Version 4.1," <https://doi.org/10.7910/DVN/C98DVS>, Harvard Dataverse, (2022). V1.
- [4] Reference book on geochemical methods of prospecting for mineral deposits. Moscow: Nedra. 1990. 335 pp.
- [5] Vorobyev S.A. Models of quantitative interrelation of secondary halos and sediment streams. Prospecting and protection of subsoil. 2009. №5. pp.19-22.

**ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ БИОПРЕПАРАТА
«ЛЕНОЙЛ»®–NORD ДЛЯ ОЧИСТКИ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ
ПОЧВ АРКТИКИ**

Юлия Глязнецова¹, Ольга Львова¹, Ньургустаана Попова¹, Надежда Васильева²,
Наталья Чербакова³

¹ ФГБУН ФИЦ «ЯНЦ СО РАН» «Институт проблем нефти и газа СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, ул. Петровского, 2

² ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова»,
677000, Россия, г. Якутск, ул. Белинского, 58

³ ФГБУН ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН», Научно-исследовательский институт
сельского хозяйства и экологии Арктики, 663305, Россия, г. Норильск, ул. Комсомольская, д. 1

**GEOCHEMICAL EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE
BIOPREPARATION "LENOIL"®-NORD FOR THE TREATMENT OF
OIL-CONTAMINATED SOILS IN THE ARCTIC**

Yuliya Glyaznetsova¹, Olga Lvova, Nurgustaana Popova, Nadezhda Vasilieva², Natalia Cherbakova³

¹ Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, 2, Petrovsky str, Yakutsk, 677980, Russia

² North-Eastern Federal University, 58, Belinsky str., Yakutsk, 677000, Russia

³ Krasnoyarsk Science Center SB RAS, Research Institute of Agriculture and Ecology of the Arctic,
Norilsk, Komsomol'skaya str., 1, 663305, Russia

Abstract. Using geochemical methods in the process of experimental research, the possibility of using the biological preparation “Lenoil” ®–NORD, SHP for cleaning soils from oil pollution in the Arctic conditions was studied. The effectiveness of the biological preparation was assessed. Tests of the biological preparation were carried out in a model soil system under laboratory, also field conditions on the territory of the Norilsk industrial region. It was established that in tests the degree of destruction in 60 days at different concentrations of added diesel fuel (1% and 5%) was 67 % and 86 %, respectively. In a field experiment for 38 days the cleaning efficiency was 53 %. Changes occurred in the group composition of soil extracts: the proportion of hydrocarbon components decreased significantly, the content of resins and asphaltenes increased, and the amount of oxygen-containing compounds in their chemical structure increased. Such changes indicate biochemical oxidation of petroleum components. It was established that in 38 days the residual oil products content in soils remained high at 12430 mg/kg. This requires continued cleanup work and further monitoring of the remediation of oil-contaminated Arctic soils.

1. Введение

Разливы нефтепродуктов (НП) в Арктике происходят довольно часто, как при добыче углеводородного сырья, так при его транспортировке и хранении [1–4]. Нефтезагрязнения при низких арктических температурах труднодоступны для бактериального разложения, поэтому скорость трансформации нефтяных углеводородов (УВ) очень медленная [3–5]. Вследствие этого важной задачей является разработка наиболее экологичных методов восстановления нарушенных земель, что позволит сократить срок восстановления почв и минимизировать негативные последствия влияния антропогенного воздействия на окружающую среду Арктики. Наиболее безопасным считается биологический способ очистки нефтезагрязненных почв, когда трансформация загрязнения осуществляется преимущественно за счет микроорганизмов-нефтедеструкторов [5, 6]. Наряду с преимуществом данный способ имеет и ряд ограничений, основное из которых это низкая эффективность в районах с холодным климатом. На сегодняшний день уже разработано несколько биопрепаратов на основе криофильных

бактерий, способных разлагать и утилизировать УВ в условиях низких положительных температур [7–9].

Целью работы было изучение возможности применения биопрепарата «Ленойл»® - NORD, СХП в условиях Арктики и оценка его эффективности по результатам геохимических исследований.

Биопрепарат торговой марки «Ленойл»®-NORD, СХП производства ЗАО НПП «Биомедхим» предназначен для биологической обработки нефтезагрязненных почв, грунтов в условиях низких положительных температур (от +2°C) [10]. Его применение сокращает сроки биорекультивации, что особенно ценно в районах с коротким вегетационным периодом.

Испытания биопрепарата проводили в модельной почвенной системе в камеральных условиях, а также в полевых условиях на территории Норильского промышленного района, относящегося к Арктической зоне РФ.

Комплекс аналитических методов исследования включал: извлечение органических веществ из проб почв методом холодной экстракции в хлороформе; изучение структурно-группового состава хлороформенных экстрактов (ХЭ) методом ИК-Фурье спектроскопии; определение группового компонентного состава ХЭ методом жидкостно-адсорбционной колоночной хроматографии [6]. Опытные испытания биопрепарата и все аналитические исследования проводили в трех повторностях. В таблицах и на рисунках полученные результаты представлены в виде средней арифметической величины.

2. Результаты

Для камеральных опытов была использована чистая фоновая почва, отобранная на ключевом участке в районе г. Норильск. На этой же территории были заложены полевые опытные участки для испытания биопрепарата. Участок расположен на типичной для района бугристой лесотундре северной экспозиции. Почвы криометаморфические, по гранулометрическому составу среднесуглинистые. В качестве загрязнителя использовалось дизельное топливо (ДТ). Биопрепарат «Ленойл»® - NORD представляет собой сухой порошок светло-кремового цвета, в состав которого входят клетки штамма *Pseudomonas sp.* ИБ 1.1. Штамм выделен из нефтезагрязненной почвы Красноярского края, депонирован во Всероссийской коллекции микроорганизмов (ВКМ В-2831D) [10].

Для камеральных опытов чистые почвы были помещены в вегетационные сосуды и искусственно загрязнены ДТ в концентрациях 1% и 5% от массы почвы, затем обработаны биопрепаратом в виде суспензии. Сосуды находились в помещении при постоянной температуре +15°C. Температура была выбрана с учетом средней температуры летних месяцев, характерной для Норильска. Время экспозиции биопрепарата составило 60 сут. Для определения остаточного содержания НП в почвах и изучения изменения химического состава нефтезагрязнения, почвы отбирали в 1 сутки эксперимента (до внесения в почвы биопрепарата), 30-е сутки и 60-е сутки. Все испытания проводили в сравнении с контрольным опытом, в почвы которого добавляли ДТ в тех же дозах, но обработка биопрепаратом не производилась. Аналогичная схема постановки испытаний была для полевых опытных участков, продолжительность полевого эксперимента составила 38 сут.

Для оценки эффективности биопрепарата используют показатель остаточного содержания нефтепродуктов в почве по отношению к исходному загрязнению и называют его степенью деструкции (Кдестр.). При этом следует учитывать, что общее снижение содержания НП обусловлено не только процессами биодеградации, но и испарением ДТ, физико-химической трансформацией и другими факторами. Как видно из приведенных данных, на протяжении всего эксперимента наблюдается выраженная динамика уменьшения концентрации НП в почвах как при 1-процентном, так и при 5-процентном загрязнении (Рисунок 1, Таблица 1). Степень деструкции за 60 сут. эксперимента составила 70% и 86 %, соответственно, по сравнению с контрольным вариантом, где степень деструкции составила всего 14 – 21 % (Таблица 1). Вероятнее всего в контрольном варианте уменьшение содержания НП происходило в основном за счет испарения легких фракций ДТ.

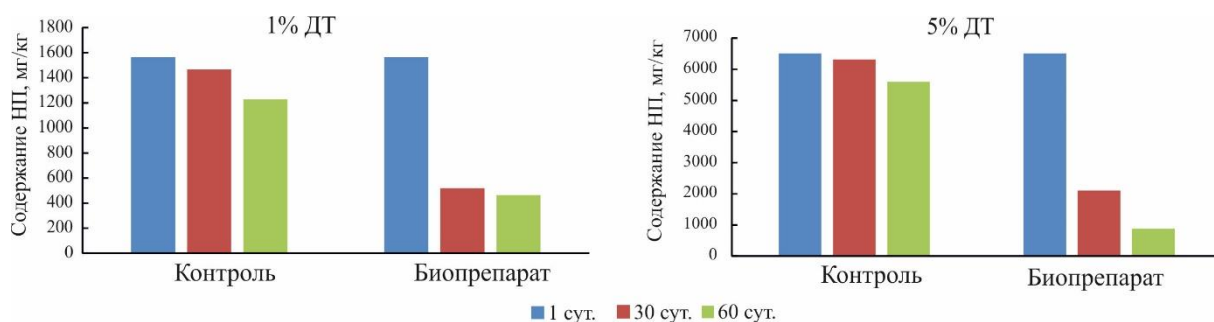


Рисунок 1 – Динамика изменения содержания НП в почвах камерального эксперимента

Таблица 1 – Динамика изменения состава ХЭ почв в процессе камеральных испытаний биопрепарата

Параметры	Варианты опытов					
	Исходное загрязнение	Контроль	Биопрепарат	Исходное загрязнение	Контроль	Биопрепарат
Время экспозиции, сут.	1	60	60	1	60	60
Концентрация ДТ, %	1	1	1	5	5	5
Содержание НП, мг/кг	1564	1230	465	6352	4598	496
Кдестр., %		21	70		14	86
Групповой состав ХЭ:						
УВ, %	96,51	89,59	48,72	97,64	82,10	55,93
Бензольные смолы, %	1,00	1,12	8,92	1,01	4,61	11,03
Спирто-бензольные смолы, %	2,12	5,99	34,19	0,88	9,95	28,41
Сумма смол, %	3,12	7,10	43,11	1,89	14,56	39,44
Асфальтены, %	0,37	3,31	3,34	0,97	3,34	4,63

Наряду с уменьшением содержания НП произошли изменения в структурно-групповом составе экстрактов, свидетельствующие о биологической деструкции загрязнения. Об этом можно судить по относительным коэффициентам поглощения кислородсодержащих групп и связей ХЭ почв, рассчитанным по данным ИК-Фурье спектроскопии. Так, при 1 % концентрации ДТ в почвах в 4 раза увеличилось количество эфирных связей - D'_{1170} на 30 сут. эксперимента и в 6,6 раз на 60 сут. по сравнению с исходным загрязнением и контролем (Рисунок 2а), в 16 раз возросло количество карбонильных групп – D'_{1710} (Рисунок 2б) и появились гидроксильные группы в области 3300 см^{-1} (Рисунок 2в).

При 5 % концентрации ДТ в 5 раз возросло содержание эфирных связей (Рисунок 2г) и в 13 раз – карбонильных групп (Рисунок 2д). Также было высокое содержание гидроксильных групп D'_{3300} по сравнению с контрольным вариантом, в котором гидроксильные группы отсутствовали на протяжении всего эксперимента (Рисунок 2е).

В групповом компоненте составе ХЭ через 60 сут. после применения биопрепарата в 2 раза снизилось содержание углеводородных компонентов и увеличилось содержание смолисто-асфальтеновых, главным образом за счет новообразования спирто-бензольных смол (Таблица 1). Такая тенденция наблюдается как при 1% ДТ, так и при 5 %. В контрольном опыте изменения незначительные и обусловлены главным образом, процессами испарения ДТ с поверхности почвы.

Испытания биопрепарата в условиях открытой экосистемы показали, что всего за 38 сут. удалось снизить концентрацию НП в почвах опытных участков в 2 раза, степень деструкции составила 53% (Таблица 2).

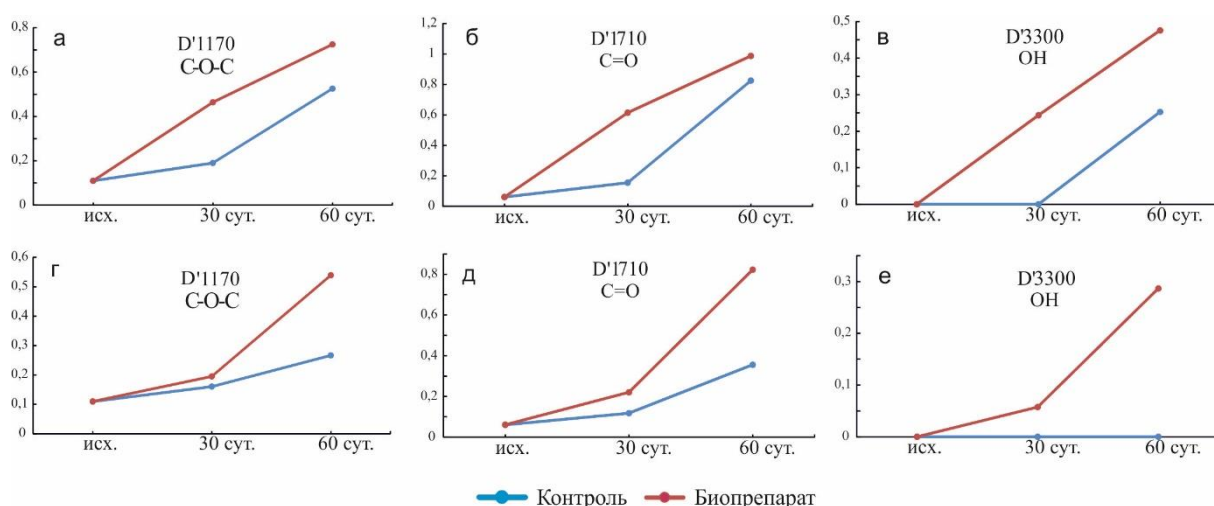


Рисунок 2 – Изменение относительных коэффициентов поглощения кислородсодержащих групп в процессе биологической очистки почв: при 1%-ной концентрации ДТ (а, б, в); 5%-ной (г, д, е).

Можно предположить, что какая-то часть ДТ, добавленного в опытные участки, испарилась с поверхности почвы уже в первые сутки. Этому способствовали погодные условия – температура воздуха на время закладки опытных участков в среднем составляла 15,6 °С и оставалась на данном уровне практически на протяжении всего эксперимента, что повлияло на уменьшение влажности почвы и испарение НП. Тем не менее, наряду с уменьшением концентрации НП в почвах произошли изменения и в групповом составе почвенных экстрактов, в которых снизилась доля углеводородных компонентов с 87% до 73% (Таблица 2). По данным ИК-Фурье спектроскопии через 38 сут. после внесения в почву биопрепарата возросло содержание кислородсодержащих соединений, что выражается также в увеличении спектральных коэффициентов – количество карбонильных групп возросло в 4,5 раза, эфирных связей в 3 раза, появились гидроксильные группы (Таблица 2). Все это указывает на процессы микробной деструкции нефтяных УВ.

Таблица 2 – Геохимическая характеристика почв в процессе биологической очистки в полевых условиях

Параметры	Исходное загрязнение	Опытный участок после
	до очистки	очистки
Время экспозиции, сут.	1 сут.	38 сут.
Содержание НП, мг/кг	26616	12430
К дестр., %		53
Групповой состав ХЭ:		
УВ, %	87,44	73,00
Бензольные смолы, %	1,45	2,72
Спирто-бензольные смолы, %	7,06	12,76
Сумма смол, %	8,51	15,48
Асфальтены, %	4,05	11,52
D'1170	0,11	0,33
D'1700	0,09	0,41
D'3300	0,00	0,09

3. Выводы

Применение биопрепарата-нефтедеструктора «Ленойл»®–NORD, СХП позволило значительно снизить концентрацию НП в почвах как в камеральном опыте (при разных уровнях загрязнения

эффективность очистки за 60 сут. составила 67% и 86 %), так и в полевом эксперименте (за 38 сут. 53 %). Результаты геохимических исследований по оценке эффективности применения биопрепарата позволили установить признаки биохимического окисления нефтяных структур. После очистки произошли изменения в составе нефтезагрязнения: в групповом составе почвенных экстрактов значительно снизилась доля углеводородных компонентов, в структурно-групповом составе возросло содержание кислородсодержащих соединений. Несмотря на происходившие процессы биodeградации нефтезагрязнения, следует отметить, что за 38 сут. эксперимента остаточное содержание НП в почвах все еще оставалось высоким 12430 мг/кг, что требует продолжения очистных работ с повторной обработкой почв биопрепаратом и дальнейшего мониторинга за процессами восстановления почв. В результате проведенных исследований показана способность биопрепарата «Ленойл»®–NORD, СХП повысить эффективность биоразложения НП в почве, что позволяет рекомендовать его применение для очистки арктических почв.

4. Благодарности

Результаты работы получены в рамках Госзадания Министерства науки и высшего образования РФ №122011200369-1 с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН в рамках гранта № 13. ЦКП.21.0016.

5. Литература:

- [1] Troshko, K.A., Denisov, P.V. and Lavrova, O.Yu., 2020. Observation of pollution of the Ambarnaya River resulting from an accident at the CHPP-3 of the city of Norilsk on May 29, 2020 // Current problems in remote sensing of the Earth from space, 2020, vol. 17, No 3, pp. 267–274.
- [2] Diagnosticheskii analiz sostoiianiia okruzhaiushchei sredy arkticheskoi zony Rossiiskoi Federatsii (rasshirennoe reziume) [Diagnostic analysis of the environmental state of the Arctic zone of the Russian Federation (extended summary)]. Moscow: Nauchnyi mir, 2011, 124 pp.
- [3] Yurkevich, N.V., Eltsov, I.N., Gureev, V.N. and Mazov, N.A. Technogenic effect on the environment in the Russian Arctic by the example of the Norilsk industrial area // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2021, vol. 332, No 12, pp. 230–249.
- [4] AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme). Sources, Inputs and Concentrations of Petroleum Hydrocarbons, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, and Other Contaminants Related to Oil and Gas Activities in the Arctic. Oslo, Norway, 2007, vol. 4, 87 pp.
- [5] Margesin R., Schinner F. Biodegradation and bioremediation of hydrocarbons in extreme environments // Applied Microbiology and biotechnology. 2001. vol. 56, No. 5-6. pp. 650–663.
- [6] Lifshits, S.Kh, Glyaznetsova, Yu.S., Chalaya, O.N. and Zueva I.N. Increase in remediation processes of oil-contaminated soils. // Remediation, 2017, vol. 28, pp. 97–104.
- [7] Patent of the Russian Federation No. 2565549. Biopreparation for bioremediation of oil-contaminated soils for the climatic conditions of the Far North. Application: 2013155969/10, 12/17/2013. Published: 20.10.2015. Authors: Erofeevskaya L.A., Glyaznetsova Yu.S.
- [8] Patent of the Russian Federation No. 2539148. Method of soil cleaning from oil under conditions of low positive temperatures by psychrotolerant bacteria *Pseudomonas sp.* ИБ-1. 2015. Authors: Loginov, O.N., Chetverikov, S.P., Korshunova, T.Y., Valiullin, E.G., Bakaeva, M.D. and Farukhshin D.F.
- [9] Markarova, M. Yu. Use of hydrocarbon-oxidizing bacteria for the restoration of oil-contaminated lands in the Far North: specialty 03.02.03 "Microbiology": dissertation abstract for the degree of Candidate of Biological Sciences. Perm, 1999.
- [10] Korshunova, T.Yu., Loginov, O.N. Toxicological assessment of bio preparation oildestructor "Lenoil"® – NORD, SHP // Toksikologicheskii vestnik, 2008, No 3(90), pp. 43-44.

ТЕРМИН «ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ»: ИСТОРИЯ И ТЕКУЩИЕ ДЕБАТЫ

Анна Гололобова

ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

THE TERM “HEAVY METALS”: HISTORY AND CURRENT DEBATES

Anna Gololobova

Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. This article is devoted to the analysis of existing terms “heavy metals”. Here, we followed the evolution in the number of published papers including this term in their title. Other alternative concepts have been proposed by different authors that could replace it in the scientific literature with terms such as "metal", "metalloid", "trace metal elements" or "potentially toxic element".

1. Введение

В течение долгого времени термин «тяжелые металлы» использовался в законодательстве и различных публикациях, касающихся химической опасности и безопасного использования химических веществ [1]. Этот термин обычно используется как общий термин для металлов и металлоидов, связанных с загрязнением окружающей среды, токсичностью и неблагоприятным воздействием на живые организмы, включая человека [2]. В последнее время термин «тяжелый металл» регулярно подвергается сомнению научным сообществом и предлагается заменить его в научной литературе другими терминами.

2. История

Определение «тяжелые металлы» было предложено немецким химиком Леопольдом Гмелиным в 1817 году [3]. Согласно статьям зарубежных авторов, информация о первом упоминании термина «тяжелые металлы» в англоязычной научной литературе, содержится в 3-м датском издании «Неорганическая химия» Бьеррума, 1936 г. В русскоязычной специализированной научной литературе, термин появляется гораздо позднее. В 1977 выходит в свет «Справочник по элементарной химии» под ред. А.Т. Пилипенко, в дальнейшем данный термин периодически модифицируется различными авторами [4].

Интерес к тяжелым металлам особенно возрос после сообщений из японских источников о заболеваниях Минаматы и итай-итай. Причиной первого из них, как известно, стало употребление в пищу отравленной ртутью рыбы. При этом наиболее тяжелые случаи заболевания заканчивались параличом, слепотой, расстройством психики и речи. Младенцы подвергались интоксикации еще до появления на свет. Итог оказался печальным: умерли десятки людей, а еще больше продолжали болеть. Не менее опасна и болезнь итай-итай (в дословном переводе «ой-ой»), вызываемая отравлением кадмием. Заболевшие ею люди испытывали страшную боль в суставах, что и определило такое название. Весьма токсичен и свинец. С отравлением его соединениями нередко связывают слабоумие у детей и другие негативные последствия [5].

До появления спектроскопических методов элементного анализа измерение низких экологически значимых концентраций этих элементов было сложной задачей. Наличие спектроскопических методов в конце 1960-х годов значительно облегчило измерение низких концентраций. Исследования этих до сих пор «невидимых» элементов окружающей среды расширились в 1970-х годах. Термин «тяжелые металлы» стал модным для обозначения этих малоизученных природных элементов. С тех пор этот термин широко используется и стал частью словарного запаса более широкого общества, используемого представителями промышленности, политиками и широкой общественностью. Крупная конференция «Тяжелые

металлы в окружающей среде» (Торонто, 1975 г.) стала первой платформой для этой расширяющейся области исследований. «Тяжелые металлы в почвах» - название авторитетного общего учебника, вышедшего в 1990 г. [6]. Более ранние ключевые учебники той эпохи не включали в название данный термин: «Микроэлементы в почвах и растениях» [7]; «Metalle in der Umwelt: Verteilung, Analytik und Biologische Relevanz» [8]; и «Микроэлементы в земной среде» [9]. Основная проблема с термином «тяжелый металл(ы)» заключается в том, что он плохо определен с научной точки зрения [1].

В 1980 году Нибоер и Ричардсон (1980) возражали против использования этого термина в научной литературе. Также Международный союз теоретической и прикладной химии выступил против [10]. С начала 2000-х годов и по настоящее время использование термина «тяжелые металлы» в научной литературе настоятельно не рекомендуется. Проблема по-прежнему усугубляется тем, что до сих пор не разработано стандартизированное определение. Большинство авторов не поддерживают термин «тяжелый металл(ы)» [11-16]. Но в ряде публикаций он все же успешно применяется [17, 18, 2].

3. Текущий статус

Несмотря на растущие противоречия, использование термина «тяжелые металлы» в общенаучной литературе продолжает увеличиваться. Если рассмотрим наиболее популярные базы по научным публикациям, то действительно видно, что применение данного термина скорее увеличивается, чем снижается (рис. 1).

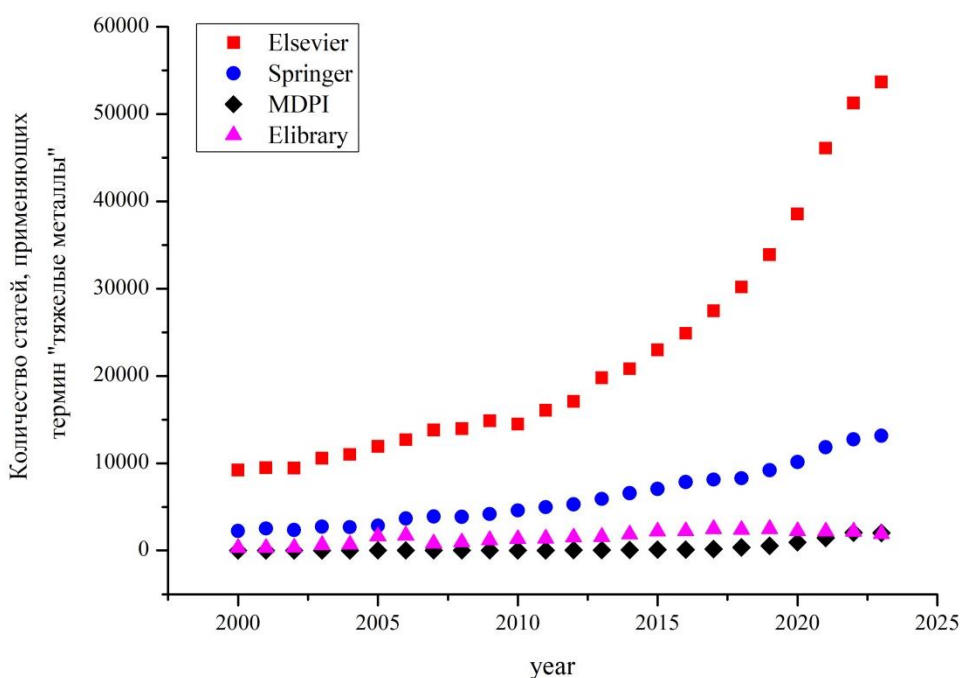


Рисунок 1 – Динамика количества публикаций, использующих термин «тяжелые металлы» (актуальные данные на 13.03.2024 г.)

Термин «тяжелый металл» чаще всего используется в науках об окружающей среде, особенно в исследованиях воздействия загрязнения (Рис. 2). Странами, которые наиболее часто применяют данный термин, являются Китай, США, Германия, Япония, Индия (рис. 3), что частично отражает появление интенсивной исследовательской деятельности по широко распространенным экологическим проблемам в регионе. Кроме того, появление отчетов в англоязычных журналах, возможно, способствовало распространению этого термина в результате увековечивания подхода к устоявшейся и давней практике [19].

Пурре и Боллинджер [20] в своих исследованиях также отмечают, что, несмотря на неоднократные призывы прекратить использование этого термина, применение его в научной литературе не уменьшилось, а наоборот увеличилось.

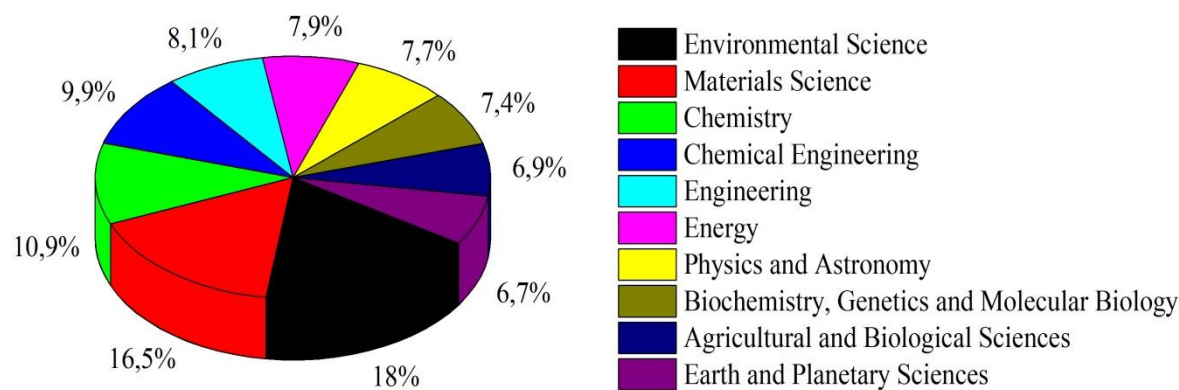


Рисунок 2 – Доля публикаций по областям исследований с использованием термина «тяжелые металлы» (на примере базы данных Elsevier, на 13.03.2024 г.)

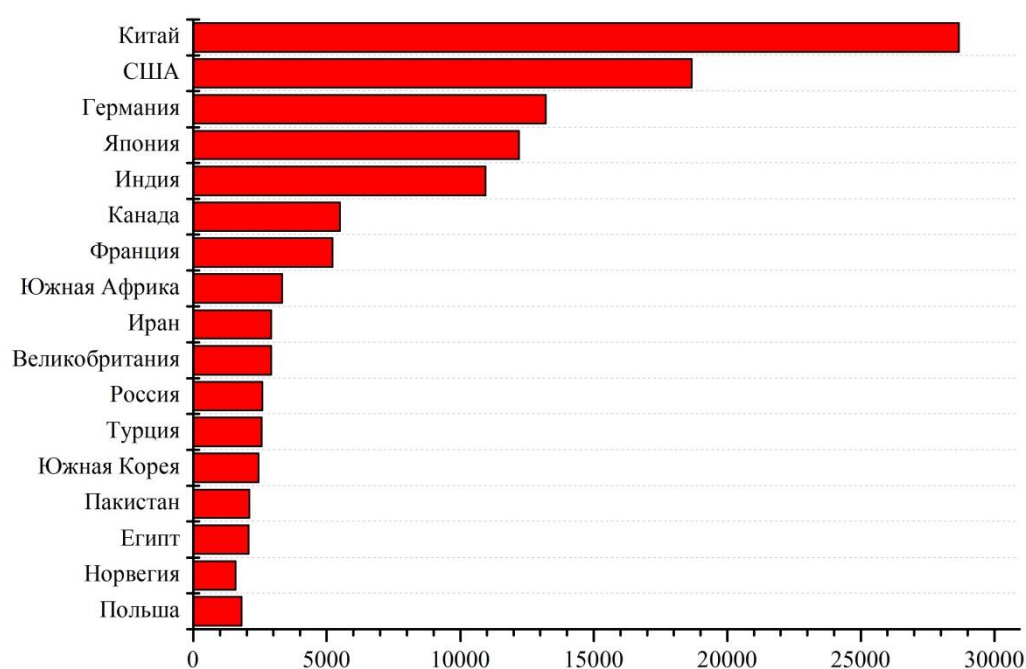


Рисунок 3 – Распределение статей по странам, опубликованных в базе данных Elsevier в 2023 г.

4. Обсуждение

В целом, термин «тяжелый металл» основан на классификации по плотности или молярной массе. На настоящий момент известно около сорока различных определений термина «тяжёлые металлы», и невозможно указать на одно из них, как наиболее принятое. Соответственно, список тяжёлых металлов согласно разным определениям будет включать разные элементы. Так, при используемом критерии относительной атомной массы свыше 50, в список попадают все металлы, начиная с ванадия, независимо от плотности; при другом часто используемом критерии – плотности (8 г/см^3), в список попадают такие элементы как свинец, ртуть, медь, кадмий, кобальт, а, например, более легкое олово выпадает из списка. Существуют также другие классификации, основанные и на других значениях пороговой плотности (например – плотность 5 г/см^3) или атомного веса. Некоторые классификации делают исключения для благородных и редких металлов, не относя их к тяжёлым, некоторые исключают нецветные металлы (железо, марганец) [4].

Помимо всего этого, необходимо учитывать фактор принадлежности того или иного термина к определенным областям науки. Термины, основанные на плотности, чаще всего встречающиеся

в технических науках, следует понимать, что их применение, например в биологии будет некорректно. Так как необходимо будет учитывать не только химические и физические свойства элемента, но и его биологическую активность и токсичность. Большинство тяжелых металлов являются биологически важными для жизнедеятельности живых организмов, т.к. входят в состав ферментов, а значит, в определенных дозах не могут быть токсичными [4]. Ильин В.Б. [21], также отмечал, что избыточное содержание в среде обитания или в пище любого химического элемента – нежелательный факт, поэтому будет правильнее говорить не о токсичных элементах, а о токсичных концентрациях.

В 2018 году Пурре и Боллинджер (2018) дополнительно задали вопрос об использовании термина «тяжелые металлы»: использовать или не использовать? и предложили запретить этот термин в научной литературе. В результате, Пурре, Херстхаус и др. [19, 22] внесли предложение заменить термин на «потенциально токсичные элементы». Действительно, из-за их стойкости (могут происходить только изменения в их химических видах) и воздействия, впоследствии которой могут оказать необратимые последствия на состояние компонентов природной среды [23, 24].

А в 2021 г. Пурре и Боллинджер дополнили свои предложения:

а) применительно к геоэкологическим исследованиям заменить термин «тяжелые металлы» разумными и научно обоснованными терминами, такими как «потенциально токсичный элемент», «микрометаллический элемент», «металл», «металлоид»;

б) не использовать этот общий термин и ссылаться просто на металлы или элементы.

На наш взгляд, это разумный подход и, вероятно, единственный подход, который в конечном итоге может успешно исключить термин «тяжелые металлы».

5. Заключение

Таким образом, термин «тяжелые металлы», за все время использования применялся в различных областях науки и перетерпел достаточно большое количество толкований разными авторами.

На сегодняшний день не существует единого официального термина, который являлся бы универсальным, где были бы взаимосвязаны все критерии: плотность, атомная масса, токсичность и ряд других характеристик.

До сих пор ведутся активные дискуссии, где одни авторы призывают прекратить использование этого термина в научной литературе и предлагают альтернативные понятия, такие как «потенциально токсичный элемент», «микрометаллический элемент», «металл», «металлоид», а другие авторы, наоборот, выступают за ее сохранение.

Исходя из вышеизложенного анализа, считаю использование термина «тяжелые металлы» в настоящее время некорректно, из-за многочисленных различных интерпретаций этот термин потерял свое единое определение и каждый понимает его как хочет. Поэтому будет правильней перейти на новые термины. Наиболее подходящим терминов может быть «потенциально токсичные элементы», как элементы вследствие своих физических, химических, биологических или токсикологических свойств и концентраций представляют собой опасность для окружающей среды, жизни и здоровья людей.

6. Литература:

- [1] Gustin, M.S., Hou, D., Tack, F.M.G.. The term “heavy metal(s)”: History, current debate, and future use // *Science of The Total Environment*, 2021, vol. 789: 147951.
- [2] Ali, H., Khan, E. What are heavy metals? Long-standing controversy over the scientific use of the term ‘heavy metals’ – proposal of a comprehensive definition // *Toxicological and Environmental Chemistry*, 2018, vol. 100:1, pp. 6-19.
- [3] Titov, A.F., Kaznina, N.M., Talanova, V.V. Heavy metals and plants. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2014, 194 pp.
- [4] Aleksashkin, I.V., Dubas, V.V. “Heavy metals” – the problem of the universality of the concept // *Scientific almanac*, 2018, vol. 3-2(41), pp. 168-173.

- [5] Tivo, P.F. Environmental pollution with heavy metals contained in livestock waste // Reclamation, 2019, vol. 1(87), pp. 63-72.
- [6] Alloway, B.J. Heavy metals in soils. Blackie and Son, Glasgow, 1990, p. 339.
- [7] Kabata-Pendias, A., Pendias, H. Trace Elements in Soils and Plants. CRC, Boca Raton, 1984, pp. 154-163.
- [8] Merian, E. Metalle in der Umwelt: Verteilung, Analytik und biologische Relevanz Ed. Verlag Chemie, 1984.
- [9] Adriano, D. Trace Elements in the Terrestrial Environment. Springer-Verlag, New York, 1986, p. 533.
- [10] Duffus, J.H. "Heavy metals" - a meaningless term? (IUPAC technical report) // [Pure and Applied Chemistry](#), 2002, vol. 74, pp. 793-807.
- [11] Hodson, M.E. Heavy metals - geochemical bogey men. Environmental Pollution, 2004, vol. 129, pp. 341-343.
- [12] Chapman, P.M., Holzmann, M. Heavy metal – music, not science cell-phone hazards // [Environmental Science and Technology](#), 2007, vol. 41, pp. 6.
- [13] Madrid, L. "Heavy metals": reminding a long-standing and sometimes forgotten controversy // Geoderma, 2010, vol. 155, pp. 128-129.
- [14] Nikinmaa, M., Schlenk, D. Uses of phrases // Aquatic Toxicology, 2010, vol. 97, pp. 1-2.
- [15] Bhat, U.N., Khan, A.B. Heavy metals: an ambiguous category of inorganic contaminants, nutrients and toxins // Research Journal of Environmental Sciences, 2011, vol. 5, pp. 682-690.
- [16] Pourret, O. On the necessity of banning the term "heavy metal" from the scientific literature // Sustainability, 2018, vol. 10(8): 2879.
- [17] Hübner, R., Astin, K.B., Herbert, R.J.H. Heavy metal' - time to move on from semantics to pragmatics? // Journal of Environmental Monitoring, 2010, vol. 12, pp. 1511-1514.
- [18] Batley, G.E. "Heavy metal" - a useful term // Integrated Environmental Assessment and Management, 2012, vol. 8, pp. 215.
- [19] Pourret, O.; Hursthouse, A. It's Time to Replace the Term "Heavy Metals" with "Potentially Toxic Elements" When Reporting Environmental Research // International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, vol. 16, pp. 4446.
- [20] Pourret, O., Bollinger, J.C., Hursthouse, A. Heavy metal: a misused term? // Acta Geochim, 2021, vol. 40, pp. 466-471.
- [21] Ilyin, B.V. a Heavy metals in the soil-plant system. Novosibirsk: Science. Sib. department, 1991, 151 p.
- [22] Pourret, O., Bollinger, J-C., van Hullebusch, E.D. On the difficulties of being rigorous in environmental geochemistry studies: some recommendations for designing an impactful paper // Environmental Science and Pollution Research, 2020, vol. 27(2), pp. 1267-1275.
- [23] Belkhiri, L., Mouni, L., Sheikhy Narany, T., Tiri, A. Evaluation of potential health risk of heavy metals in groundwater using the integration of indicator kriging and multivariate statistical methods // Groundw Sustain Dev, 2017, vol. 4, pp.12-22.
- [24] Antoniadis, V., Shaheen, S.M., Levizou, E., Shahid, M., Niazi, N.K., Vithanage, M., Ok, Y.S., Bolan, N., Rinklebe, J. A critical prospective analysis of the potential toxicity of trace element regulation limits in soils worldwide: Are they protective concerning health risk assessment? – A review // Environment International, 2019, vol. 127, pp. 819-847.

**КАРТИРОВАНИЕ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ РЕКИ КОЛЫМА
МЕТОДОМ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ ПРИ ПОИСКЕ ИСКОПАЕМОЙ
МАМОНТОВОЙ КОСТИ**

Иван Горохов, Иван Христофоров, Кэнчээри Данилов, Татьяна Исакова, Евгения Петухова
ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, ул. Петровского, 2

**MAPPING OF THE BOTTOM SEDIMENTS OF THE KOLYMA RIVER USING THE
GEORADIOLOCATION METHOD IN THE SEARCH FOR THE FOSSIL
MAMOTH BONE**

Ivan Gorokhov, Ivan Khristoforov, Kenčeri Danilov, Maksim Cheprasov, Evgenia Petukhova
FRC «The Yakut Scientific Centre SB RAS», 2, Petrovsky str., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. The results of an areal GPR survey of the bottom of the meandering section of the middle reaches of the Kolyma River of the Republic of Sakha (Yakutia) is presented. A GPR survey with a large step made it possible to construct a map of the depths of the study area and identify promising areas for searching for fossil mammoth bones. The presence of natural depressions in the bottom of a reservoir containing large local objects is accepted as a search feature.

1. Введение

ИМК (ископаемая мамонтовая кость), как аналог слоновой кости, имеет высокий спрос на рынке камнесамоцветного сырья [1]. Востребованность бивней мамонта спровоцировала стремительное развитие частной добывающей деятельности в Арктических районах Республики Саха (Якутия). Сегодня Якутия считается крупнейшим экспортером бивня мамонта и на ее территории, по экспертным данным, сконцентрировано более 80% ресурсов мамонтовой фауны России [2]. Охота на дорогостоящее сырье в Якутии является высококонкурентной сферой деятельности, что способствует развитию техники и технологий поиска и добычи данного вида сырья. В настоящее время Лаборатория технологий добычи и переработки сырья мамонтовой фауны Якутского научного центра СО РАН занимается разработкой технологии поиска скоплений ИМК на дне и в донных отложениях водных объектов суши методом георадиолокации. Данная статья описывает результаты площадной георадарной съемки на участке среднего течения реки Колыма на территории Республики Саха (Якутия) (РС(Я)).

2. Результаты площадного зондирования методом георадиолокации на меандрирующем участке реки Колыма

Площадная георадарная съемка, как метод исследования, помогает решать вопросы, связанные с изучением условий захоронения ИМК в донных отложениях, за счет построения рельефа дна и регистрации сигналов от локальных объектов, находящихся на дне и в донных отложениях арктических водоемов. Такой подход использует основные преимущества метода георадиолокации, заключающиеся в высокой мобильности и разрешающей способности, что позволяет обследовать достаточно большие по площади территории за весьма короткий промысловый сезон.

В 2023 году полевые геофизические исследования проводились с 16 сентября по 3 октября. Для площадных измерений использован антенный блок с центральной частотой 150 МГц георадара ОКО-3 (ООО «Логис-ГЕОТЕХ»). Съемка выполнена с поверхности воды на двух лодках, одна из которых служит для передвижения и буксировки второй лодки, в которую помещен антенный блок. Для определения точности георадарного зондирования все георадарные профили были пройдены с использованием спутникового навигатора GPS с применением дополнительных меток в программном обеспечении, производящем запись радарограмм.

Применение GPS-навигатора при съемке с водной поверхности обеспечивает прямолинейность съемки, позволяет контролировать равномерность передвижения и учитывать скорость течения для повышения точности привязки георадарных данных к реальному рельефу дна. Обработка данных производилась с использованием программного обеспечения GeoScan32 (ООО «Логические системы», г. Раменское). Параметры съемки выставлены согласно методике гидроакустической локации: диэлектрическая проницаемость воды – 81, накопление сигналов 16, непрерывная съемка [3]. При интерпретации данных учитывался также опыт исследований водоемов методом георадиолокации с поверхности воды, описанный в [4, 5].

Объектом исследования является меандрирующий участок реки Колыма, где наблюдается наиболее значительное разрушение береговых склонов, произошедшее в результате воздействия русловых процессов. Всего получено 50 поперечных основному руслу реки профилей (Рисунок 1). Средняя протяженность одного профиля составляет 900-1200 м. Шаг съемки 100 м. Общая площадь исследованного участка составила 5 км² или 50 тысяч пог. м.



Рисунок 1 – Участок работ с GPS метками начала и конца профилей

При анализе результатов профилирования были получены данные о рельефе дна, толщине донных отложений, обнаруженных локальных объектах. На рисунке 2 представлен один из георадарных разрезов, на котором зафиксирован дифрагированный сигнал от крупного локального объекта неустановленной природы.

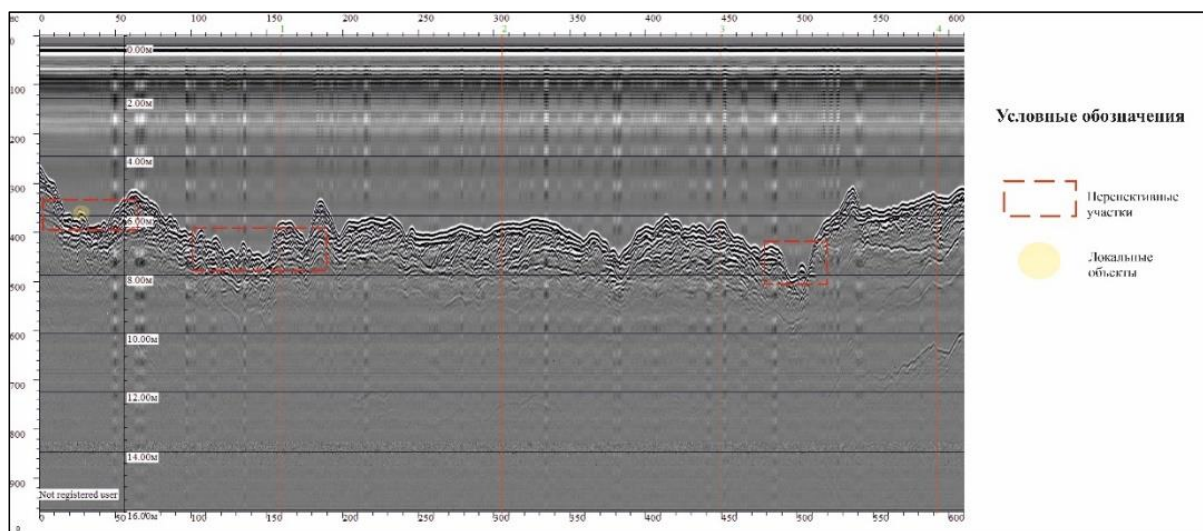


Рисунок 2 – Георадарный разрез с перспективными участками

Установлено, что большая часть обнаруженных локальных объектов сконцентрирована в естественных понижениях на дне исследуемого водоема.

На рисунке 3, а представлена карта глубин изучаемого участка, построенная после анализа всех георадарных профилей. Обработка и интерпретация данных производилась с использованием программных ресурсов GeoScan32, Excel, SasPlanet и Surfer и учитывала географические

координатные данные начальных, конечных и промежуточных точек привязки, зафиксированных с использованием GPS-навигатора. Интерпретация в формате двухмерной карты с изолиниями позволяет провести оценку геометрии всего русла реки, выявить перспективные для аккумуляции костных остатков участки, характеризующихся наличием крутых понижений и узких ям, и, соответственно, смоделировать условия накопления костного материала. За счет привязки результатов георадарного профилирования к географическим координатным данным потенциально перспективные для поиска ИМК участки были нанесены на спутниковую карту (Рисунок 3, б).

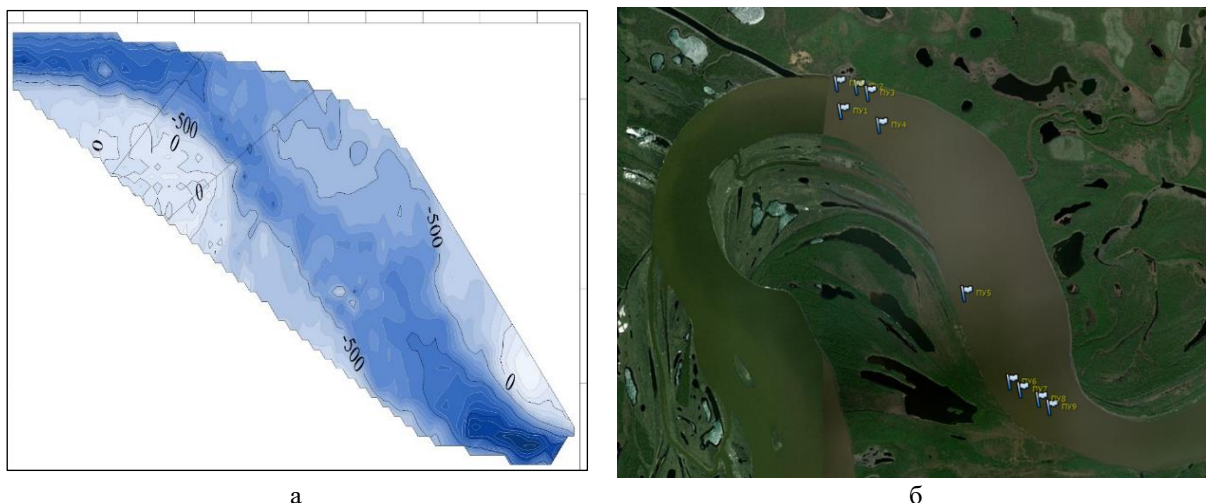


Рисунок 3 – Двумерная карта глубин (а) и перспективные для поиска ИМК участки (б) излучины реки Колыма

Таким образом, на основе, площадных съемок возможно выделение перспективных участков, выраженных наличием гипербола локальных объектов на разрезе и косвенными признаками в виде явно выраженных понижений на дне водоема.

3. Выводы

Данные площадной съемки с крупным шагом могут быть применены на этапе первичной разведки акваторий для выделения зон перспективных для поиска локальных объектов. Картирование рельефа дна позволяет получить информацию о наличии значительных понижений в рельефе дна, которые являются естественными ловушками для уносимых течением и другими русловыми процессами костных остатков. Дальнейшая разведка должна проводиться с применением комплекса георадаров с разными частотами антенных блоков и сеткой профилей с меньшим шагом.

4. Благодарности

Выражаем благодарность ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН (грант №13.ЦКП.21.0016) за возможность проведения исследований на научном оборудовании Центра. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ НИОКТР 122042000008-5

5. Литература:

- [1] Smirnov A.N. Resource potential of fossil mammoth bone in the Russian Arctic // Journal "Mineral Resources of Russia. Economics and Management". – 2007. – No. 4. – pp. 21-29.
- [2] Smirnov A.N. Fossil mammoth bone: problems and prospects of studying and developing the resource potential in the Russian Arctic// Izvestiya Rossiyskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. A.I. Herzen. – 2005. – Vol. 5, No. 13. – pp. 255-265.

- [3] Vladov M.L., Pyatilova A.M. Effect of water layer on the depth of georadiolocation studies in freshwater water areas // Moscow University Bulletin. Vol. 4. Geology. – 2009. – №1. – P. 63-66.
- [4] Khristoforov I.I., Danilov K.P., Gorokhov I.V., Cheprasov M.Y., Petrova T.N., Petukhova E.S. GPR Sounding of Fossil Mammoth Bones from The Surface of Freshwater Lakes and Rivers // Conference Proceedings, Engineering and Mining Geophysics 2021.- 2021.- Vol. 2021.- P. 1-10. Publisher: European Association of Geoscientists & Engineers. DOI: 10.3997/2214-4609.202152205
- [5] Starovoitov A.V. Interpretation of georadiolocation data. – Moscow: Publishing House of Moscow State University, 2008. – P. 188.

НАЛЕДИ МАГАДАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Анастасия Землянскова^{1,2}, Ольга Макарьева^{1,2}, Андрей Шихов^{1,3}

¹ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет» Институт наук о Земле
199034, Россия, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7–9

² ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет»,
685000, Россия, г. Магадан, ул. Портовая, 13

³ ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»,
614068, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15

AUFEIS IN THE MAGADAN REGION

Anastasiia Zemlianskova^{1,2}, Olga Makarieva^{1,2}, Andrey Shikhov^{1,3}

¹ Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg State University, 7-9, University nab. St. Petersburg,
199034, Russia

² North-Eastern State University, 13, Portovaya str., Magadan, 685000, Russia

³ Perm State University, 15, Bukireva str., Perm, 614068, Russia

Abstract. Aufeis regulate surface and underground runoff and are an important element in the chain of water exchange processes in the permafrost zone. According to Landsat images (2013-2019), the number of recorded aufeis in the Magadan region is 2510, and the area is 1132,3 km², which is 38% more and 33% less (respectively) than according to materials from 1958. River aufeis coverage varies from 0,14 in the Kolyma River basin to 1,40% in the Anmangynda River basin. The total resources of aufeis are at least 1,3 km³ or 2,9 mm of aufeis runoff. Aufeis have the greatest impact on river flow during the spring flood period. Thus, aufeis runoff in May-June ranges from 0,6 to 13,6% of river flow. Using the “Hydrograph” model, the Anmangynda river with aufeis feed runoff hydrographs are satisfactorily described. This made it possible to estimate the flow of aufeis runoff on a daily interval.

1. Введение

Наледи регулируют поверхностный и подземный сток, являются важным элементом в цепи водообменных процессов зоны распространения мерзлоты [1]. Крупные размеры наледей дают возможность идентифицировать их на космических снимках [2], что позволяет использовать наледи в качестве индикаторов происходящих изменений климата на труднодоступных территориях. Наледи также относятся к опасным природным процессам, представляют угрозу для инженерных сооружений. В Магаданской области возникла потребность региональной оценки развития наледных явлений.

Цель исследования – дать актуальные сведения о распространении наледей на территории Магаданской области, а также рассчитать потенциальный вклад наледного стока в формирование водного баланса рек в различные фазы гидрологического режима, том числе с помощью методов математического моделирования.

2. Методы

Для уточнения сведений о наледях использовались спутниковые снимки Landsat (2013–2019 гг.). Дешифрирование наледи на космических снимках проводилось на основе расчета, нормализованного дифференциального снежного индекса NDSI [3]. Для определения максимальной площади наледи использовалась кривая, которая позволяет восстановить ту долю, которая могла стоять до даты снимка. Кривая разработана на основе данных по Анмангындинской наледи [4]. Результаты работы были сопоставлены с данными 1958 г. [5].

Для расчета вклада наледей в формирование гидрологического режима рек использовались данные 23 гидрологических постов. Расчет выполнен для годового стока, периода зимней межени (октябрь-апрель) и весеннего половодья (май-июнь).

Объем наледей вычислялся по формуле (1):

$$(1) W = 0,364S^{1,167}$$

где W и S – объем и площадь наледи тыс. м³ и тыс. м² соответственно [4].

Для гидрологической модели «Гидрограф» [6] был разработан блок «Наледь», позволяющий учитывать приток воды от таяния и разрушения наледного льда в задачах расчета гидрологических характеристик поверхностного стока рек [7]. Он использовался для оценки вклада Анмангындинской наледи в речной сток на суточном интервале.

3. Результаты

По современным снимкам Landsat (2013–2019 гг.) количество учтенных наледей подземных вод составило 2510, а уточненная площадь – 1132,3 км². Согласно [5] в Магаданской области насчитывалось 1820 наледей с суммарной площадью наледных полей 1686 км². Таким образом, в настоящее время количество наледей на 38% больше, чем по данным 1958 г., а суммарная восстановленная площадь наледей на 33% меньше. Такие изменения могут быть объяснены наблюдающимся изменением климата, а также различием методов оценки характеристик объекта.

Наледность в бассейнах рек Магаданской области изменяется от 0,14 в бассейне реки Колыма (1803) до 1,40 % в бассейне реки Анмангынды (1604). Общие ресурсы наледей подземных вод составляют не менее 1,3 км³ или 2,9 мм наледного стока. Вклад наледей в годовой сток рек изменяется от 0,4 до 14,0%, в среднем – 2,0%. В период весеннего половодья, особенно в первые дни, наледный сток составляет до 95% от общего стока, а за период май-июнь – от 0,6 до 13,6% (Таблица 1).

Таблица 1 – Наледные ресурсы Магаданской области

Код поста	F, км ²	H, мм	H _{зимн} , мм	H _{пол} , мм	N	S, км ²	W, млн м ³	Z, %	H1, мм	P1, %	P2, %	P3, %
1001	42600	228	9.4	92	186	118.6	148.5	0.28	3.0	1.3	32.3	2.6
1010	99400	242	25.9	101	557	308.4	373.3	0.31	3.3	1.4	12.6	2.6
1024	9560	215	7.7	96	53	39.1	49.5	0.41	4.5	2.1	58.5	3.7
1050	4980	211	3.6	79	61	38.4	48.6	0.77	8.5	4	235.6	8.6
1095	10300	293	17.7	127	47	31.1	39.4	0.30	3.3	1.1	18.8	2.1
1124	1820	257	9.1	128	9	3.4	3.6	0.19	1.7	0.7	19.1	1.2
1144	2110	339	19.7	165	20	17.6	22.6	0.83	9.3	2.7	47.3	4.5
1151	3490	323	21.3	142	32	21.9	27.9	0.63	6.9	2.2	32.7	3.9
1152	5630	290	16.6	132	39	18.2	20.9	0.32	3.2	1.1	19.5	1.9
1176	13600	292	14.5	149	104	46.1	53.2	0.34	3.4	1.2	23.5	1.8
1194	3460	276	6.5	141	26	8.2	8.4	0.24	2.1	0.8	32.5	1.2
1238	9970	215	10.5	115	59	32.3	39.8	0.32	3.5	1.6	33.1	2.4
1293	9090	302	19.5	153	98	29.2	32.1	0.32	3.1	1	15.8	1.6
1341	5880	304	17.5	157	37	28.5	40.9	0.48	6.1	1.9	34.7	3.1
1342	1720	293	18.8	136	29	9	9.2	0.52	4.7	1.6	24.9	2.8
1368	3710	314	29.4	128	39	18.6	21.5	0.50	5	1.6	17.1	3.2
1521	11700	409	38.6	226	128	53.2	65.3	0.45	4.9	1.2	12.6	1.7
1556	682	444	40.3	197	8	3.5	4	0.51	5.1	1.2	12.7	2.1
1566	25100	458	76.0	212	131	43.4	46.7	0.17	1.6	0.4	2.1	0.6
1597	664	299	13.4	139	16	2.7	2.4	0.41	3.1	1	23.3	1.9
1604	376	288	17.1	107	1	5.1	7.8	1.40	20.7	7.2	121.3	13.6
1801	361000	198	19.5	87	1085	555.9	682.4	0.15	1.6	0.8	8.4	1.6

1803	526000	199	20.2	85	1500	732.1	893.7	0.14	1.4	0.7	7.3	1.4
------	--------	-----	------	----	------	-------	-------	------	-----	-----	-----	-----

F – площадь бассейна, H – средний многолетний годовой слой стока, $H_{\text{зимн}}$ – слой зимнего стока (октябрь – апрель), $H_{\text{пол}}$ – слой стока половодья (май – июнь), N – количество наледей, S – восстановленная площадь наледей, W – объем наледей, рассчитанный по восстановленной площади, Z – наледность бассейна, H1 – наледные ресурсы, P1, P2 и P3 – наледные ресурсы в % от годового, зимнего стока рек и в период весеннего половодья.

На примере бассейна р. Анмангында, где площадь наледи до стокового поста занимает 2% речного бассейна, было проведено непрерывное моделирование стока за период 1967–1987 гг. Модель «Гидрограф» с введенным блоком «Наледь» удовлетворительно воспроизвела гидрографы стока. Медианные значения критерия Нэша-Сатклиффа (NS) составили 0,62, а в разные годы величина NS изменялась от -0,12 до 0,82. Разница между рассчитанным и наблюдаемым слоями стока составила 36 мм или 13%.

Согласно данным расчета в отдельные дни расход наледного стока может составлять 3–5 м³/с, а в среднем 1,0 м³/с. Вклад наледного стока в сток р. Анмангында изменялся от 15 до 31 мм или 4–12% в год (1963–1987 гг.), а в период весеннего половодья – 5–36%.

4. Дискуссия

Влияние наледей на природную среду изучено еще недостаточно из-за отсутствия длительных рядов наблюдений. При этом во многих работах отмечено, что в связи с потеплением климата размеры и местоположение наледей меняется [8], а вместе с ними трансформируются и другие компоненты криолитозоны. Несмотря на то, что водные ресурсы наледей и их гидрологическая роль сопоставима с запасами подземных и ледниковых вод, отсутствуют методы прогноза и учета в водном балансе рек. Понимание влияния потепления климата на наледные явления и гидрологический цикл является важной задачей. Это позволит прогнозировать изменения водных ресурсов, разрабатывать эффективные стратегии управления и адаптации к изменяющимся условиям. Полигон «Анмангындинская наледь» (Рисунок 1), который находится в Магаданской области и имеет продолжительный ряд наблюдений, как за характеристиками наледи, так и за стоком реки, предлагается в качестве опорного объекта для разработки методов прогноза формирования и разрушения наледей.



Рисунок 1 – Анмангындинская наледь (Магаданская область), июнь 2023 г.

5. Благодарности

Сбор, анализ и обработка данных спутниковых снимков проведены при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета в рамках проекта «Комплексная оценка естественных и антропогенных факторов интенсификации водообменных процессов криолитозоны в условиях изменения климата», оценка наледных ресурсов выполнены в рамках проекта Российского научного фонда и Правительства Магаданской области № 23-17-20011 «Оценка рисков опасных явлений для инфраструктуры Магаданской области, вызванных климатически- и антропогенно-обусловленной трансформацией многолетнемерзлых пород».

6. Литература:

- [1] Соколов Б.Л. Наледи и речной сток / Б.Л. Соколов. Ленинград: Гидрометеиздат, 1975. 190 с.
- [2] Morse P., Wolfe S. Long-Term River icing dynamics in discontinuous permafrost, subarctic Canadian Shield: River icing dynamics in discontinuous permafrost, subarctic Canada // *Permafr. Periglac. Process.*, 2016, 28, P. 580–586. <https://doi.org/10.1002/ppp.1907>.
- [3] Makarieva O., Shikhov A., Nesterova N., and Ostashov A. Historical and recent aufeis in the Indigirka River basin (Russia) // *Earth Syst. Sci. Data*, 2019, no. 11, pp. 409-420, <https://doi.org/10.5194/essd-11-409-2019>.
- [4] Zemlianskova A.A., Alekseev V.R., Shikhov A.N., Ostashov A.A., Nesterova N.V., Makarieva O.M. Long-Term Dynamics of the Huge Anmangynda Aufeis in the North-East of Russia (1962–2021) // *Water Resources*, 2023, Vol. 50, Suppl. 1, pp. 89–99. DOI: 10.1134/S0097807823700288
- [5] Шильниковская З.Г. Кадастр к Карте наледей Северо-Востока СССР масштаба 1 : 2 000 000, составленной А.С. Симаковым и З.Г. Шильниковской. Магадан: Северо-Восточное территориальное геологическое управление. Центральная комплексная тематическая экспедиция, 1958. 398 с.
- [6] Виноградов Ю.Б. Математическое моделирование процессов формирования стока: опыт критического анализа) / Ю.Б. Виноградов. Ленинград: Гидрометеиздат, 1988. 312 с.
- [7] Землянскова А.А., Макарьева О.М. Моделирование процессов формирования стока рек горной криолитозоны северо-востока России с наледным питанием на примере р. Анмангында // *Арктика и Антарктика*. 2024. № 2. С. 1-20. DOI: 10.7256/2453-8922.2024.2.69780
- [8] Алексеев В.Р. Многолетняя изменчивость родниковых наледей-тарынов // *Лёд и снег*. 2016. Т. 56. № 1. С. 73–93.

ИЗУЧЕНИЕ СОСТАВА ГАЗОВ В ГИДРАТАХ ПРИРОДНОГО ГАЗА И ИХ СТАБИЛЬНОСТИ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

Изабелла Иванова, Людмила Калачева, Альберт Портнягин, Виктор Иванов, Алла Бубнова
ФГБУН ФИЦ «ЯНИЦ СО РАН» «Институт проблем нефти и газа СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, ул. Петровского, 2

STUDY OF THE GAS COMPOSITION IN NATURAL GAS HYDRATES AND THEIR STABILITY IN POROUS MEDIA

Izabella Ivanova, Liudmila Kalacheva, Albert Portnyagin, Viktor Ivanov, Alla Bubnova
Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, 2, Petrovsky str, Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. The relevance of the investigation is related to the study of the storage possibility of natural gas in a hydrated state in subpermafrost aquifers in the territory of Yakutia. This paper presents the results of a study of the gas composition in natural gas hydrates obtained in moist porous media and, for comparison, considers the processes of hydrate formation in a volume of water. Bi- and polydisperse quartz sands were used as a model of porous medium. Moisture content was set with distilled water and was 15%. Hydrates were obtained in high-pressure chambers at a temperature of +5°C and a pressure of 8 MPa. The fat content coefficients of gases in hydrates and their kinetic stability at atmospheric pressure and temperature +5°C were determined. It has been established that the coefficients of fat content of gases in the resulting hydrates are almost the same and the gases are classified as fatty. However, the stability of hydrates obtained in bulk water is three times less than that of hydrates in a porous medium, which indicates the stability of the latter.

1. Введение

Создание подземных хранилищ природного газа в гидратном состоянии представляет собой стратегическую задачу по сохранению энергии. В работах Бондарева Э.А. с соавторами [1, 2] методами математического моделирования показана принципиальная возможность создания таких хранилищ путем инъекции газа в подмерзлотные водоносные горизонты, что в настоящее время требует проведения экспериментальных работ по изучению образования и разложения гидратов природного газа в пористых средах. В рамках этих исследований необходимо определить состав газа в гидратах, поскольку от этого зависят такие важные характеристики как коэффициент жирности и теплотворная способность газа, а также для долгосрочного хранения гидратов особый интерес представляет их кинетическая стабильность в пористых средах при положительных температурах, имитирующих пластовые в подмерзлотных водоносных горизонтах.

2. Экспериментальная часть

Объектами исследования являлись гидраты природного газа, полученные во влажных пористых средах. Пористыми средами послужили следующие образцы кварцевых песков:

Песок 1 – слабо отсортированный (бидисперсный), мелко-среднезернистый с преобладанием частиц 0,5–0,25 мм (54%). Плотность твёрдой компоненты – 2,67 г/см³. Пористость в рыхлом сложении – 39,5%, в плотном – 37,0%;

Песок 2 – неотсортированный (полидисперсный) крупный песок, суммарно преобладают частицы > 0,25 мм. Плотность твердой компоненты – 2,83 г/см³. Пористость в рыхлом сложении – 36,1%, в плотном – 34,2%.

Влажность песка задавалась дистиллированной водой, заполнение порового пространства водой примерно 0,74. Для сравнения гидраты этого газа также были получены в объеме воды. В качестве газа-гидратообразователя был использован природный газ (ПГ) Средневилюйского

ГКМ, который поступает по магистральному газопроводу «Кысыл-Сыр – Мастах – Якутск». Состав этого газа приведен в таблице 1. Гидраты получали в камерах высокого давления при температуре +5°C и давлении 8 МПа. Разложение гидратов проводили при +5°C для этого давление в камере понижали до атмосферного. Объем газа, выделившегося во время разложения гидратов, измеряли газовым счетчиком. Подробное описание методики образования и разложения гидратов приведены в [3]. Состав газов в гидратах определялся методом газодсорбционной хроматографии. Результаты представлены в таблице 1. Данные по составу газа в гидрате, полученном в объеме воды, заимствованы в работе [4].

Таблица 1 – Компонентный состав газов в гидратах природного газа Средневилюйского месторождения

Компонент	Содержание, % мол.			
	ПГ	ПГ – вода [4]	ПГ – песок 1– вода	ПГ – песок 2– вода
CO ₂	0,0559	0,091	0,121	0,069
N ₂	0,33	0,36	0,10	0,23
CH ₄	93,88	78,82	79,20	78,96
C ₂ H ₆	4,44	13,88	14,39	13,91
C ₃ H ₈	1,10	6,23	5,71	6,34
и- C ₄ H ₁₀	0,087	0,377	0,403	0,423
н- C ₄ H ₁₀	0,108	0,247	0,087	0,081
Σ C ₂ -C ₄	5,74	20,73	20,58	20,75
Структура гидратов		КС-II	КС-II	КС-II
Коэффициент жирности газа, %	6,1	26,3	26,0	26,3

Известно, что гидраты природных газов, у которых содержание пропана более 0,2%, имеют кристаллическую структуру КС-II [5]. Поэтому ожидаемо, что полученные гидраты природного газа образуют структуру КС-II (расчет по составу газов в гидрате проводился по программе CSMHyd). В составе газа в гидратах, по сравнению с исходным газом, происходит увеличение доли гомологов метана C₂-C₄. Это связано с тем, что при гидратообразовании природного газа в пористой среде в первую очередь в гидрат переходят компоненты, имеющие более низкое равновесное давление гидратообразования при данной температуре, поэтому углеводороды C₂-C₄ преимущественно заполняют полости гидратов [6].

По соотношению ΣC₂-C₄/C₁ проведен расчет коэффициента жирности газов в гидратах. По классификации Высоцкого [7] различают сухие (0,3- 8%); полужирные (8-20%); жирные (20-30%) и высокожирные газы (>30%). Исходный природный газ относится к сухим, так как коэффициент жирности равен 6,1 % (таблица. 1), но газы в составе его гидратов характеризуются как жирные газы. Причем, коэффициенты жирности газов, полученных в объеме воды и в пористых средах с различной дисперсностью, практически одинаковы. Жирные газы обладают высокой теплотворной способностью, а также являются ценным сырьем для нефтегазохимической промышленности, что вкуче делает перевод газа в гидратное состояние экономически выгодным процессом.

Определение кинетической устойчивости гидратов природного газа при +5°C и атмосферном давлении показало, что средняя скорость разложения гидратов, полученных в объеме воды составляет 31,5 %/мин (расчет по данным [4]), в пористых средах с бидисперсным песком – 10,2 %/мин [8], а с полидисперсным песком – 9,2 %/мин (расчет по данным [9]). Следовательно, гидраты в пористых средах более устойчивые, поскольку их скорость разложения меньше в три раза, по сравнению с разложением гидратов, образованных в объеме воды.

3. Выводы

По результатам выполненной работы можно сделать заключение, что газы в составе гидратов природного газа, полученных во влажных пористых средах с различной дисперсностью и в объеме воды, характеризуются одинаковыми коэффициентами жирности и по классификации Высоцкого относятся к жирным. Однако оценка кинетической устойчивости этих гидратов при атмосферном давлении и +5°C показала, что гидраты, полученные в объеме воды, менее устойчивы, чем гидраты в пористой среде. Для создания подземных хранилищ газа в гидратном состоянии в подмерзлотных водоносных горизонтах подходят как би- так полидисперсные грунты с пресными водами.

4. Благодарности

Работа выполнена в рамках бюджетного проекта № 122011100157-5 с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

5. Литература:

- [1] Bondarev E.A., Rozhin I.I., Popov V.V., Argunova K.K. Assessment of possibility of natural gas hydrates underground storage in permafrost regions // *Earth's Cryosphere*. – 2015. – Vol. XIX, No 4. – P. 64–74.
- [2] Bondarev E.A., Rozhin I.I., Popov V.V., Argunova K.K. Underground storage of natural gas in hydrate state: primary injection stage // *Journal of Engineering Thermophysics*. – 2018. – Vol. 27, No 2. – P. 221–232.
- [3] Kalacheva, L.P., Portnyagin, A.S. Properties of natural gas hydrates obtained in model solutions of sodium bicarbonate type // *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2017, No. 10-2, pp. 196–200.
- [4] Kalacheva, L.P., Ivanova, I.K., Portnyagin, A.S., Ivanov, V.K. Assessment of the possibility of natural and associated petroleum gases storage in the hydrate state // *SOCAR Proceedings*, 2022, Special Issue No. 1, pp. 099-110.
- [5] Istomin, V.A., Yakushev, V.S. *Gas hydrates in natural conditions*. Moscow: Nedra, 1992. 236 pp.
- [6] Makagon, Yu.F. *Natural gas hydrates*. Moscow: Nedra, 1974, 208 pp. (in Russian)
- [7] *Natural gas. Methane: reference book* / S.Yu. Pirogov [and others]. St. Petersburg: NPO Professional, 2006, 848 pp. (in Russian)
- [8] Ivanova, I.K., Kalacheva, L.P., Portnyagin, A.S., Ivanov, V.K., Bubnova, A.R., Argunova, K.K. Experimental study of natural gas hydrate formation in a porous medium in the presence of aqueous solutions of sodium chloride and sodium bicarbonate // *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2023, vol. 59, No. 4, pp. 679-685.
- [9] Ivanova, I.K., Kalacheva, L.P., Portnyagin, A.S., Ivanov, V.K., Bubnova, A.R. Influence of porous medium and salinity of pore moisture on the stability of natural gas hydrates // *Geology and mineral resources of the NorthEast of Russia: Proceedings of the XIII All-Russian scientific and practical conference with international participation, dedicated to the 30th anniversary of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia) and the 40th anniversary of Geological Exploration Faculty of NEFU named after M.K. Ammosov, Yakutsk, March 21–24, 2023*. Yakutsk: North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, 2023, 460–464 pp.

О ВОЗМОЖНОСТИ ЗАХОРОНЕНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В ПОДМЕРЗЛОТНЫХ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТАХ

Людмила Калачева, Изабелла Иванова, Альберт Портнягин, Виктор Иванов, Алла Бубнова
ФГБУН ФИЦ «ЯНЦ СО РАН» «Институт проблем нефти и газа СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, ул. Петровского, 2

ABOUT THE POSSIBILITY OF CARBON DIOXIDE BURIAL IN SUBMAFROST AQUIFERS

Liudmila Kalacheva, Izabella Ivanova, Albert Portnyagin, Viktor Ivanov, Alla Bubnova
Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, 2, Petrovsky str, Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. In this paper, the equilibrium conditions of carbon dioxide hydrate formation in porous media with various salinities were studied using the method of differential thermal analysis. The obtained experimental results were compared with the thermal profile of geological exploration area No. 2 to determine the boundaries of the carbon dioxide hydrate stability zone in the subpermafrost aquifers of the Vilyui syncline. It has been established that in the stability zone, depending on reservoir conditions, a hydrate can be formed from ice/water and gaseous/liquid carbon dioxide. When carbon dioxide is injected into frozen rocks, the melting temperature of ice decreases with an increase of gas pressure, which leads to permafrost degradation. Therefore, the burial of carbon dioxide in subpermafrost aquifers must be carried out at great depths.

1. Введение

Для снижения концентрации углекислого газа в атмосфере в последние годы с целью его улавливания и секвестрации предлагается метод его хранения в гидратном состоянии [1-3], среди которых рассматривается захоронение в геологических формациях [4-7]. Геологическими хранилищами CO₂ могут служить соленые водоносные горизонты, соляные и угольные пласты, истощенные месторождения нефти и газа, а также в магматические и метаморфические породы [8-11.]. Естественно низкие температуры и высокие гидростатические давления подмерзлотных водоносных пластов осадочных бассейнов способствуют образованию гидрата углекислого газа при его закачке.

В частности, в работе [4] была показана принципиальная возможность захоронения диоксида углерода в гидратной форме в криолитозоне Вилуйской синеклизы. Углекислый газ может долгосрочно храниться в зоне стабильности его гидрата (ЗСГ), границы которой зависят от геотермических условий в разрезе, состава и минерализации пластовых вод, фильтрационно-емкостных свойств породы, а также от равновесных условий гидратообразования. При этом нижние границы ЗСГ диоксида углерода в Вилуйской синеклизе могут достигать глубины 1600 м [5]. В зависимости от местоположения разведанных площадей, ЗСГ в подмерзлотных водоносных горизонтах охватывает отложения мела и юры, которые характеризуются наличием хлоридно-кальциевых (подгруппа натриевая) (минерализация до 100 г/л) и гидрокарбонатно-натриевых (минерализация до 20 г/л) типов пластовых вод [12]. В таблице 1 приведена характеристика отложений, охваченных ЗСГ диоксида углерода в Вилуйской синеклизе, их фильтрационно-емкостные свойства, пластовые давления, состав и минерализация пластовых вод по данным [13, 14].

Таблица 1 – Характеристика отложений, охваченных зоной стабильности гидратов (ЗСГ) диоксида углерода в Вилуйской синеклизе

Отложения, охваченные ЗСГ CO ₂	Нижнемеловые	Верхнеюрские	Среднеюрские	Нижнеюрские
Породы	Преимущественно песчаники	Угленосные, преобладают	Песчаники, чередующиеся с прослоями алевролитов и	

		песчаники	аргиллитов	
Пористость, %		26	31-35	до 30
Проницаемость, м ²		3·10 ⁻¹²	2-7·10 ⁻¹²	3·10 ⁻¹²
Пластовые давления		близки по величине к условным гидростатическим		
Генетический тип пластовых вод, минерализация		Пресные, гидрокарбонатно-натриевые до 1 г/л	Хлоридно-кальциевые (подгруппа натриевая) до 100 г/л и гидрокарбонатно-натриевые до 20 г/л	Хлоридно-кальциевые (подгруппа натриевая) до 100 г/л и гидрокарбонатно-натриевые до 20 г/л
			Гидрокарбонатно-натриевые до 20 г/л	

Целью работы является изучение равновесных условий гидратообразования диоксида углерода в засоленных пористых средах для рассмотрения возможности его захоронения в подмерзлотных водоносных горизонтах Виллойской синеклизы.

2. Экспериментальная часть

Газом-гидратообразователем являлся диоксид углерода (99,9%). В экспериментах в качестве пористой среды использовался бидисперсный кварцевый песок в составе которого преобладают частицы размером 0,5–0,25 мм (54%) и 0,25–0,1 мм (42%), средний диаметр частиц $d=0,27$ мм. Плотность твёрдой компоненты – 2,67 г/см³; пористость в рыхлом сложении – 39,5%, в плотном – 37,0%. Засоленность песка задавалась 0,25 и 2,0% мас. растворами гидрокарбоната натрия и 3,0, 5,0, 10,0% мас. растворами хлорида натрия. Концентрации выбранных растворов соответствуют минерализации пластовых вод характерных для подмерзлотных водоносных горизонтов Виллойской синеклизы [15]. Для сравнения эксперименты проведены во влажном песке. Влажность песка во всех образцах была одинаковой и составляла 15% мас., что соответствует заполнению порового пространства жидкостью примерно 0,74.

Объектами исследования являются гидраты, полученные в системах:

- «CO₂ – песок – H₂O»;
- «CO₂ – песок – 0,25% мас. раствор NaHCO₃»;
- «CO₂ – песок – 2% мас. раствор NaHCO₃»;
- «CO₂ – песок – 3% мас. раствор NaCl»;
- «CO₂ – песок – 5% мас. раствор NaCl»;
- «CO₂ – песок – 10% мас. раствор NaCl».

Равновесные условия гидратообразования диоксида углерода и природного газа были исследованы на специально собранной установке ДТА, подробное описание которой приведено в работе [12].

Равновесные условия гидратообразования диоксида углерода рассчитывали по программе CSMHyd. Определение количества растворенного диоксида углерода проводили по модели [16].

Кривая фазового равновесия CO_{2(газ)} ↔ CO_{2(жид)} построена с использованием справочных данных французской химической компании Air Liquide [17].

Захоронение диоксида углерода в подмерзлотных водоносных горизонтах Виллойской синеклизы определяется положением границ ЗСГ гидрата CO₂. На рисунке 1 по глубине и температуре сопоставлены термический профиль геологоразведочной площади №2 – 40 км Виллойского тракта [18], равновесные кривые гидратообразования диоксида углерода в объеме воды, 3%, 5% и 10% растворов хлорида натрия и экспериментально определенные точки равновесных условий гидратообразования в рассматриваемых модельных системах. Положения верхней и нижней границ ЗСГ определяются точками пересечения термического профиля геологоразведочной площади с равновесными кривыми гидратообразования диоксида углерода в различных системах в зависимости от концентрации растворов. Нижняя граница ММП на

рассматриваемой площади располагается на глубине 360 м [18]. На рисунок 1 для определения фазового состояния диоксида углерода и процессов, протекающих при его закачке в пласт также нанесена кривая равновесия $\text{CO}_2(\text{газ}) \leftrightarrow \text{CO}_2(\text{жид.})$.

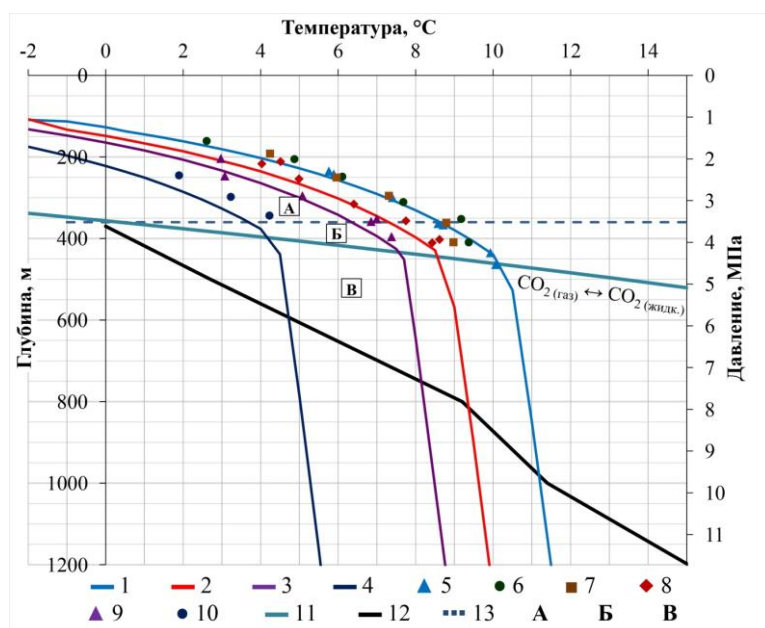


Рисунок 1 – Зона стабильности гидрата диоксида углерода на геологоразведочной площади №2 – 40 км Виллойского тракта.

Условные обозначения: I) расчетные кривые гидратообразования в системах: 1 - « CO_2 – вода»; 2 - « CO_2 – 3% раствор NaCl »; 3 - « CO_2 – 5% раствор NaCl »; 4 - « CO_2 – 10% раствор NaCl »; II) экспериментальные точки гидратообразования в системах: 5 - \blacktriangle – « CO_2 – песок – вода»; 6 - \bullet – « CO_2 – песок – 0,25% раствор NaHCO_3 »; 7 - \blacksquare – « CO_2 – песок – 2% раствор NaHCO_3 »; 8 - \blacklozenge – « CO_2 – песок – 3% раствор NaCl »; 9 - \blacktriangle – « CO_2 – песок – 5% раствор NaCl »; 10 - \bullet – « CO_2 – песок – 10% раствор NaCl »; III) 11 - Равновесная линия « $\text{CO}_2(\text{жидк.}) - \text{CO}_2(\text{газ})$ »; 12 - термический профиль площади №2 – 40 км Виллойского тракта; 13 - нижняя граница ММТ; IV) зоны гидратообразования: А - « $\text{CO}_2(\text{газ}) - \text{H}_2\text{O}(\text{лед}) - \text{CO}_2(\text{гидрат})$ »; Б - « $\text{CO}_2(\text{газ}) - \text{H}_2\text{O}(\text{жидк.}) - \text{CO}_2(\text{гидрат})$ »; В - « $\text{CO}_2(\text{жидк.}) - \text{H}_2\text{O}(\text{жидк.}) - \text{CO}_2(\text{гидрат})$ »

Верхняя граница ЗСГ диоксида углерода на рассматриваемой площади располагается в области ММП и в зависимости от концентрации растворов опускается от ~125 м до ~220 м (рис. 1). Для пород, насыщенных пресной водой, нижняя граница ЗСГ находится на глубине ~980 м и поднимается до ~590 м для наиболее концентрированного раствора. Таким образом, гидрат диоксида углерода на площади №2 может находиться в стабильном состоянии как в зоне мерзлых, так и в зоне талых пород. В подмерзлотных горизонтах площади №2 диоксид углерода переходит в жидкое состояние. С учетом изменения пластовых условий и фазового перехода $\text{CO}_2(\text{газ}) \leftrightarrow \text{CO}_2(\text{жид.})$, процессы гидратообразования на данной площади можно разделить на следующие:

В мерзлой зоне: $\text{CO}_2(\text{газ}) + \text{H}_2\text{O}_{\text{лед}} \leftrightarrow \text{CO}_2 * 6\text{H}_2\text{O}$;

В талой зоне при низких давлениях: $\text{CO}_2(\text{газ}) + \text{H}_2\text{O}_{\text{жид}} \leftrightarrow \text{CO}_2 * 6\text{H}_2\text{O}$;

В талой зоне при высоких давлениях: $\text{CO}_2(\text{жид.}) + \text{H}_2\text{O}_{\text{жид}} \leftrightarrow \text{CO}_2 * 6\text{H}_2\text{O}$.

Как было показано в работе [19], при закачке диоксида углерода в мерзлые породы может происходить плавление льда, причем температура понижается до $-3,2$ °С при давлении 2,06 МПа. Такое снижение температуры плавления льда с повышением давления может вызвать деградацию мерзлоты и подмерзлотных горизонтов.

В талой зоне при низких давлениях образование гидрата углекислого газа ограничено узкими интервалами температур (от +4 до +10 °С) и давлений (от 3,6 до 4,5 МПа).

При высоких гидростатических давлениях гидратообразование жидкого диоксида углерода протекает в широком интервале температур (до +11,2 °С) и давлений (от 3,8 до ~9,5 МПа). Следовательно, максимальная емкость хранилища CO₂ приходится в зону талых пород при высоких давлениях.

3. Выводы

Таким образом, при непосредственной закачке CO₂ в мерзлые породы необходимо учитывать смещение равновесных условий гидратообразования диоксида углерода с учетом понижения температуры плавления льда при повышении давления. Для предотвращения деградации мерзлоты закачку диоксида углерода необходимо производить непосредственно в талую зону на большие глубины.

4. Благодарности

Работа выполнена в рамках бюджетного проекта № 122011100157-5 с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

5. Литература:

- [1] Zhang, X., Li, P., Yuan, Q., Li, J., Shan, T., Wu, Q. and Wang, Y. A comprehensive review of the influence of particle size and pore distribution on the kinetics of CO₂ hydrate formation in porous media // *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 2023, Early View, pp. 1-17.
- [2] Gaidukova, O., Misyura, S., Morozov, V. and Strizhak, P. Gas Hydrates: Applications and Advantages // *Energies*, 2023, vol. 16, 2866.
- [3] Luo, J., Xie, Y., Hou, M.Z., Xiong, Y., Wua, X., Lüddeke, C.T. and Huang, L. Advances in subsea carbon dioxide utilization and storage // *Energy Reviews*, 2023, vol. 2, 100016.
- [4] Duchkov, A.D., Zheleznyak, M.N., Sokolova, L.S. and Semenov, V.P. Methane and carbon dioxide hydrate stability zones in the sedimentary cover of the Vilyui syncline // *Kriosfera Zemli*, 2019, XXIII, no. 6, pp. 19-26.
- [5] Duchkov, A.D., Sokolova, L.S., Ayunov, D.E. and Permyakov, M.E. Assessment of potential of West Siberian permafrost for the carbon dioxide storage // *Kriosfera Zemli*, 2009, XIII, no. 4, pp. 62-68.
- [6] Kim, S. and Santamarina, J.C. Engineered CO₂ injection: The use of surfactants for enhanced sweep Efficiency // *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2014, vol. 20, pp. 324-332.
- [7] Metz, B., Davidson, O., De Coninck, H.C., Loos, M. and Meyer, L. IPCC special report on carbon dioxide capture and storage. Cambridge: Cambridge University Press, 2005, 431 pp.
- [8] Bachu, S. Sequestration of CO₂ in geological media: criteria and approach for site selection in response to climate change // *Energy Conv. Mgmt*, 2000, vol. 41, pp. 953-970.
- [9] Pereverzeva, S.A., Konosavskiy, P.K., Tudvachev, A.V. and Kharkhordin, I.L. Disposal of carbon dioxide industrial emissions in geological structures // *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta*, 2014, Ser. 7, Vyp. 1, pp. 5-21.
- [10] Osipov, A.V., Mustaev, R.N., Monakova, A.S., Bondareva, L.I. and Dantsova, K.I. Mechanisms and options of the utilization and burial of carbon dioxide in the earth interior // *Izvestiâ vysshih uchebnyh zavedenij. Geologiya i razvedka*, 2022, Vyp. 64(4), pp. 40-53.
- [11] Korzun, A.V., Stoupakova, A.V., Kharitonova, N.A., Pronina, N.V., Makarova, E.Yu., Vaytekhovich, A.P., Osipov, K.O., Lopatin, A.Yu., Aseeva, A.V., Karpushin, M.Yu., Sautkin, R.S., Peregudov, Yu.D., Bolshakova, M.A., Sitar, K.A. and Redkin, A.S. Applicability of natural geological objects for storage, disposal and utilization of carbon dioxide (review) // *Georesursy*, 2023, Vyp. 25(2), pp. 22-35.
- [12] Kalacheva, L.P., Ivanova, I.K., Portnyagin, A.S., Rozhin, I.I., Argunova, K.K. and Nikolaev, A.I. Determination of the lower boundaries of the natural gas hydrates stability zone in the subpermafrost horizons of the Yakut arch of the Vilyui syncline, saturated with bicarbonate-sodium type waters // *SOCAR Proceedings, Special Issue*, 2021, no. 2, pp. 1-11.

- [13] Geology of the USSR Gl. red. E.A. Kozlovskiy. T. XVIII. Yakutskaya ASSR. Poleznye iskopaemye. Red. toma Yu.V. Arkhipov, Moscow: Nedra, 1979, 411 p.
- [14] Grubov, L.A. and Slavin, V.I. Comparative assessment of the hydrogeological conditions of various areas of the Yakut artesian basin in connection with oil and gas potential // *Gidrogeologicheskie issledovaniya v neftegazonosnykh rayonakh*, L.: Izd-vo VNIGRI, 1971, pp. 184-203.
- [15] Waters of oil and gas fields of the USSR: Handbook / ed. L.M. Zorkin. M: Nedra, 1989, 382 pp.
- [16] Akinfiev, N.N. and Diamond, L.W. Thermodynamic model of aqueous CO₂-H₂O-NaCl solutions from -22 to 100°C and from 0.1 to 100 MPa // *Fluid Phase Equilibria*, 2010, vol. 295, pp 104-124.
- [17] Air Liquide. Gas Encyclopedia. Retrieved from: <https://encyclopedia.airliquide.com/carbon-dioxide> (Accessed 15 February 2024).
- [18] Zheleznyak, M.N. and Semenov, V.P. Geotemperature field and permafrost zone of the Vilyui syncline. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2020, 123 pp.
- [19] Mel'nikov, V.P., Nesterov, A.N., Podenko, L.S. and Reshetnikov, A.M. Influence of carbon dioxide on melting of underground ice // *Doklady Earth Sciences*, 2014, vol. 459, no. 1, pp. 1353-1355.

МАГНИТНАЯ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ ПОЧВ ЮЖНОГО ПРЕДБАЙКАЛЬЯ, ОСЛОЖНЕННЫХ ПАЛЕОКРИОГЕНЕЗОМ

Алла Козлова^{1,2}, Ульяна Людвиг¹, Алексей Приставка¹, Алина Уткина¹

¹ ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»,
664003, Россия, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1

² ФГБУН Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1

MAGNETIC SUSCEPTIBILITY OF SOILS IN THE SOUTH BAIKAL REGION COMPLICATED BY PALEOCRYOGENESIS

Alla Kozlova^{1,2}, Alexey Pristavka¹, Ulyana Ludvig¹, Alina Utkina¹

¹ Irkutsk State University, 1, Karl Marx str., Irkutsk, 664003, Russia

² Institute of Geography V.B. Sochava SB RAS, 1, Ulaanbaatar str., Irkutsk, 664033, Russia

Abstract. The article presents a study of the magnetic susceptibility of soils as a diagnostic indicator of pedogenesis processes. The dependences of this indicator on other soil properties, such as electrical resistivity, soil acidity, content of humus and exchangeable cations, carbonates, silt and physical clay, gross iron, and soil age have been revealed. A positive relationship has been established between the magnetic susceptibility of soils and the content of carbonates, exchangeable bases, physical clay and silt. Moreover, in the depressions of paleocryogenic complexes there were more positive connections between magnetic susceptibility and soil properties than on the mounds. They also showed a close relationship with humus and soil age. A negative dependence appeared for acidity and exchangeable hydrogen. In all soils, magnetic susceptibility was found to have the closest positive relationship with soil electrical resistivity.

1. Введение

Изучению пространственного распределения магнитной восприимчивости почв в последние 30 лет уделяется все больше и больше внимания в России [1-5] и за рубежом [6-9]. Интерес исследователей вызван тем, что петромагнитный метод исследования почвенного покрова позволяет получать в краткие сроки большой объем информации, который можно интерпретировать в различных областях [1-3, 6, 9]. Метод магнитной восприимчивости широко применяется в качестве надежного, эффективного и чувствительного метода для установления генезиса, эволюции почв, их диагностики. Особенно хорошо он себя зарекомендовал при оценке степени техногенной трансформации почвенного покрова и, особенно, загрязненных почв [3-5, 7, 9].

Магнитная восприимчивость, или способность намагничиваться, обусловлена наличием в почвах элементов группы железа. Она зависит в первую очередь от концентрации и состава магнитных минералов и отражает наличие в магнитной фракции специфических ультратонких магнитных зерен размером менее 30 мкм. Эти зерна, как правило, имеют биохимическое происхождение и образуются в результате интенсивных почвообразовательных процессов. Они обладают магнитными свойствами, отличными от зерен тех же магнитных минералов, но других размеров, поэтому достаточно легко обнаруживаются [10].

Их наличие и количество может служить оценкой особенностей и степени развития почв, а само явление магнитной восприимчивости является универсальным показателем, отражающим почвенно-генетические [11], почвенно-экологические [1-10] и палеопочвенные [12] особенности конкретных типов почв.

Целью исследования явилось изучение свойства магнитной восприимчивости почв в качестве диагностического показателя процессов педогенеза, установления зависимостей этого параметра от других почвенных свойств.

2. Объекты и методы исследования.

Объектами исследования стали две пары сопряженных разрезов почв палеокриогенных комплексов, заложенных на буграх и в западинах в условиях лесостепи Южного Предбайкалья. Почвенная комбинация лесного ландшафта представлена серой метаморфической почвой на бугре и стратоземом сергумусовым в западине. В условиях степи почвенный комплекс состоит из чернозема глинисто-иллювиального на бугре и стратозема темногумусового в западине.

В образцах почв общепринятыми в почвоведении классическими и современными методами лабораторного и статистического анализа с привлечением сертифицированного оборудования аккредитованных лабораторий Института географии РАН (г. Москва) и Институтов СО РАН (г. Иркутск) были определены следующие показатели [13]: содержание органического углерода и гумуса – методом И.В. Тюрина; pH водной суспензии – потенциометрическим методом; содержание карбонатов – газиметрическим методом; содержание обменных катионов: Ca^{2+} и Mg^{2+} – методом Тюрина, H^+ – методом Гедройца; гранулометрический состав – ускоренным пирофосфатным методом; содержание валового железа – рентгенфлуоресцентным методом.

Радиоуглеродное датирование гумуса современных и погребенных гумусовых горизонтов западин определялось в лаборатории радиоуглеродного датирования с применением сцинтилляционной (LCS) и ускорительной (AMS) техники с использованием автоматизированной установки (AGE3, Швейцария) [14].

Определение удельного электрического сопротивления почв проводили в лабораторных условиях при насыщении почв водой досостоянии пасты (до полной влагоемкости) при помощи прибора LandMapper-03 [15].

Объёмная магнитная восприимчивость χ определялась на малогабаритном измерителе магнитной восприимчивости KM-7 (SatisGeo, Чехия) с чувствительностью $1 \cdot 10^{-6}$ ед. Си. Величину удельной магнитной восприимчивости (УМВ) χ получали путём деления значения объёмной магнитной восприимчивости (ОМВ) на плотность почвы ρ (выраженную в $\text{кг}/\text{м}^3$): $\chi = \chi/\rho$. Размерность удельной магнитной восприимчивости – $10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ [10].

Для установления связей магнитной восприимчивости исследуемых почв с их основными свойствами с помощью программы Past 3.26 провели корреляционный анализ.

3. Природные условия и почвенный покров.

Южное Предбайкалье находится в центре Азиатского материка, занимает равнинную часть Сибирской платформы, расположено на юге Иркутской области. Особенности почвообразования объясняется нахождением его территории в аридной тени хребтов Западного и Восточного Саяна, а также горного обрамления озера Байкал. Оно включает Иркутско-Черемховскую равнину, юг Прибайкальской впадины, Приольхонское плато. Ведущим фактором почвообразования в регионе является холмисто-увалистый рельеф с высотой междуречий 400-700 м, относительные высоты составляют 120-150 м. Он выступает основным перераспределителем солнечной энергии, влаги и растворимых веществ. Геологическое строение Южного Предбайкалья – неоднородное и представляет платформу с докембрийским кристаллическим фундаментом, перекрытым мощным чехлом палеозойских нижне- и верхнекембрийских, высококарбонатных, а также мезозойских юрских бескарбонатных отложений. В Приольхонье распространены протерозойские породы. Почвообразующими породами часто служат лессовидные и покровные суглинки. Климат региона – резкоконтинентальный, формируется в условиях орографической изоляции под большим влиянием Сибирского антициклона. Среднегодовая температура воздуха колеблется от -2,4 до 4,1 °С, а количество осадков – от 260 до 430 мм. Общая ориентация макросклонов хребтов, господствующий с северо-запада на юго-восток перенос воздушных масс усиливает роль экспозиционного фактора. Одновременное противоположно направленное воздействие

увлажнения и термических факторов является предпосылкой для формирования различных ландшафтов на северных и южных склонах. Вершины водоразделов и увалов заняты подтаежными сосновыми и лиственнично-сосновыми бруснично-травяными лесами, северные и восточные склоны – сосново-березовыми разнотравными лесами с островами степей. На речных террасах и южных склонах располагаются южно-сибирские и сухостепные формации разнотравно-злаковых и злаковых степей [16].

Котловинно-горный эффект и аридно-теневая форма вертикальной зональности способствовали развитию резкоконтрастных ландшафтов и почв. Так, на вершинах водоразделов в условиях подтайги развиты дерново-подзолистые почвы, буроземы оподзоленные и остаточнокarbonатные. В средней и нижней части склонов распространены серые типичные и серые метаморфические почвы, черноземы глинисто-иллювиальные лесостепи. На террасах рек, южных частях склонов располагаются черноземы дисперсно-карбонатные и каштановые почвы. На формирование и функционирование почв региона существенное влияние оказывает палеокриогенный позднеплейстоценовый микрорельеф, образованный в сартанское время. Перигляциальные условия способствовали первоначальной разбивке поверхности на полигоны и трещины, заполненные жильным льдом, впоследствии вытаявшим и замещенным почвогрунтом. Морфологически он представляет собой чередование полигонов-бугров и западин округлой и овальной формы, диаметром 10-20 м, с перепадом высот до 3,5 м. Почвы полигонов-бугров имеют ненарушенное строение и отнесены к типам и отделам постлитогенного ствола. В западинах образование почв шло в переотложенном материале. В их профиле наблюдается один или несколько погребенных гумусовых горизонтов. Большинство почв западин отнесено к отделу стратоземов синлитогенного ствола. В целом, почвы бугров и западин существенно различаются по строению профиля, устойчивым и динамическим свойствам, уровню тепло- и влагообеспеченности, плодородию [17].

4. Результаты и обсуждение

Известно, что кальцит (CaCO_3) и сильвинит (KCl) в магнитном отношении являются диамагнетиками с отрицательными значениями удельной магнитной восприимчивости (УМВ) ($-0,38 \cdot 10^{-8}$ и $-0,52 \cdot 10^{-8}$ м³/кг, соответственно). Следовательно, накопление подвижных карбонатов или кальцита, а также солей в почве снижает значения УМВ. Существует определенная зависимость удельной магнитной восприимчивости от гранулометрического состава: чем выше количество грубодисперсных фракций физического песка (частиц $>0,01$ мм), тем больше величина УМВ [11]. Удельная магнитная восприимчивость почв находится в тесной взаимосвязи с электросопротивлением (СЭП), так как эти показатели зависят от одних и тех же свойств почв. Повышенное содержание карбонатов и легкорастворимых солей, обменных оснований заметно снижают значения СЭП и УМВ, а гумуса, актуальной и потенциальной кислотности – существенно увеличивают.

Исследование удельной магнитной восприимчивости в почвах Южного Предбайкалья показало довольно высокие значения в верхней части ($115 \cdot 10^{-8}$ м³/кг), достигая максимума ($155 \cdot 10^{-8}$ м³/кг) в середине профиля серой метаморфической почвы на бугре. Это согласуется с нарастанием актуальной и потенциальной кислотности, а также со снижением количества обменных оснований. Выявлена интересная зависимость между содержанием валового железа и УМВ: на фоне увеличения валового железа внизу профиля значения магнитная восприимчивость заметно снижаются за счет присутствия в породе карбонатов кальция. Повышенные значения СЭП в верхней и средней части профиля обусловлены максимальным содержанием гумуса и легким гранулометрическим составом. В почвообразующей породе величина электросопротивления резко снижается из-за карбонатности породы.

В стратоземе серогумусовом западины величины УМВ оказались в 1,5 раза ниже, чем в предыдущей почве на бугре, что связано с большей его гумусированностью. При этом максимум их значений приходится на среднюю часть профиля, где повышена актуальная и потенциальная кислотность и понижено количество обменных оснований. Связано это с тем, что западины представляют собой закрывшиеся бывшие криогенные трещины и почвы в них

имеют более рыхлое строение по сравнению с буграми. Поэтому здесь быстрее протекают процессы выщелачивания, вынос легко- и труднорастворимых солей за пределы профиля. Другой причиной повышенной магнитной восприимчивости почв может являться различный возраст дневных и погребенных гумусовых горизонтов, который у первых соответствует современной фазе почвообразования и развитием дернового процесса, а вторых – наиболее теплomu атлантическому времени, когда на этой территории были распространены высокогумусные почвы степных ландшафтов. Наибольшие величины электросопротивления также приурочены к погребенному гумусовому горизонту в связи с максимальным содержанием гумуса, имеющего свойства диэлектрика, ну и с более легким гранулометрическим составом.

Магнитная восприимчивость в черноземе глинисто-иллювиальном, по сравнению с серой метаморфической почвой, невелика ($34 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$) и ее значения резко падают вниз по профилю до $6 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ в почвообразующей породе. Это обусловлено понижением уровня кислотности и повышением количества карбонатов в почвообразующей породе, также содержание валового железа постепенно уменьшается с глубиной. Вслед за изменениями химических, физических и физико-химических свойств вниз по профилю почвы существенно снижаются значения удельного электросопротивления.

Удельная магнитная восприимчивость стратозема темногумусового оказалась такой же, как и в верхней части профиля чернозема глинисто-иллювиального на бугре и оставалась таковой на протяжении всего профиля, хотя возраст современного и погребенного гумусового горизонта сильно различается. Согласно данным радиоуглеродного датирования возраст горизонтов Ad и A, вместе составляющих AU, приближается к современной фазе почвообразования и относится к среднему голоцену, захватывая начало атлантического периода. Радиоуглеродный возраст погребенного гумусового горизонта ясно диагностирует его формирование в атлантическое время, характеризующееся значительным потеплением, развитием высокотравной растительности и, соответственно, развитием высокогумусных почв. Значения электросопротивления почвы западины оказались выше, чем на бугре, поскольку почва обладает слабокислой реакцией среды и содержит высокое количество гумуса.

Корреляционный анализ проводился между средневзвешенными значениями магнитной восприимчивости и другими свойствами исследуемых почв. Так, в серой метаморфической почве на бугре обнаружена положительная связь между УМВ и электросопротивлением, в меньшей степени – содержанием ила и валового железа, отрицательная – к кислотности, обменным катионам, особенно Ca и Mg, физической глине.

Значения удельной магнитной восприимчивости в черноземе глинисто-иллювиальном на бугре оказались в положительной зависимости от электросопротивления, содержания гумуса, карбонатов, валового железа, в меньшей степени – от содержания обменных оснований и физической глины. Отрицательная зависимость УМВ выявлена по отношению кислотности почвы и содержанию ила.

В почвах западин тесная зависимость магнитной восприимчивости наблюдается по отношению к электросопротивлению, возрасту горизонтов, меньшая – к кислотности и гумусу, а отрицательная – к валовому железу и обменному водороду и совсем не обнаружена – к CaCO_3 и илу. При этом сильную тесноту связи почти со всеми свойствами показала магнитная восприимчивость стратозема темногумусового, отрицательная зависимость была выявлена только по отношению к валовому железу.

5. Выводы

Значения удельной магнитной восприимчивости, впервые полученные для почв лесостепи Южного Предбайкалья, подтверждают слабую текстурную дифференциацию профиля серой метаморфической почвы. Это связано с затуханием в настоящее время подзолистого процесса, вызванного усилением криоаридности природной среды и изменением характера почвообразования. Низкие значения магнитной восприимчивости в черноземе глинисто-

иллювиальном, по сравнению с серой метаморфической почвой обусловлены наличием в нем карбонатов, пониженным содержанием валового железа и повышенным – обменных оснований. В условиях палеокриогенного микрорельефа УМВ оказалась заметно выше в погребенном гумусовом горизонте почвы западины лесного ландшафта, по сравнению с современным (дневным), что указывает на явную смену условий и процессов почвообразования. Напротив, в стратоземе темногумусовом таких изменений не выявлено. Значения удельной магнитной восприимчивости показали сходные величины и в современном и погребенном гумусовых горизонтах стратозема. Это говорит о том, что на данной территории на протяжении многих тысячелетий по настоящее время существуют лесостепные ландшафты с высокогумусными почвами.

Корреляционный анализ выявил положительную связь УМВ на буграх с содержанием карбонатов, обменных оснований, физической глины и ила. При этом в западинах положительных зависимостей между удельной магнитной восприимчивостью и свойствами, том числе в отношении гумуса и возраста почв, оказалось больше, в чем на буграх. Отрицательная зависимость УМВ проявилась к кислотности и обменному водороду. Во всех почвах магнитная восприимчивость оказалась в самой тесной положительной взаимосвязи с электросопротивлением почв.

5. Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке регионального гранта Российского научного фонда и Министерства экономического развития и промышленности Иркутской области (проект № 23-27-10013 (05-62-629/23) «Трансформация постагрогенных почв и возможность их введения в сельскохозяйственный оборот в условиях интенсивного природопользования и глобальных изменений окружающей среды»).

6. Литература:

- [1] Obydenova L.A. Magnetic susceptibility of soils in the Middle Urals as an indicator of agroecological assessment of soils: abstract of thesis. dis.... Ph.D. biol. Sciences/ – M., 2003. – 24 p.
- [2] Gladysheva M.A. Magnetic susceptibility of urbanized soils: the example of Moscow: abstract of thesis. dis... cand. biol.sc. – M., 2007. – 26 p.
- [3] Stradina O.A. Magnetic susceptibility of soils in the Middle Urals as an indicator of their contamination with heavy metals: abstract of thesis. dis.... Ph.D. s-x. Sci. – Ufa, 2008. – 20 p.
- [4] Reshetnikov M.V., Dobrolyubova N.V. Magnetic susceptibility and concentration of heavy metals in soils of urbanized areas (on the example of Saratov) // Non-ferrous metals. – 2009. – No. 11. – pp. 15-18.
- [5] Reshetnikov M.V., Grebenyuk L.V., Kuznetsov V.V. Spatial distribution of magnetic susceptibility of soils within the city of Mednogorsk (Orenburg region) // Bulletin of the Orenburg State University. – 2015. – No. 3 (178). – pp. 177-182.
- [6] Evans M.E., Heller F. Environmental magnetism. Principle and applications of enviromagnetics // Academicpress. An imprint of Elsevier Science, 2003. – 299 p.
- [7] Magnetic response of soils and heavy metal pollution – a case study / N.V. Jordanova [and others] // Environ. Sci. Technol. – 2003. – V. 37. – Iss. 19. – P. 4417-4424.
- [8] Discrimination of lithogenic and anthropogenic influences on topsoil magnetic susceptibility in Central Europe / T. Magiera [and others] // Geoderma. 2006. – V. 130. – Iss. 3-4. – P. 299-311.
- [9] Maher B.A. Environmental magnetism and climate change // Contemporary Physics. – 2007. – Vol. 48. – P. 247–274.
- [10] Chevychelov A.P., Alekseev A.A., Kuznetsov L.I. Magnetic susceptibility of frozen soils in Yakutia // News of Irkutsk State University. Series “Biology. Ecology”. – 2021. – T. 36. – P. 57-71.
- [11] Soil magnetism / V.F. Babanin [and others] – Yaroslavl-M.: Ed. YaGTU, 1995. – 219 p.

- [12] Vagapov I.M., Alekseev A.O. Magnetic susceptibility in assessing the spatial and profile heterogeneity of soils caused by paleoecological factors // News of the Russian Academy of Sciences, geographical series. – 2015. – No. 5. – P. 99-106.
- [13] Theory and practice of chemical analysis of soils / ed. L.A. Vorobyova. – M.: GEOS, 2006. – 400 p.
- [14] Chichagova, O.A. Radiocarbon dating of soil humus. – M., 1985. – 146 p.
- [15] Pozdnyakov A.I., Gyulalyev Ch.G. Electrophysical properties of some soils. – Moscow-Baku: Adilogly, 2004. – 240 p.
- [16] Atlas. Irkutsk region: environmental conditions of development. – M.; Irkutsk, 2004. – 90 p.
- [17] Kozlova A.A., Belozertseva I.A., Lopatina D.N. Soils of the Southern Cis-Baikal region: diversity and patterns of distribution // Geography and natural resources. – 2021. – No. 1. – P. 103-114.

**СЛЕДЫ КРИОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОЧВАХ ДОЛИНЫ Р. БЕЛОЙ
(ЮЖНОЕ ПРИБАЙКАЛЬЕ)**

Светлана Куклина

ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»,
664003, Россия, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1

**TRACES OF CRYOGENIC PROCESSES IN SOILS IN THE VALLEY
OF THE BELAYA RIVER (SOUTHERN BAIKAL REGION)**

Svetlana Kuklina

Irkutsk State University, 1, Karl Marx str., Irkutsk, 664003, Russia

Abstract. The paper considers the most common cryogenic structures found in soils in the Belaya River valley. They were formed mainly in the cold Sartan time (corresponding to MIS 2). As a result of cracking, heaving of soils, involution and solifluction, various morphological structures has emerged in soil profiles. The active development of cryogenic processes was facilitated by the heavy granulometric composition of soils and sediments. Since the study area currently has a wide range of fluctuations in heat and humidity throughout the year, soils are also susceptible to cryogenesis, but to a lesser extent. This is manifested in the formation of a tiled soil structure in the lower horizons, small frost-bearing cracks on the soil surface and cryoturbations in the profile.

1. Введение

Резко континентальный климат Южного Прибайкалья и связанное с ним глубокое сезонное промерзание грунтов стимулируют развитие многих криогенных процессов и проявление сопутствующих им образований в почвах и отложениях.

Актуальность исследований связана с тем, что, несмотря на повсеместное распространение криогенеза и палеокриогенеза в почвах и отложениях Южного Прибайкалья, их изученность до сих пор остается слабой.

2. Объекты и методы исследования

Целью исследования явилось выявление криогенных структур во вскрытых почвенных разрезах и археологических шурфах в долине р. Белой, рассмотрение условий их развития.

Методы, использованные при работе: морфологический, стратиграфический.

Территория исследования ограничена долиной р. Белой и имеет географические координаты: 103°00' – 104°00' в.д. и 52°40'-53°00' с.ш. Река Белая является крупным правым притоком р. Ангара, берет начало в горах Восточного Саяна и затем спускается на Иркутско-Черемховскую равнину, превращаясь из горной реки в горно-равнинную. Это меняет характер аллювиального осадконакопления на поймах реки, а также климатические, орографические и другие условия почвообразования в верхней, средней и нижней части долины. Исследования проводились в районе среднего и нижнего течения р. Белой (Рисунок 1).

В ходе многолетних работ по изучению почвенного покрова долины были вскрыты почвы и отложения голоценового (0-11,7 тыс. л. н), сартанского (11,7– 28 тыс. л. н) и позднекаргинского (28–30 тыс. л. н.) времени со слабоизмененным и значительно измененным криогенезом строением.

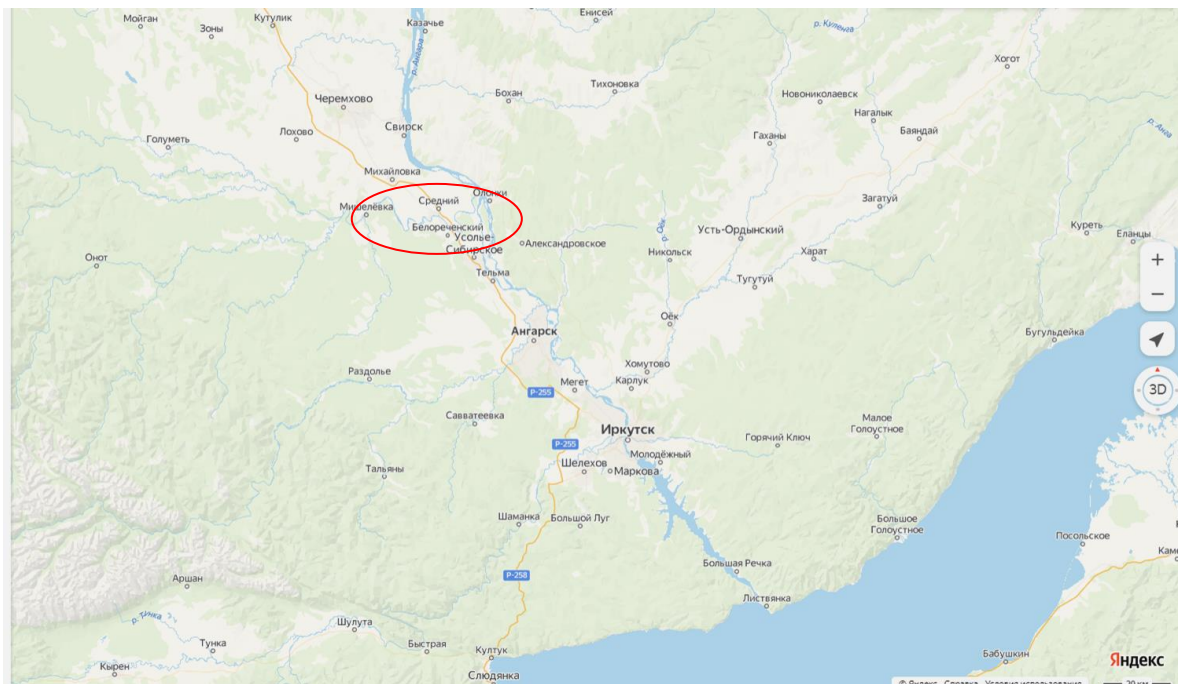


Рисунок 1 – Схема территории Южного Прибайкалья с территорией исследования (выделено красным)

3. Результаты и обсуждение

В аллювиальных почвах на высокой и средней поймах реки обнаруживаются: незначительные криотурбации и криогенная плитчатость в нижней части профиля, небольшие криогенные трещины, приуроченные преимущественно к границе голоцена и плейстоцена. Слабое развитие криогенных процессов связано в первую очередь с легким гранулометрическим составом пойменных почв (супесчаные, легкосуглинистые), вторым фактором может служить недостаточное количество влаги для их активного развития в аллювиальных почвах высокой и средней поймы, где влажность почвенного профиля в большую часть вегетационного периода невысокая и крайне редко наблюдается оглеение.

Иная ситуация наблюдается в почвах, формирующихся на надпойменных террасах и на выположенных склонах долины. Наиболее активно криогенные процессы проявлены в почвах и отложениях средне- и тяжелосуглинистого состава.

Наличие в долине р. Белой объектов археологического наследия (ОАН) позволило изучать следы проявления криогенных процессов на протяженных стенках археологических шурфов и траншей, что сложно сделать в обычных почвенных разрезах, так как такие образования могут оставаться за пределами разрезов. Нами зафиксированы разные формы проявлений криогенных процессов, таких как трещинообразование, пучение грунтов и солифлюкция.

Один из самых распространенных процессов в зонах с сезонной и многолетней мерзлотой – криогенное трещинообразование, связанное с разрывной деформацией мерзлых грунтов при уменьшении их объема во время замерзания.

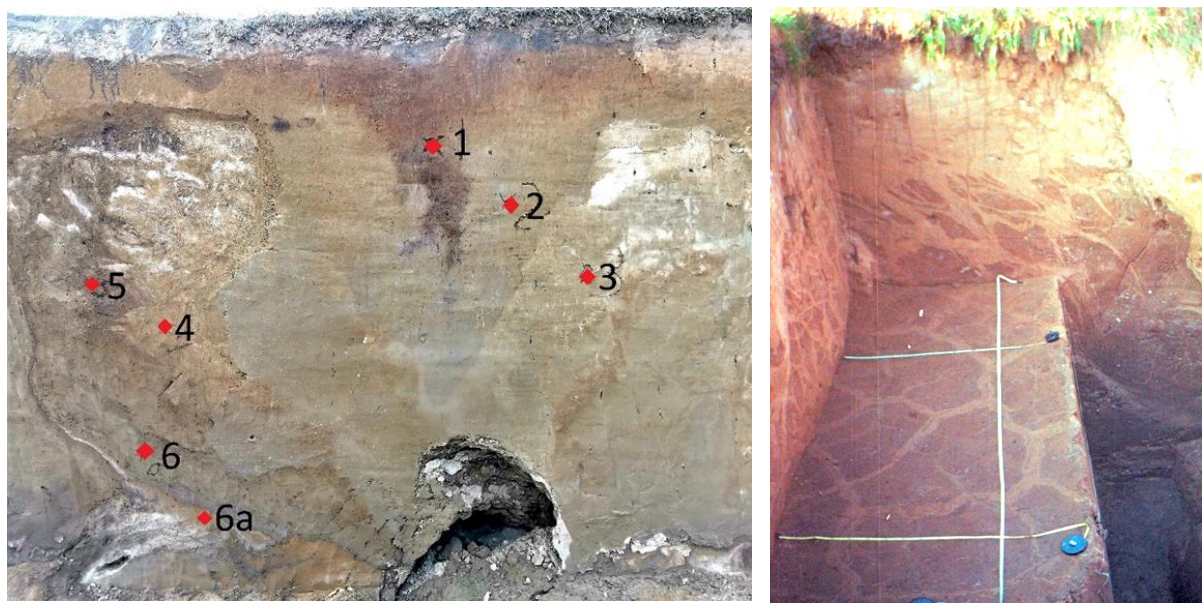
Проявлением криогенного растрескивания в рассматриваемых отложениях является присутствие морозобойных клиньев, заполненных материалом разного возраста и разной степени гумусированности.

На стенках траншей обнаруживаются криогенные трещины (клинья) одной, двух и трех генераций. Уровень заложения самых крупных морозобойных клиньев – кровля сартанских отложений (возраст криогенеза 12,9–11,7 тыс. л. н.). Эти клинья характеризуются периодическим чередованием с расстоянием 5-8 метров один от другого. Значительная глубина растрескивания (до 1,5-3,0 м) приводит к образованию больших зон разгрузки напряжения и, соответственно, увеличению расстояния между соседними трещинами.

Помимо крупных морозобойных клиньев, чуть реже обнаруживаются более мелкие клинья, сформированные в голоценовое время и имеющие два уровня заложения: обычно в горизонте

ВМ₂ (ВТ₂) современной почвы (раннеголоценовые) и горизонте ВМ₁ (ВТ₂) (среднеголоценовые).

Для примера, на Рисунке 2А, приведено строение криогенной трещины 3-х генераций. Самая древняя генерация позднесартанского возраста имеет ширину 3,2 м и глубину 3,0 м. По краям криогенного клина отмечаются инволюции, с левой стороны клина они более выражены. Уровень заложения самого крупного клина приходится на кровлю горизонта С_{са} современной агросерой метаморфической почвы. Вторая генерация трещины заполнена отложениями раннеголоценового возраста (горизонт ВМ₂), имеет меньшие размеры - 1,3 м в ширину с глубиной 1,6 м. Трещина третьей генерации имеет ширину 80 см и глубину 1 м, заложена в среднеголоценовых отложениях (под пахотным горизонтом Р).



А

Б

Рисунок 2 – Криогенные структуры на ОАН «Стоянка «Мальта-Мост 3»»: А – криогенный клин 3-х генераций (фото Куклиной С.Л.), Б – сложная система криогенных трещин на ОАН «Мальта» (фото Ребрикова П.Н.). Условные обозначения: 1- трещина среднеголоценового возраста, 2 –трещина раннеголоценового возраста, 3 – трещина позднесартанского возраста, 4- инволюции средне- и раннесартанских отложений, 5- инволюции каргинской почвы, 6, 6а – инволюции негумусированных, возможно, сартанских отложений.

Генезис представленного клина показывает, что образование морозобойных трещин в позднесартанское время спровоцировало криогенное трещинообразование в местах их нахождения и при кратковременных похолоданиях в голоценовое время. Этому способствовало, то, что крупные клиновидные структуры являются коллекторами влаги, что ведет к дальнейшей активизации криогенных процессов. Холодные тона в окраске отложений, заполняющих клин, так же свидетельствует об их регулярном переувлажнении.

Криогенные трещины, заложенные на нескольких уровнях, могут создавать сеть разноразмерных клиньев на вертикальных стенках разрезов и сложную сетку полигонов в горизонтальных разрезах (Рисунок 2Б).

Возможно, морфологическим проявлением криогенного растрескивания является волнистая граница на смене сартанских отложений голоценовыми (Рисунок 3), периодически встречаемая в разрезах между горизонтами ВМ (ВТ) и С_{са}. Такие структуры, вероятно, представляли собой в позднесартанское время дневную поверхность, разбитую сетью полигональных трещин небольшого размера, с микрорельефом, напоминающим вымощенную булыжниками мостовую.

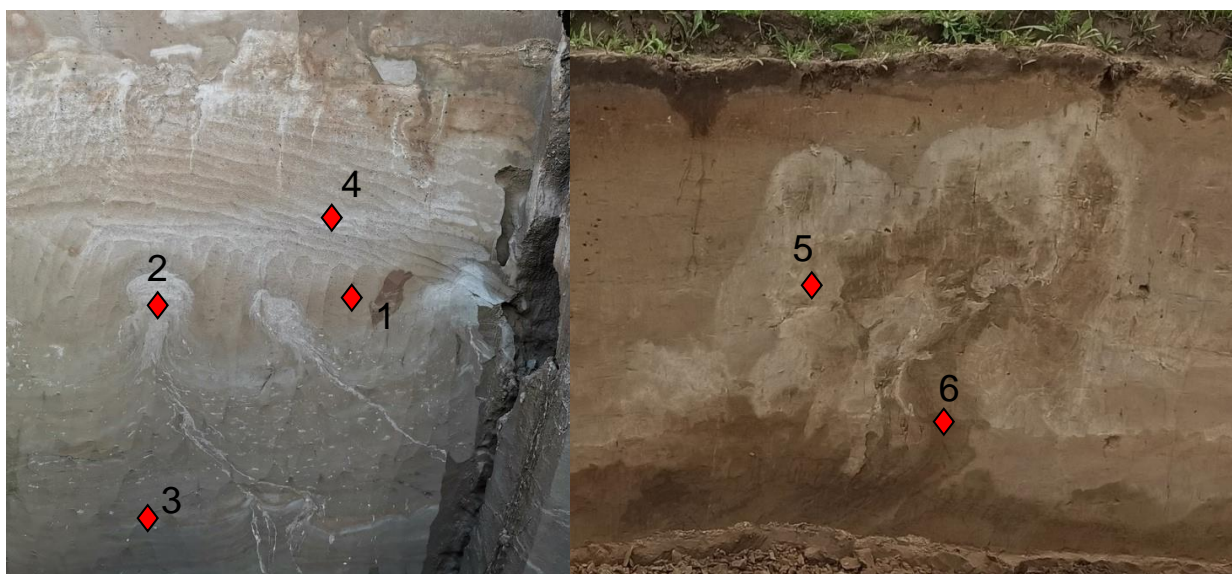


Рисунок 3 – Криогенная структура в виде волнистой границы между слоями на ОАН «Стоянка «Мальта-Мост 3» (фото Кокорина Н.А.)

Развитие и функционирование крупных морозобойных трещин могло стимулировать развитие других криогенных процессов (пучение грунтов, криотурбации и др.) из-за лучшей миграции влаги вглубь толщи отложений и перенасыщения водой или, наоборот, тормозить их из-за сброса напряжения и отжимания влаги по трещинам. Примером активизации других процессов в зоне функционирования трещин могут служить инволюции каргинских, средне- и раннесартанских отложений (см. Рисунок 2А), которые наблюдались нами по бортам большинства крупных трещин.

Процесс перераспределения вещества в многолетнемёрзлых породах в жидком состоянии, может приводить к разрыву мерзлого или промерзающего слоя и «впрыскиванию» (инъекции) разжиженного грунта или воды в него. Инъекции могут идти в вертикальном и горизонтальном направлении. Результатом такого процесса, происходящего на достаточной глубине, являются инъекционные структуры (инволюции), которые, в нашем случае, чаще представлены внедренным материалом нижележащих слоев в верхние слои отложений.

Нами выявлены инволюции двух временных отрезков: позднекаргинского и позднесартанского.



А

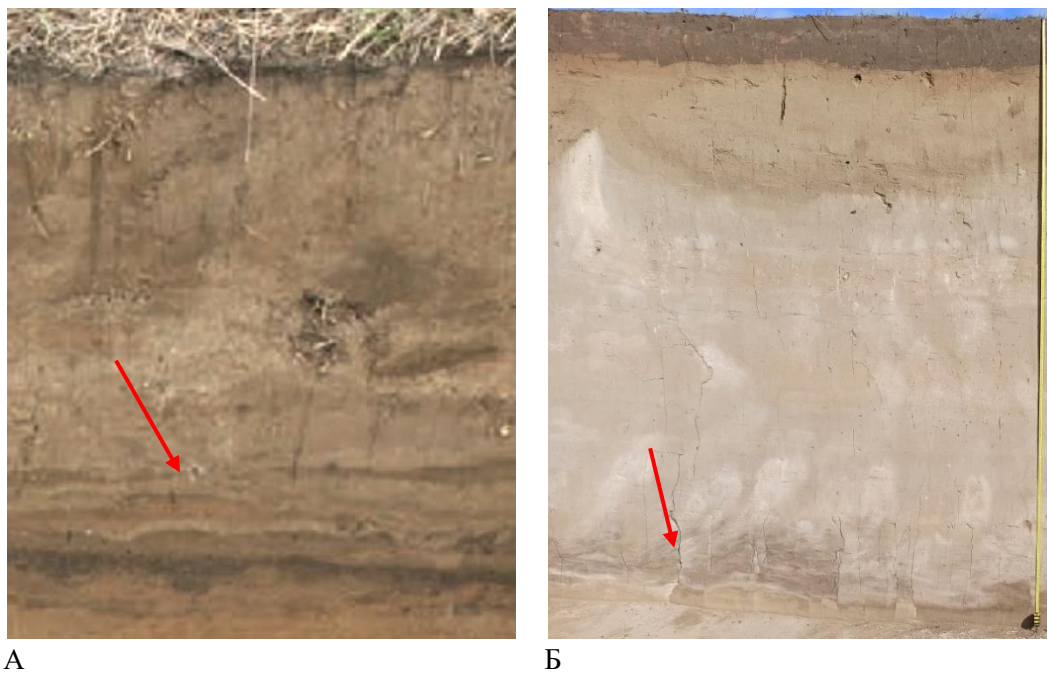
Б

Рисунок 4 – Криогенные структуры на ОАН «Стоянка «Мальта-Мост 3»: А – инволюции позднекаргинского времени (фото Куклиной С.Л.), Б – инволюции позднесартанского времени (фото Ребрикова П.Н.)

Условные обозначения: 1- лаколлитоподобная линза, 2- высококарбонатные инволюции, 3 – аллювиальные оглеенные отложения каргинского времени, 4- аллювиальные отложения каргинского времени, 5- средне- и раннесартанские отложения, 6- фрагменты каргинской почвы.

На Рисунке 4А видна параллельная слоистость отложений, которая деформирована под влиянием внедрения в слоистую толщу разжиженного грунта из нижних слоев, в результате чего образовалось лаколлитоподобное тело (линза), с мощностью 30-40 см. Позднее, туда же был инъецирован высококарбонатный материал. Сохранились каналы, по которым происходило внедрение материала снизу-вверх. Нижняя часть вскрытой аллювиальной толщи оглеена, что указывает на постоянное переувлажнение этих отложений, здесь же могли образовываться водно-грунтовые суспензии, являющиеся инъекционным материалом. Объемы инъекционных тел в изученных отложениях могут существенно различаться. Так, например, на Рисунке 4Б инволюция имеет значительные размеры - 2,5 метра в высоту и 2 метра в ширину, что значительно превышает размеры структуры на Рисунке 4А.

Криогенные слоистые структуры (Рисунок 5А), часто имеющие полосчатую окраску, образуются в результате вязкого течения оттаявших отложений по мерзлотному подстилающему слою вниз по склону. Ширина солифлюкционной толщи может колебаться от 0,3 до 1,0 м и увеличиваться к основанию склона. На территории исследования эти процессы наиболее активно протекали в раннесартанское время (~ 28–25 тыс. л. н.). Тогда на склонах в регионе активно развивались солифлюкционные процессы, на равнинах – криотурбации (Рисунок 5Б).



А

Б

Рисунок 5 – Криогенные структуры: А – солифлюкцированные слоистые отложения (вероятно, раннесартанского возраста) в почвах на выположенном склоне (с. Тайтурка), Б – криотурбированные каргинские палеопочвы (ОАН «Стоянка «Мальта-Мост 3»)

4. Выводы

Несмотря на то, что большинство рассмотренных криогенных структур являются реликтовыми, унаследованными от прошлых эпох, но они продолжают влиять на современное почвообразование. Так, например, криогенное трещинообразование в позднесартанское время способствовало формированию бугристо-западинного рельефа, который создает микрокомбинации современного почвенного покрова. По палеоклиням продолжает

и происходить дополнительный сброс влаги в нижележащие слои, что может провоцировать процессы оглеения. Криогенное подтягивание карбонатов к поверхности в позднем сартане (Sr4) привело к тому, что в большинстве почв бортов долины и надпойменных террас горизонт С окарбоначен.

Современный криогенез так же обнаруживается в изученных почвах и отложениях, но имеет более скромные масштабы, что связано с менее благоприятными условиями для его развития.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ДОБЫЧИ ИСКОПАЕМОЙ МАМОНТОВОЙ КОСТИ НА МЕРЗЛОТНО-ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ В БАССЕЙНЕ СРЕДНЕГО ТЕЧЕНИЯ РЕКИ ИНДИГИРКИ

Яна Легостаева¹, Владимир Попов², Наталья Сивцева³, Валерия Михайлова²

¹ ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

² ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова»,
677000, Россия, г. Якутск, ул. Белинского, 58

³ ГБУ «Академия наук РС (Я)», 677007, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 33

THE IMPACT OF FOSSIL MAMMOTH BONE EXTRACTION ON PERMAFROST AND HYDROLOGICAL CONDITIONS IN THE BASIN OF THE MIDDLE COURSE OF THE INDIGIRKA RIVER

Yana Legostaeva¹, Vladimir Popov², Natalia Sivtseva³, Valeria Mikhailova²

¹ Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

² North-Eastern Federal University, 58, Belinsky str., Yakutsk, 677000, Russia

³ Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), 33, Lenin av., Yakutsk, 677007, Russia

Abstract. In the north of Yakutia, in recent times, the collection and extraction of fossil mammoth tusks has intensified. The article presents a geocological assessment of the impact of tusk mining in yedoma deposits for thirty years on the territory of the basin of the lower reaches of the Semyuelyakh and Semyuelyakh-Sala rivers located on the Abyi lowland based on the interpretation of satellite images of different years. As a result of the research, it was revealed that, despite the seemingly extreme vulnerability of edoma high-ice deposits, they remain quite stable due to very severe climatic conditions. However, climate warming trends and the continuation of mining operations require more detailed studies, including monitoring ones.

1. Введение

Мамонтовая кость всегда играла значительную роль в жизни малочисленных народов Северана территории Восточной Сибири, начиная с доисторических времен и до наших дней [1]. Ее ресурсный потенциалв арктической зоне республики Саха (Якутия) оценивается от 140 тыс. тонн [2] до порядка 500 тыс. тонн [3]. Россия в XVIII-XIX веке ежегодно добывала и продавала на мировом рынке 20 – 30 тонн мамонтового бивня [4]. Сбор и добыча старательскими методами бивня мамонта в Якутии, где сосредоточено не менее 80 % ее ресурсов в России, за последние два десятилетия растет и оценивается десятками тонн в год [2,5].

В районе нижнего течения рек Семюелях-Сала, Семюелях, Тирехтях (Рисунок 1) – правых притоков и соответственно рек 3, 2 и 1 порядка речной системы реки Индигирки, впадающего в Восточно-Сибирское море в течение около трех десятилетий осуществляется добыча мамонтовой костив штольнях создаваемых гидроразрывом. Территория расположена на фрагменте Абыйской низменности северотаежной области Северо-Восточной Сибири, представляющей собой аллювиально-озерную равнину.

2. Результаты исследований

Для четвертичных отложений костеносной едомы Q_{III}^2 , образующих лессовидный покров, представленный глинистыми алевролитами мощностью до 70 м, характерно развитие ледового комплекса – мощных повторно-жильных льдов с шириной клиньев до 60 м [6]. Их подошва часто обнажается в береговых обрывах, но местами погружена под урез рек. Средние значения температуры на подошве слоя годовых колебаний изменяются от -2 до -6 °С, мощность сезонноталого слоя от 0,5 м до 1 м [7].



Рисунок 1 – Схема расположения участка исследования

Рассматриваемая территория представляет собой едмную равнину с высотными отметками до 70 метров, склоны междуречий и долин прямые и вогнутые средней и малой крутизны, в районах береговых обрывов – крутые. Долины расположены на высотных отметках до 20 метров. Река Семюелях сильно меандрирует в ящикообразной долине шириной 700 – 800 метров, а река Семюелях-Салаимеет долину шириной до 100 метров, в основном ширина в нижнем течении 70 метров (Рисунок 2).



Рисунок 2 – Модель рельефа драпированная космоснимком Yandex.map в районе нижнего течения р.Семюелях и Семюелях-Сала.

На склонах развиты ложбины стока или делли, часто они не четки, не заметны в рельефе и выражаются через растительность. Они играют существенную роль в формировании рельефа долины и русла небольших рек, в частности Семюелях-Сала (Рисунок 3, а). На рисунке видно, что петли меандров приурочены к выходу деллей и балок к береговой зоне. Это связано с тем, что к этим линейным понижениям в рельефе приурочен в теплый период года временный поверхностный сток и сток надмерзлотных вод, здесь мощность сезонно-талого слоя больше, из процессов идет медленная солифлюкция, редко эрозия. Остальные породы сильно заморожены и трудно размываемы водным потоком малой реки, соответственно его русло вырабатывается таким образом. Для более крупной реки Семюелях данная закономерность не работает, так как энергия их потоков существенна, в том числе тепловая, определяющая термоабразию и термоэрозию (Рисунок 3, б). Меандры врезаются в склон, уносят слагающий высокие террасы грунтовый материал, при этом образуются довольно крутые склоны, осложненные эрозионными рывтинами, обрывами.

Следует отметить, что конфигурация долин и русел устойчиво. Это хорошо видно на космоснимках GoogleEarth (Рисунок 4) разных лет (1985 и 2021 годы). Необходимо

констатировать тот факт, что река сносит грунтового материала, образованного при разрушении берегов в результате абразии и термоабразии многократно больше, чем тот который образовался в результате гидроразмыва, этот объем на этом фоне исчезающе мал. Он так же очень мал по сравнению с объемом материала дноуглубительных работ на реке Индигирке достигающих 1 млн. м³ в год. Также следует отметить, что при добыче мамонтовой кости в реку сносятся грунты естественной природной среды без изменения, те же самые, которые размывают реки региона. Кроме того, высокая льдистость отложений ледового комплекса до 80 – 90 % обуславливает еще меньшее количество грунта, попадающего в реку.



Рисунок 3 – Меандры реки Семюелях-Сала и Семюелях (помечены делли и балки)



Рисунок 4 – Конфигурации русел рек Семюелях и Семюелях-Сала за 1985 и 2021 годы

3. Выводы

Добыча мамонтовой кости методом гидроразмыва не повлияла на едомную равнину, конфигурацию речной сети, долины и русла рек и их прибрежной зоны. Однако образование пустот в виде пещер в дальнейшем при их обрушении, наполнении водой и каких-либо других процессов может вызвать на земной поверхности формирование отрицательных форм рельефа, активизацию термокарста, локальное изменение мерзлотно-гидрогеологических условий, образование просадок. Соответственно необходимы дальнейшие мониторинговые гидрологические, геоэкологические, мерзлотно-геоморфологические исследования.

4. Литература:

- [1] Kuznetsova T. V., Starodubtseva I. A. Mammoths and the history of the geological study of the coast of the Laptev Sea and the Novosibirsk Islands // The Laptev Sea system and adjacent seas of the Arctic: current state and history of development. – М.– Publishing House of Moscow University. – 2009. – pp. 481-500. (translated from English).
- [2] Smirnov A. N., Kirillin N. D., Ivanova Yu. V., Zhurilova M. A. The forgotten mineral of the Russian Arctic — mammoth bone // Arctic: ecology and economics. — 2016. — № 1 (21). – pp. 66-75.(translated from English).
- [3] Potravny I.M., Protopopov A.V., Gassiy V.V. Extraction of mammoth tusks as a type of traditional nature management // Arctic: Ecology and Economics. –2020. – №. 1 (37). – pp. 109-121. (translated from English).
- [4] Smirnov A.N. Fossil mammoth bone: problems and prospects of studying and developing resource potential in the Russian Arctic // Izvestia of the Russian State Pedagogical University named after A.I.Herzen. – 2005. – Vol.5. – №.13. – pp.255-265. (translated from English).

- [5] Kirillin N. D., Nogovitsin R. R. Fossil mammoth bone – a special natural resource // Science and Technology of Yakutia. – 2010. – № 1 (18). – pp. 19-23.(translated from English).
- [6] State Geological map of the USSR scale 1:1000000 (new series). Sheets R-53-(55) – Deputy. An explanatory note. St. Petersburg, –1992. – 105 p. Главное управление геодезии и картографии [7] Permafrost landscapes of Yakutia. Explanatory note to the Permafrost landscape map of the Yakut ASSR on a scale of 1 : 2,500,000 / A.N. Fedorov, T.A. Botulu, S.P. Varlamov, etc. – Novosibirsk. – GUGK. – 1989. – 170 p.(translated from English).
- [8] <https://earth.google.com>

К ВОПРОСАМ ОЦЕНКИ ЗАСОЛЕННОСТИ ПОЧВ И ГРУНТОВ (НА ПРИМЕРЕ ГОРОДСКИХ ПРИОЗЕРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ)

Яна Легостаева¹, Наталья Сивцева² Алена Руfoва²

1 ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

2 ГБУ «Академия Наук РС (Я)», 677007, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 33

METHODOLOGICAL APPROACHES TO SOIL SALINIZATION ISSUES

Yana Legostaeva¹, Natalya Sivtseva² Alena Rufova²

1 Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

2 Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), 33, Lenin str., Yakutsk, 677007, Russia

Abstract. The issues of soil salinization in conditions of urban territories are considered. The lake ecosystems of Yakutsk is object of the study. Five large lakes were selected: Beloe, Khatyn-Yuryakh, Ytyk-Kuel, Sergelyakh and Saysary. The soil cover of lake areas is characterized by a predominantly neutral pH, low content of organic matter, available potassium and phosphorus. The average content of total toxic salts (TTS) reaches 0.11%. The dependencies of specific electrical conductivity, Corg, NaCl and pH on the TTS were established. These connections are regular, but they determine the particular conditions of content and characteristics of the state of soils. As a result of the research, it was established that the predominant type of soil salinization is chloride-sulfate, the degree of salinization is weak or absent.

1. Введение

Засоление почвы – это экологическая проблема, связанная с процессом опустынивания. Во всем мире повышенная засоленность почв составляет примерно 25 %. Почва считается соленой при накоплении более 0,25 % от общей массы грунта [1-2].

Засоление почв в России достигло больших масштабов, по последним данным более 50 млн га. Больше всего соленых почв в Поволжье, Предкавказье, Прикаспийской низменности и на Дальнем Востоке [3-4].

В Якутии насчитывается 518,1 тыс. га засоленных в различной степени земель [5]. На территории Центральной Якутии в условиях резко континентального климата засоление почв имеет ограниченное распространение. Долина Туймаады, где находится территория города Якутск, входит в область континентального соленакопления [6], преобладающий тип засоления почв – содовый и сульфатно-содовый. Засоленных почв много под сухими и настоящими лугами, среди них встречаются пятна солончаков. Интенсивное развитие городских территорий приводит к значительной деградации природных экосистем в городе и пригородной территории, где засоленные грунты широко распространены, однако еще не имеют сплошного площадного распространения. Аномалии солёности отчетливо увязываются с продолжительностью антропогенного воздействия. В среднем глубина распространения засоленных грунтов составляет около 6 м, но в местах существующих или промерзших таликов она достигает 9-10 м [7-8]. Оценка степени и характера засоленности, мониторинг развития процессов засоления в почвах на сегодняшний день очень актуально.

2. Материалы и методика

Комплексные геоэкологические исследования проведены в период с 2021 по 2023 гг. Объектом исследования послужили озера, расположенные в пределах селитебной территории Якутска – Белое, Хатынг-Юрях, Ытык-Кюель, Сергелях и Сайсары, которые имеют природное старичное происхождение, отличаются разной антропогенной нагрузкой в зависимости от местоположения водоема на территории города. В ходе опробования исследовались почвы и

грунты озерных экосистем. Точки отбора проб приведены на рисунке 1. Отбор проб производился согласно общепринятым в почвоведении и геохимии методикам.

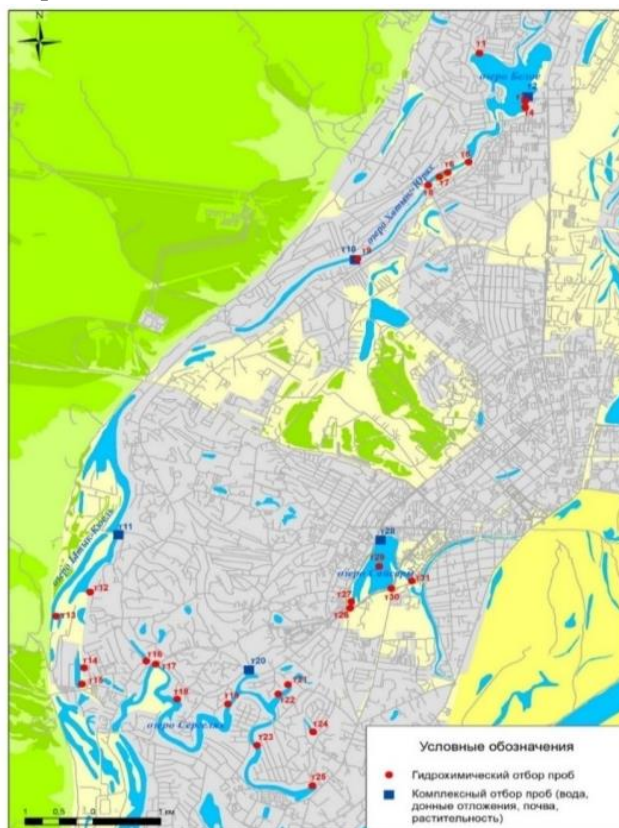


Рисунок 1 – Карта-схема фактического опробования наиболее крупных озер г. Якутск

Химико-аналитические работы проводились в лаборатории металлогении Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН (аналитик Романова А.М.). Использованы методы исследования почвы на основании утвержденных ГОСТов и нормативов с определением основных показателей химического состава водной вытяжки, в том числе pH, удельной электропроводности (УЭП) с определением содержания Сорг, калия и фосфора. Анализ контрольных проб проведен в Центральной геологической лаборатории АО «Якутскгеология» (Росгео, АО) (Сертификат соответствия № СДС «УКАРГЕО»RU 0027.21). Статистическая обработка выполнялась в программах Excel и Statistica 10.

3. Постановка задачи.

Оценка степени засоленности почв и грунтов может быть произведена на основании двух подходов. Первый, применяется в агрохимии и почвоведении для расчета суммы токсичных и не токсичных солей. Второй распространяется на определение степени засоленности глинистых, песчаных и крупнообломочных грунтов (в части их заполнителя) для целей инженерно-геологических изысканий.

Метод расчета **токсичных и нетоксичных солей** основан на связывании ионов в определенной последовательности в гипотетические соли, начиная с менее растворимых солей к более растворимым. В первую очередь связываются карбонаты, затем сульфаты и после этого хлориды. Классификации степени засоления разработаны как на основе общего содержания солей в водной вытяжке, так и на основе содержания токсичных солей. Содержание токсичных солей определяют расчетным способом. При этом исходят из того, что ионы Cl^- , Na^+ , Mg^{2+} , CO_3^{2-} переходят в водные вытяжки при растворении токсичных солей, а ионы HCO_3^- , SO_4^{4-} и Ca^{2+} - при растворении как токсичных (NaHCO_4 , Na_2CO_3 , MgSO_4), так и нетоксичных (гипс, кальцит) солей. Рассчитывается сумма токсичных солей ($\Sigma_{\text{токс}}$). Классификация почв по

содержанию токсичных солей, % к массе почвы приведена по Н.И. Базилевич, Е.И. Панковой, 1970 [9].

Засоленность почв и грунтов ($\Sigma\text{сол}$) заключается в измерении процентного содержания главных ионов и суммировании полученных значений [10]. Метод дает наиболее полное представление о содержании легкорастворимых солей в водной вытяжке из грунтов. Общую минерализацию вытяжки можно представить как сумму содержания ионов

$$\sum(\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+)$$

Цель исследований – оценка и сравнение степени засоленности почв и грунтов разными методами на примере селитебной приозерной зоны г. Якутск. Исходя из этого степень засоления почв приозерных территорий оценивалась по содержанию всех найденных в водной вытяжке ионов ($\Sigma\text{сол}$) и сумме токсичных солей ($\Sigma\text{токс}$).

4. Результаты исследования

Почвы озерных экосистем г. Якутск преимущественно представлены мерзлотными аллювиальными типами почв. По региональной классификации мерзлотных почв Л.Г. Еловской [11] почвы озера Ытык-Кюель характеризуются как мерзлотные черноземно-луговые глееватые, а на приозерных территориях озер Сайсары, Сергелях, Хатынг-Юрях и Белое сформированы мерзлотные аллювиальные песчаные почвы разной степени деградации.

Усредненная характеристика физико-химических свойств почвенного материала представлена в таблице 1. Почвы характеризуются преимущественно нейтральной рН, невысоким содержанием органического вещества, насыщенной подвижными формами калия, в меньшей степени - фосфором.

Таблица 1 – Статистические характеристики основных параметров почвенного состояния озерных экосистем г. Якутск

Показатель	Белое	Хатынг-Юрях	Ытык-Кюель	Сергелях	Сайсары	Среднее, n=15	Max	Min	
рН	6,8	7,49	7,45	7,20	6,79	7,16	8,10	5,90	
$S_{\text{орг}}$, %	0,05	0,79	0,76	1,37	0,26	0,41	7,34	0,03	
K_2O , %	2,65	2,73	2,64	2,26	2,84	2,62	2,84	2,26	
P_2O_5 , %	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,04	0,21	0,01	
Водорастворимый комплекс, ммоль/100 г	HCO_3^-	0,28	0,52	0,75	0,65	0,50	0,54	1,75	0,10
	Cl^-	0,37	0,35	0,70	0,54	0,20	0,39	1,50	0,10
	SO_4^{2-}	0,4	1,65	0,39	1,12	0,47	0,67	2,54	0,07
	Ca^{2+}	0,63	0,57	0,45	0,78	0,52	0,58	2,00	0,25
	Mg^{2+}	0,57	1,12	0,52	0,63	0,45	0,63	2,25	0,25
$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	0,09	0,32	0,40	0,36	0,19	0,24	1,98	0,01	
$\Sigma\text{токс}$, (СТС) %	0,07	0,13	0,13	0,14	0,06	0,11	0,27	0,03	
УЭП, мСм/м	0,15	0,26	0,20	0,26	0,13	0,19	0,70	0,06	
NaCl, г/л	0,09	0,14	0,10	0,14	0,06	0,10	0,39	0,03	
KCl, г/л	0,09	0,69	0,10	0,15	0,07	0,15	13,0	0,04	
NaOH, %	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	
$\Sigma\text{сол}$, %	0,12	0,17	0,16	0,19	0,10	0,15	0,21	0,04	

5. Обсуждение результатов исследований

рН по площадкам исследования варьирует от кислой до щелочной среды (рисунок 2). Так, слабокислой рН характеризуются почвы на берегу озера Белое и Сайсары (рН=6,8; 6,7), нейтральной – на оз. Сергелях (рН=7,2), слабощелочной – на озерах Хатынг-Юрях и Ытык-Кюель (рН=7,9; 7,5). В целом, основная выборка характеризует исследуемые почвы нейтральной реакцией среды.

В водной вытяжке преобладают ионы SO_4^{2-} (0,67 ммоль/100 г) и Ca^{2+} (0,58 ммоль/100 г), наименьшим содержанием характеризуются $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ (0,24 ммоль/100 г). В целом, водорастворимый комплекс почвы представлен: $\text{SO}_4^{2-} > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ + \text{K}^+$.

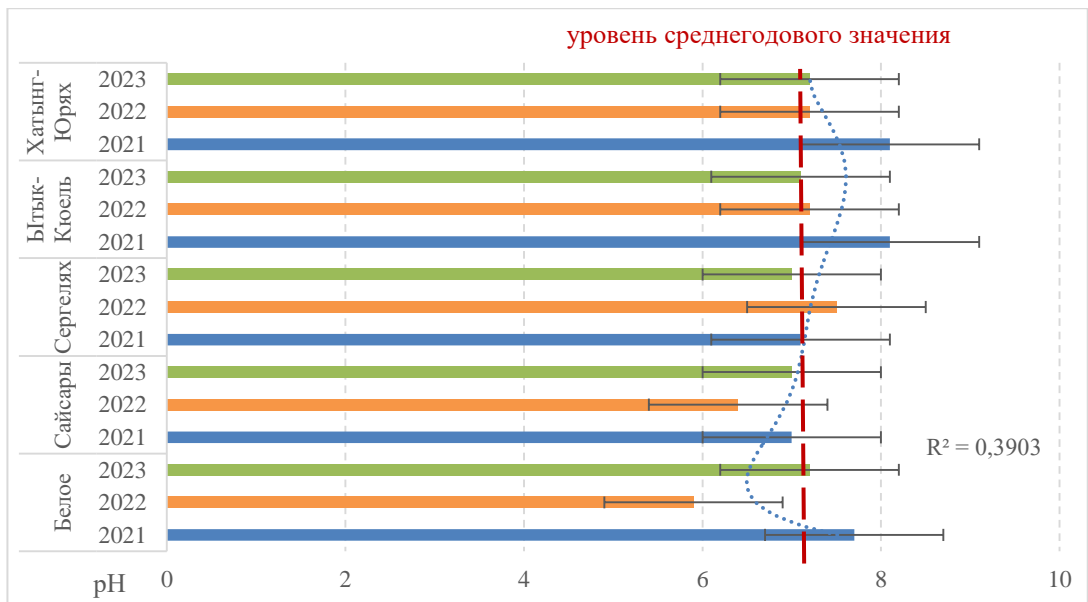


Рисунок 2 – Динамика изменения показателя pH в почвах озерных экосистем г. Якутск

Сумма токсичных солей (СТС) варьирует в пределах от 0,03 до 0,27%, среднее содержание достигает 0,11%. Выявлено неравномерное распределение СТС и засоления по площадкам исследования. Тип засоления в основном хлоридно-сульфатный со слабой степенью или отсутствием засоления.

Проведен анализ зависимости Σ токс, (СТС) от содержания pH, $C_{орг}$, УЭП и NaCl СТС (рисунок 3), выявлены зоны с сильной и умеренной зависимостью. Концентрации, не имеющие связи, показаны как зона выбросов.

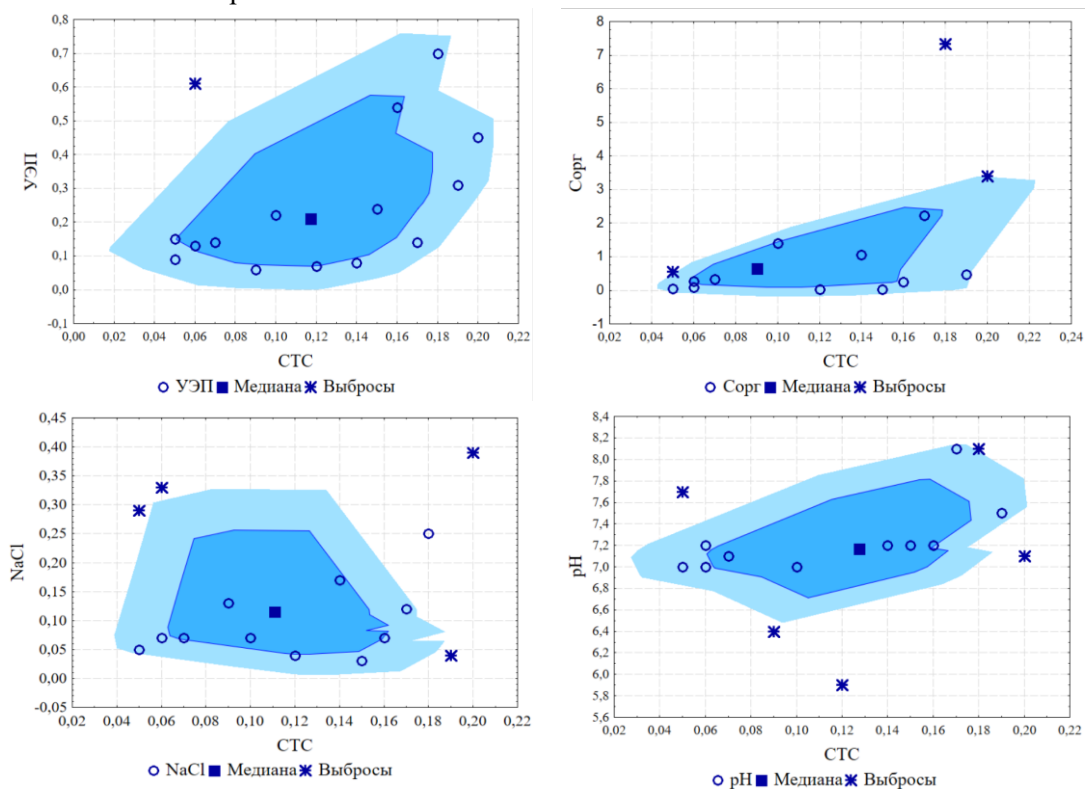


Рисунок 3 – Зависимость некоторых показателей от СТС в почвах озерных экосистем г. Якутск

Оценка зависимостей установила высокую связь в паре УЭП-СТС: распределение между зонами зависимости: сильная – 33,3%, умеренная – 60,0%, выбросы – 6,7%. В целом, общая доля зависимости равна 93,3%, что подтверждает влияние удельной электропроводимости

почвенного материала на вариации суммы токсичных солей в почвах. Выявлено, что увеличение УЭП приводит к увеличению СТС, что закономерно, подтверждаемое линейной зависимостью с достаточно высокой степенью достоверности аппроксимации ($R^2=0,7$).

В паре $C_{орг}$ и СТС выбросы составляют 20,0%, вместе с тем 13,3% выбросов располагаются на границе достоверной зависимости. Из графика видно, чем выше содержание органического вещества, тем больше СТС, что связано высокой сорбционной способностью почвенного органического вещества и преимущественно поверхностным засолением, концентрирующимся в верхних органогенных горизонтах. Между тем зафиксирован пик поддерживаемой связи со стороны $C_{орг}$ равный порядка 3,5%, где именно высокие показатели отмечаются как выбросы.

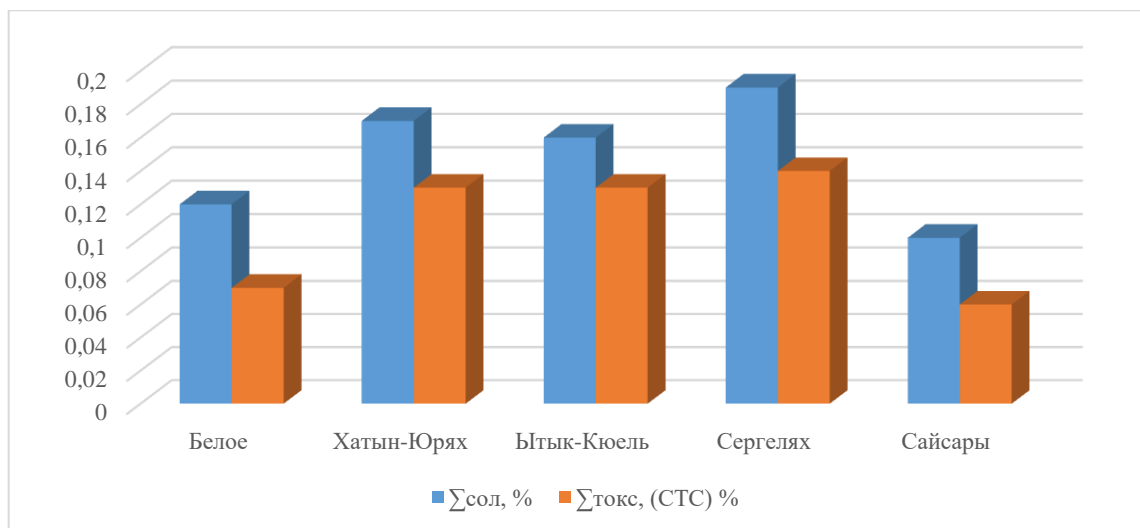
Установлена связь с основным компонентом засоления NaCl с общей долей зависимости 73,33%. Зона зависимости относительно высокая в пределах 0,01 до 0,33 г/л. При этом с увеличением NaCl зона зависимости СТС сокращается, что указывает на преобладание в почвах содержания NaCl до 0,20 г/л.

Зависимость pH от СТС отмечается в слабощелочной и щелочной среде. Однако, чем ниже СТС и чем выше показатель pH, тем больше увеличивается число выбросов. Из всех определенных связей в паре pH-СТС больше всего выбросов (33,3%). Следовательно, сумма токсичных солей увеличивается при слабощелочной среде.

Расчет засоленности почв и грунтов приозерных территорий города Якутска показал среднюю степень засоления ($\Sigma_{сол}=0,15$). Таким образом, определены разночтения в характеристике засоления почв и грунтов:

- по содержанию суммы токсичных солей $\Sigma_{токс}$. характеризуются отсутствием засоления
- по содержанию легкорастворимых солей $\Sigma_{сол}$ – средняя степень засоления.

В целом по всем обследованным площадкам вне зависимости от гранулометрического состава почвенного материала, содержания органики и значений pH сравнительный анализ значений $\Sigma_{сол}$ и $\Sigma_{токс}$ выявил, что содержание токсичных солей варьирует от 58 до 81% от общего количества солей (рисунок 4).



5. Рисунок 4 – Характер распределения и содержания солей по исследованным участкам

6. Выводы

Анализ содержания водной вытяжки грунтов приозерных территорий города Якутска выявил слабощелочную реакцию почвенной среды со средней степенью общего засоления. Токсичные соли составляют в среднем до 70% от общего содержания солей. Оценка степени засоления отличается в зависимости от методики ее определения, согласно ГОСТ 59540-2021 – грунты характеризуются как средnezасоленные, при этом содержание токсичных солей – низкое или отсутствует.

Таким образом, при характеристике процессов засоления почв и грунтов значения $\Sigma_{сол}$ и $\Sigma_{токс}$ не сопоставимы, а дополняют друг друга. На основе полученных данных можно

рекомендовать в инженерно-экологических изысканиях при оценке развития процессов засоления в почвах и грунтах использование двух величин: общее содержание легкорастворимых солей ($\Sigma_{\text{сол}}$) и сумму токсичных солей ($\Sigma_{\text{токс}}$).

6. Благодарности

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ FUFG-2024-007 «Мантейный магматизм, эволюция литосферы и рудоносность восточной части Сибирской платформы, геоэкология недропользования».

7. Литература

- [1] Corwin, D.L. Climate change impacts on soil salinity in agricultural areas // European Journal of Soil Science, 2020, vol.72, no.2, pp. 842-862.
- [2] Thaker, P.N., [Brahmbhatt](#), N., [Shah](#), K. A review: impact of soil salinity on ecological, agricultural and socio- economic concerns // International Journal of Advanced Research, 2022, vol.9, pp. 979-986.
- [3] Prikhodko, I.A., Romanova, A.S., Sergeev, A.E. The problem of soil salinization // Scientific life. 2022, vol. 17, no. 5(125), pp. 676-685.
- [4] Satlygulyeva, G. Causes of salinization of the territory and measures to ensure the process // Bulletin of Science. 2023. T. 1. No. 4 (61). pp. 337-340.
- [5] Makarov, V.N. Ecogeochemistry of Yakutia // Applied environmental problems. Yakutsk: Nauka, 2017. (translated from English).
- [6] Solomonov, N. G., Remigajlo P. A., Desyatkin R. V., Ohlopkov I. M., Isaev A. P., Zaharova V. I. Bioecological problems of a large city in the North (using the example of the city of Yakutsk) // Vestnik SVFU, 2011, vol. 8(4). pp.32-39.
- [7] Sivtseva, N.E., Legostaeva, Ya.B., Shadrina L.P. Experience in restoring disturbed lands in areas of placer diamond deposits in Yakutia // Science and technology in Yakutia, 2022, vol. 2 (43). pp. 90-94. (translated from English).
- [8] Legostaeva, Ya.B., Gololobova, A.G. Analysis of the ecological and geochemical state of the soil cover of residential areas of the Aldan gold-bearing region of Yakutia // Ecology of urban areas, 2021, vol. 1, pp. 47-54.
- [9] Pankova, E.I., Bazilevich, N.I. Accounting for saline soils // Methodological recommendations for reclamation of solonchaks and accounting for saline soils. Kolos M.: 1970, 1-32 pp. (translated from English).
- [10] GOST R 59540-2021 Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya stepeni zasolennosti. M.: Standartinform, 2021. (translated from English).
- [11] Elovskaya, L.G. Classification and diagnostics of frozen soils in Yakutia. Yakutsk : YaF SO AN SSSR, 1987, 171 pp.

**ОСОБЕННОСТИ ТРАНСФОРМАЦИИ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕНИЙ В ПОЧВАХ
РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ЗОН ЯКУТИИ**

Сара Лифшиц, Юлия Глязнецова, Ольга Чалая, Ираида Зуева, Ольга Львова
ФГБУН ФИЦ «ЯНЦ СО РАН» «Институт проблем нефти и газа СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, ул. Петровского, 2

**FEATURES OF OIL POLLUTION TRANSFORMATION IN SOILS OF DIFFERENT
CLIMATIC ZONES OF YAKUTIA**

Sara Lifshits, Yuliya Glyaznetsova, Olga Chalaya, Iraida Zueva, Olga Lvova
Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, 2, Petrovsky str, Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. Transformation processes of oil pollutants in soils under cryolithozone conditions studied insufficiently. The investigation purpose was studying the transformation processes of oil pollution at the oil depots located in various climatic zones of Yakutia. Areas of the oil depots with long-standing contamination (more than 10 years) selected for research. The studies were carried out using the complex of geochemical analysis methods: cold chloroform extraction, IR-spectrometry, liquid adsorption chromatography and gas chromatography-mass spectrometry. It was shown that although a permafrost was spreading in all study areas, oxidative destruction processes of oil pollution proceeded through different mechanisms in soils of different climatic zones. Most likely, this was due to a temperature factor affected the activity of soil microflora and its diversity. The average annual temperature of rocks in Central Yakutia is $-3\div-5^{\circ}\text{C}$, while in the Arctic $-9\div-11^{\circ}\text{C}$. The duration of the frost-free period is 75-90 days and 30-45 days, respectively. Thus, in Central Yakutia (temperate zone with a sharply continental climate), the oxidative destruction processes of hydrocarbons occurred predominantly under influence of hydrocarbon-oxidizing microorganisms while to the Arctic zone – under influence of physicochemical environmental factors, which led to a settlement of oil-polluted Arctic soils by putrefactive and pathogenic microorganisms.

1. Введение

В настоящее время нефтяные углеводороды (УВ) классифицируются как приоритетные загрязнители окружающей среды [1]. Высокое потребление современным обществом углеводородного сырья делает эту проблему еще более актуальной. У специалистов-геологов большой интерес вызывает Арктический регион, где сосредоточены огромные запасы УВ [2]. Тем не менее нефть уже сейчас, до интенсивного вмешательства, является одним из основных загрязнителей в Арктике [3]. Перспективное освоение Арктического региона, преимущественно связанное с добычей УВ, ставит перед научным сообществом необходимость решения экологических задач, направленных на защиту окружающей среды от нефтезагрязнений. Своевременное выявление нефтезагрязнений и разработка методов их ликвидации позволит минимизировать негативные последствия антропогенного воздействия на окружающую среду. В связи с этим перед экологами встает проблема разработки эффективных способов очистки мерзлотных почв от нефтезагрязнений.

Территория РС(Я) расположена в трех климатических зонах: арктической, субарктической и умеренной с резко континентальным климатом [4]. Во всех этих зонах наблюдается распространение многолетнемерзлых пород [5]. Однако глубина сезонно талого слоя, мощность мерзлоты, среднегодовые температуры воздуха и пород существенно различаются для разных климатических зон [6], что, по-видимому, должно отразиться на скоростях и механизме процессов трансформации нефтезагрязнения в почвах. Почвы криолитозоны обладают низкой способностью к самовосстановлению [7], так как деятельность микроорганизмов в основном

сосредоточена в приповерхностных слоях почвы. В северных регионах температура в этих слоях почвы большую часть времени сохраняется отрицательной. Это откладывает свой отпечаток на активность почвенной микрофлоры и способность почв к восстановлению. Процесс самовосстановления растягивается на длительное время.

В настоящее время нефтезагрязнение почв в РС(Я) в основном сосредоточено на объектах нефтегазовых комплексов. Целью данных исследований явилось изучение почв криолитозоны, затронутых техногенным вмешательством, и исследование механизма деструкции нефтяных углеводородов в различных климатических зонах республики. Это важно для разработки биологических способов восстановления мерзлотных почв от нефтезагрязнений и оценки их эффективности.

2. Экспериментальная часть

Объекты и методы исследования

Объектами для исследования явились территории нефтебаз разных климатических зон республики:

- Арктическая зона: Нижнеколымская нефтебаза;
- Субарктическая зона: Батагайская нефтебаза;
- зона умеренного резко-континентального климата: Ленская нефтебаза.

Территории всех нефтебаз находятся в зоне распространения многолетнемерзлых пород [6]. На всех перечисленных нефтебазах изучались участки со старыми сроками нефтезагрязнения: 10 лет и более.

Пробы почв отбирались с глубины 0-10 см чистым инструментом. Для сравнения и изучения природного геохимического фона также отбирались пробы с чистых территорий, находящихся на расстоянии не менее 150 м от места разлива и не затронутых нефтезагрязнением.

Уровень нефтезагрязнения определяли по выходу холодного хлороформенного экстракта (ХЭ). Такой метод определения позволяет не только экстрагировать нефтяные углеводороды, но и изучать продукты их трансформации [8]. Выделенные экстракты изучали методами ИК-Фурье спектроскопии (ИК-Фурье спектрометр Protege 460, фирма Nicolet), жидкостно-адсорбционной хроматографии и хроматомасс-спектрометрии (ГХ/МС) [8].

Все аналитические исследования проводили в трех повторностях. В таблицах полученные результаты представлены в виде средней арифметической величины и ее стандартной ошибки ($M \pm SEM$). Сравнение средних значений выборок проводили методом однофакторного дисперсного анализа (ANOVA). Значимость отличий от контроля определяли, используя критерий Даннета для множественных сравнений при уровне $p < 0.05$. Расчет проводился с помощью пакета AnalystSoft, StatPlus – программа статистического анализа, v.2007.

Результаты эксперимента

Результаты исследований по определению уровня нефтезагрязнения почв и групповому компонентному составу ХЭ приведены в таблице 1. Согласно приведенным данным, уровень нефтезагрязнения в исследуемых пробах почв высокий и очень высокий. Поскольку пробы почв отбирались в местах, характеризующихся давними загрязнениями (10 лет и более), нефтяные УВ уже подверглись окислительной деструкции. Так, в ИК-спектрах ХЭ всех исследуемых почв одновременно присутствуют интенсивные полосы поглощения (п.п.) кислородсодержащих групп и связей: карбонильных 1700 см^{-1} , эфирных 1170 см^{-1} , гидроксильных 3300 см^{-1} (Рисунок 1).

Таблица 1 – Геохимическая характеристика почвенных экстрактов

Климатическая природная зона	Место отбора проб	Выход ХЭ, мг/кг	Групповой состав ХЭ, %		
			Углеводороды	Смолы	Асфальтены
Арктическая зона	Нижнеколымская нефтебаза	34596 ± 1730	$64,90 \pm 3,25$	$15,84 \pm 0,79$	$19,26 \pm 0,96$

Субарктическая зона	Батагайская нефтебаза	57355 ± 2868	62,90 ± 3,15	35,12±1,76	1,98±0,09
Умеренная зона с резко-континентальным климатом	Ленская нефтебаза	126392± 6320	54,69 ± 2,73	37,69±1,89	7,62±0,38

Видно, что окислительная деструкция нефтезагрязнения наиболее активно протекала в умеренной зоне резко континентального климата, менее интенсивно в субарктической зоне и медленнее всего в арктической. Информацию о сроках давности загрязнения почв несут также данные группового компонентного состава. В исследуемых почвах количество УВ составляло всего 55-65% (Таблица 1) в отличие от загрязнений, связанных со свежими разливами нефти, в которых в групповом составе содержание углеводородных компонентов превышает 75 % [8].

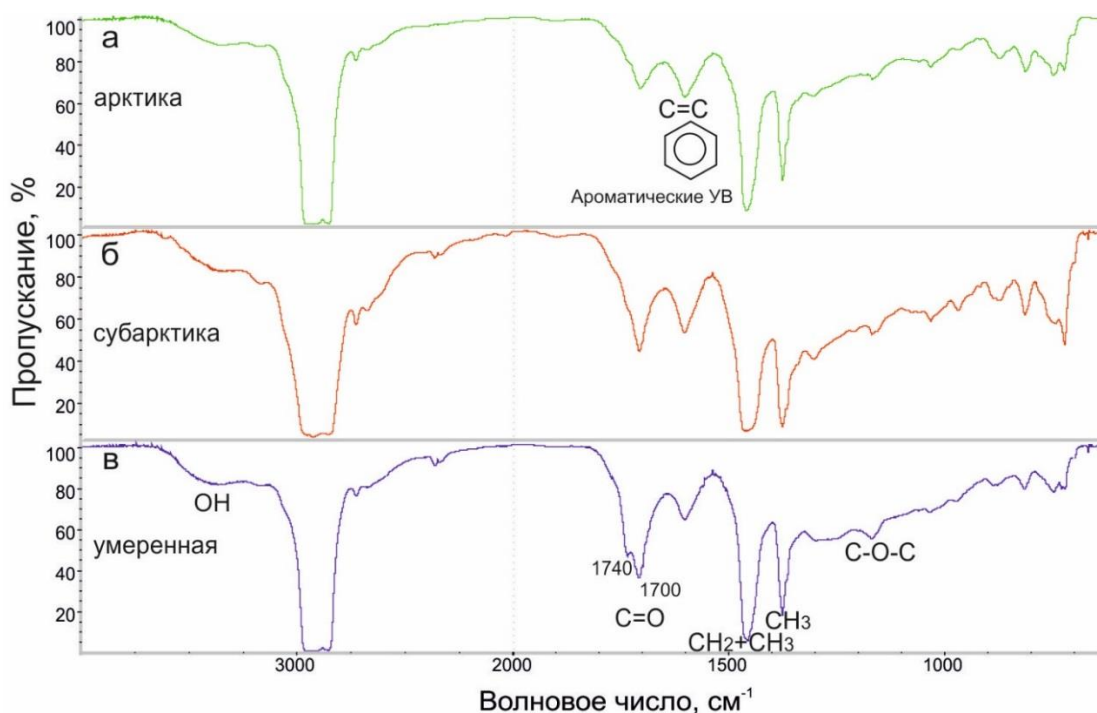


Рисунок 1 – ИК-спектры ХЭ проб почв, отобранных с нефтезагрязненных участков нефтебаз разных климатических зон Якутии: а – Нижнеколымской (арктическая зона), б – Батагайской (субарктическая) и в – Ленской (умеренный резко континентальный климат)

а - Нижнеколымская нефтебаза; б – Батагайская нефтебаза; в – Ленская нефтебаза.

Тем не менее в структурно-групповом составе ХЭ все еще велика доля ароматических структур, п.п. 1600 см⁻¹ (Рисунок 1), характерных для нефти и НП. В чистых почвах компоненты с ароматическими структурами практически отсутствуют. Несмотря на протекающие процессы окислительной деструкции в составе ХЭ почв с нефтебаз все еще велика доля УВ (Таблица 1). Для сравнения в составе чистых почв содержание УВ обычно не превышает 15–28 % [8].

На рисунке 2 представлены масс-хроматограммы углеводородных фракций ХЭ исследуемых почв. Видно, что на всех хроматограммах присутствует так называемый «горб», который характерен для старых загрязнений и обусловлен образующимися в ходе деструкции алкановых УВ высокомолекулярными структурами нафтеново-ароматического строения.

Известно, что нефтезагрязнение может подвергаться процессам окислительной деструкции как под влиянием физико-химических факторов среды, так и микробиологического окисления. Микробиологическое окисление характеризуется избирательностью окисления нефтяных насыщенных УВ углеводородоксилирующими микроорганизмами (УОМ). Первыми в процессы

биодegradации вовлекаются n-алканы, особенно C₁₇ и C₁₈, и затем только изопреноиды. Отношение суммы изопреноидов пристана (Pr) и фитана (Ph) к сумме рядом элюирующихся алканов n-C₁₇ и n-C₁₈ характеризует степень биодegradации углеводородных поллютантов ($K_{\text{биод.}} = (\text{Pr} + \text{Ph}) / (n\text{-C}_{17} + n\text{-C}_{18})$). Из рисунка 2 видно, что на территории Ленской нефтебазы процессы биодegradации углеводородов нефти протекали интенсивно. Трансформации подверглись не только относительно низкомолекулярные n-алканы (n-C₁₇ и n-C₁₈), но и в значительной степени изопреноиды (Pr и Ph). Вследствие этого K_{биод.} уже невелико – 2,46. Следует предположить, что на Батагайской нефтебазе также протекали процессы окислительной биодegradации нефтезагрязнения под влиянием аборигенных УОМ. K_{биод.} значительно превышает единицу и составляет 3,19. На Нижнеколымской нефтебазе распределение индивидуальных УВ все еще сохраняет характер, близкий к таковому в нефтепродуктах (рисунок 2). K_{биод.} для почв этой нефтебазы самый низкий – 1,65. При этом в местах отбора почв новых разливов зафиксировано не было. В составе индивидуальных УВ все еще велико содержание относительно низкомолекулярных n-алканов.

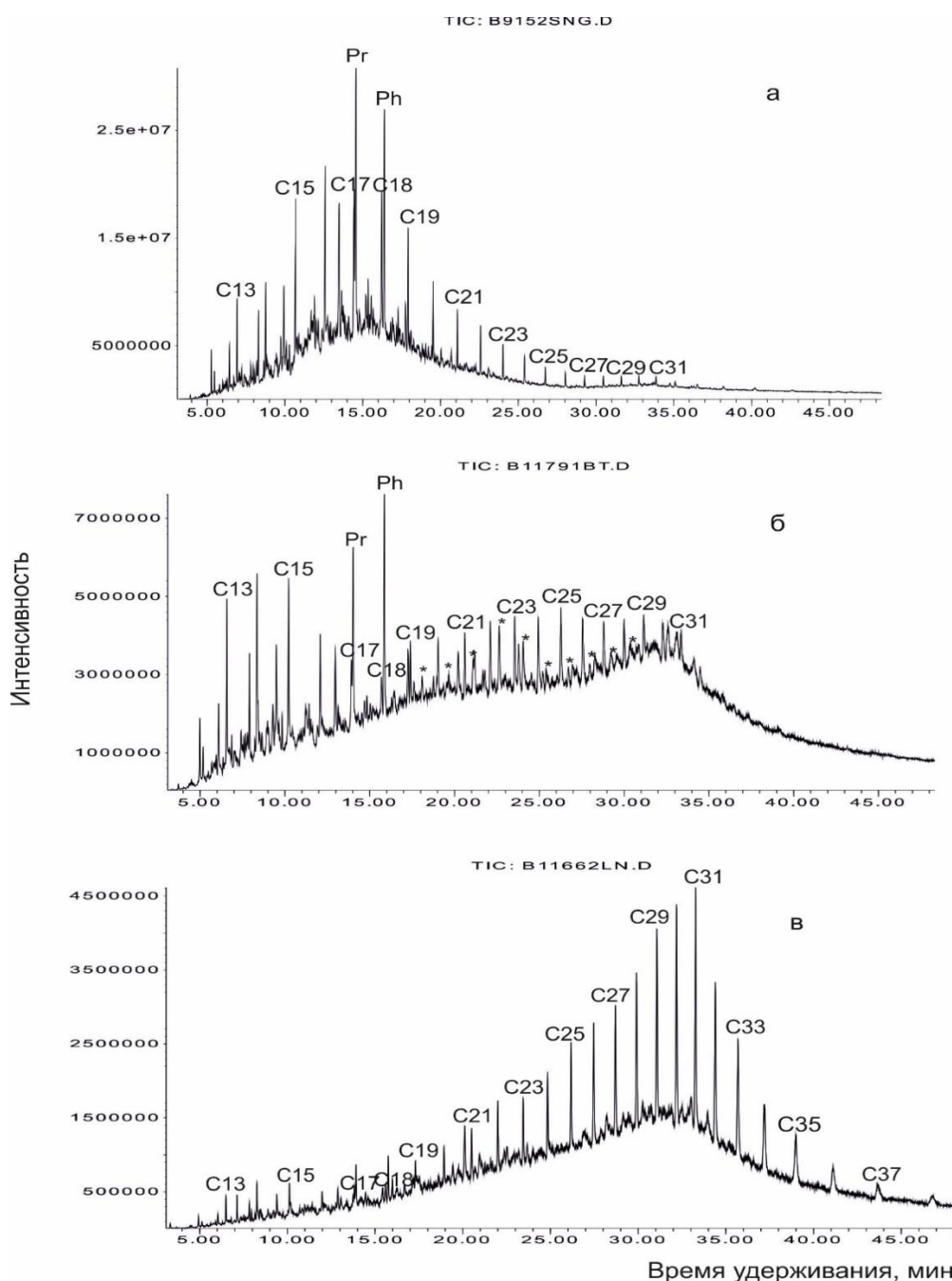


Рисунок 2 – Масс-хроматограммы по общему ионному току (ТIC) углеводородных фракций ХЭ проб почв с территорий нефтебаз: а – Нижнеколымской (арктическая зона), б – Батагайской (субарктическая) и с – Ленской (умеренный резко континентальный климат)
Условные обозначения: $C_{13}...C_{31}$ – n-алканы; Pr – пристан; Ph – фитан

Микробиологические исследования показали, что в пробах почв, отобранных с арктических нефтебаз, УОМ либо не были обнаружены, либо содержание их было крайне мало [9]. Это при том, что питательная среда из углеводородов нефти для них еще не была исчерпана. Вследствие этого можно предположить, что на территории этих объектов окислительная деструкция нефтезагрязнения протекала преимущественно под влиянием физико-химических факторов среды, а не микробиологического окисления. А микробиологическое преобразование нефтезагрязнения (биodeградация) в основном осуществлялось под влиянием гнилостных и патогенных микроорганизмов [9], как конкурентов за доступное органическое вещество. В результате арктические почвы начали обживать гнилостные и патогенные микроорганизмы. Вероятно, механизм биodeградации нефтезагрязнения в почвах криолитозоны в первую очередь зависит от приповерхностной почвенной температуры. Согласно работам [10], температура является главным фактором, влияющим на активность почвенной микрофлоры и ее разнообразие. Так, среднегодовая температура пород в Арктике варьирует в диапазоне $-9...-11^{\circ}\text{C}$, в то время как в Центральной Якутии $-3...-5^{\circ}\text{C}$ [6]. Различается и длительность безморозного периода: в Нижнеколымском районе он составляет 30-45 суток, в Батагайском районе – 67 суток, а в центральной Якутии – 75-90 суток. По-видимому, УОМ менее жизнеспособны в условиях длительного периода отрицательных температур. Численность УОМ в зимний период может катастрофически снижаться и вследствие недостаточного поступления кислорода в замерзшую почву. Вследствие этого численность их невелика в арктических почвах, и биodeградация нефтезагрязнения в этих почвах протекает преимущественно по типу гниения.

3. Выводы

Результаты исследований, проведенных на территориях нефтебаз различных климатических зон РС(Я), показали, что процессы биodeградации нефтезагрязнения протекают в них по разным механизмам. Все изученные территории характеризуются распространением многолетнемерзлых пород, однако различаются по климатическим условиям. Так, Ленская нефтебаза находится в зоне умеренного резко-континентального климата, Батагайская – в зоне субарктического климата, а Нижнеколымская - в зоне Арктики. Короткий безморозный период (30-45 дней), более низкая среднегодовая температура пород ($-9\div-11^{\circ}$) в Арктике в сравнении с Центральной Якутией ($-3\div-5^{\circ}$, продолжительность безморозного периода 75-90 дней), по-видимому, откладывают свой отпечаток на протекание процессов биodeградации нефтезагрязнения. В центральной Якутии (зона умеренного резко-континентального климата) окислительная деструкция УВ осуществляется в основном под влиянием УОМ, а в Арктической зоне - под влиянием физико-химических факторов среды. В результате процессы биodeградации нефтезагрязнения в арктических почвах в основном протекают по типу гниения и техногенно нарушенные нефтезагрязнением почвы Арктики начинают обживать гнилостные и патогенные микроорганизмы. Все это свидетельствует о необходимости разработки эффективных способов восстановления мерзлотных почв от нефтезагрязнений.

4. Благодарности

Работа выполнена в рамках Госзадания Министерства науки и высшего образования РФ №122011200369-1 с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН, грант №13.ЦКП.21.0016.

5. Литература:

- [1] Abbasian F.A., Lockington R., Mallavarapu M., Naidu R. A comprehensive review of aliphatic hydrocarbon biodegradation by bacteria // *Appl. Biochem. Biotechnol*, 2015, vol. 176, pp. 670-699. doi:10.1007/s12010-015-1603-5/
- [2] Carayannis E., Ilinova A., Chanysheva A. Russian arctic offshore oil and gas projects: methodological framework for evaluating their prospects // *J Knowl. Econ*, 2020, vol. 11, pp. 1403–1429. doi:10.1007/s13132-019-00602-7
- [3] Heininen L., Everett K., Padrtova B. and Reissell A. Arctic Policies and Strategies – Analysis, Synthesis, and Trends. Laxenburg, Austria: IIASA, 2020, 263 pp. <https://doi.org/10.22022/AFI/11-2019.16175>
- [4] Scientific and applied reference book on the climate of the USSR. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989, Ser. 3, parts 1-6, no. 24, 607 pp.
- [5] Murav'ev F.A. Geocryological maps and sections: a manual for practical exercises on the course "Fundamentals of lithosphere cryogenesis". Kazan': Kazanskij federal. Univ., 2014, 39 pp.
- [6] Spektor V.B., Shestakova A. A., Torgovkin Ja.I., Spektor V.V. Generalization of data on permafrost on the engineering-geological map of the Republic of Sakha (Yakutia) at a scale of 1:1500000 // *Nauchnyj vestnik*, 2015, no.2(4), pp.59–73.
- [7] Oborin A.A., Khmurchik V.T., Ilarionov S.A., Makarova M.Iu., Nazarov A.V. Oil-contaminated biogeocenoses, Perm: b. i., 2008, 511 pp.
- [8] Glyaznetsova Yu.S., Zueva I.N., Lifshits S.Kh., Chalaya O.N. Oil pollution of soils and bottom sediments in the territory of Yakutia (composition, distribution, transformation). Yakutsk: Akhsaan, 2010, 160 pp.
- [9] Lifshits S., Glyaznetsova Yu., Erofeevskaya L., Chalaya O., Zueva I. Effect of oil pollution on the ecological condition of soils and bottom sediments of the arctic region (Yakutia) // *Environmental Pollution*, 2021, vol. 288, 117680. doi:10.1016/j.envpol.2021.117680
- [10] Chong C.W., Silvaraj S., Supramaniam Y., Snape I., Tan I.K.P. Effect of temperature on bacterial community in petroleum hydrocarbon-contaminated and uncontaminated Antarctic soil // *Polar Biol.*, 2018, v. 41, pp. 1763–1775. <https://doi.org/10.1007/s00300-018-2316-3>.

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ СИТУАЦИЯ В ГОРОДЕ ИРКУТСКЕ, СВЯЗАННАЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОТИВОГОЛОЛЕДНЫХ РЕАГЕНТОВ

Ольга Лопатовская

ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»,
664003, Россия, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1

THE GEOECOLOGICAL SITUATION IN THE CITY OF IRKUTSK RELATED TO THE USE OF DEICING REAGENTS

Olga Lopatovskaya

Irkutsk State University, 1, Karl Marx str., Irkutsk, 664003, Russia

Abstract. The article presents the results of research of soil salinization in the city of Irkutsk. Based on our own observations, we show the effect of de-icing materials on soil and snow in different areas of the city. The salt content in natural objects has been determined. An assessment of the anthropogenic load on soils and other objects is given, and its consequences are shown. It has been shown that the use of deicing reagents affects the environment. It was revealed that the largest areas of saline soils in the city are located near highways. It is determined that the natural soils have changed to saline ones – solonetz and salt marsh soil (solonchak). Soil salinization is sulfate-chloride calcium-sodium. Sulfates, chlorides, sodium, calcium and magnesium were detected in the maximum amount in the snow water.

1. Введение

Геоэкологическая ситуация города Иркутская связана с природно-техногенными и техногенными воздействиями [1-2]. Для борьбы с оледенением дорожного покрытия используют твердые и жидкие противогололедные реагенты (ПГР) – соли, понижающие температуру замерзания воды. В качестве ПГР, обладающих способностью плавить лед в широком диапазоне отрицательных температур, используются хлориды натрия, калия, кальция и магния из месторождений Иркутской области, а также кальций магниальный ацетат и ацетатные материалы. Солевое загрязнение по масштабам и интенсивности многократно превосходит загрязнение тяжелыми металлами и является одной из причин деградации растительности на сельскохозяйственных землях и вдоль автострад. Поэтому целью исследования стало обследование обочин автодорог и прилегающих к ним участков в районах г. Иркутска на содержание солей в снеге и почве для выявления степени и химизма их засоления.

2. Основной раздел

Жидкие ПГР, которыми поливают дороги, представляют собой природные рассолы, добываемые на месторождениях Иркутской области (Жигаловское, Непское, Знаменское и др.). Содержание рассолов из скважины, например, Знаменского месторождения имеет среднюю суммарную минерализацию 503 г/л, плотность – 1,3 кг/дм³, рН – 4,6, содержание хлорида магния около 2 %. Содержание дисперсной фазы в рассоле ~ 0,2 г/дм³. Температура рассола в пласте 36° С. Содержание лития достигает 0,48 г/дм³, брома 10,4 г/дм³. Большинство скважин содержат хлористый натрий, кальций и магний. Рассолы наиболее эффективны, чем сухая подсыпка из песко-соляной смеси, поскольку растворяют снег на дороге, предотвращают появление ледяного наката даже при температурах до -32 °С. Тем не менее, большинство дорог в городе посыпают песко-соляными смесями, которые готовят на территории «Иркутскавтодора» и «Спецавтотранса». «Иркутскавтодор» проводит обработку дорог с 15 октября до 15 апреля. Специалисты за сутки расходуют около 300-350 тонн смеси, состоящей из отсева и поваренной соли. В среднем за зиму используется 53 тонны отсева и около 5 тонн

соли. За зиму реагентами в Иркутске обрабатывают в общей сложности около 800 км дорог. Несмотря на то, что сухие реагенты более чем в два раза дешевле жидких, они имеют множество недостатков. Использование ПГР приводит к резкому увеличению содержания соли в снеге, увеличению минерализации речной воды весной, засолению почв, снижению жизнеспособности растений, способствуют подвижности токсичных металлов. Кроме того, соль выступает в качестве слабого электролита в водных природных объектах [3-5]. Растворы солей разрушают металлические части конструкций подземной инфраструктуры города, днища автомобилей, приводят к химической коррозии, усилению механической суффозии, что обуславливает возможное проседание поверхности. Соли натрия и хлора токсичны для всех компонентов биогеоценозов, приводят к солевому ожогу деревьев, изменению их анатомической, морфологической структуры, отмиранию ткани и блокировке проводящих путей, гибели микроорганизмов, формируются безжизненные полосы на границе с дорогой, ухудшается качество экологических и геологических условий [6-7]. В средне- и крупнодисперсных почвах с более высокими начальными коэффициентами фильтрации миграция продуктов гидролиза ПГР вниз по почвенному разрезу более интенсивна, и они проникают в подпочвенные грунты (в основном юрские песчаники) и грунтовые воды. Средняя минерализация талой воды в г. Иркутске в 1,5-2 раза превышает фоновые значения. Поэтому, даже при сохранении нынешних объемов внесения ПГР можно ожидать ухудшения экологического состояния почв из-за увеличения их засоления [1]. Исследования снега и почвы проводились в нескольких районах г. Иркутска (Рисунок 1).

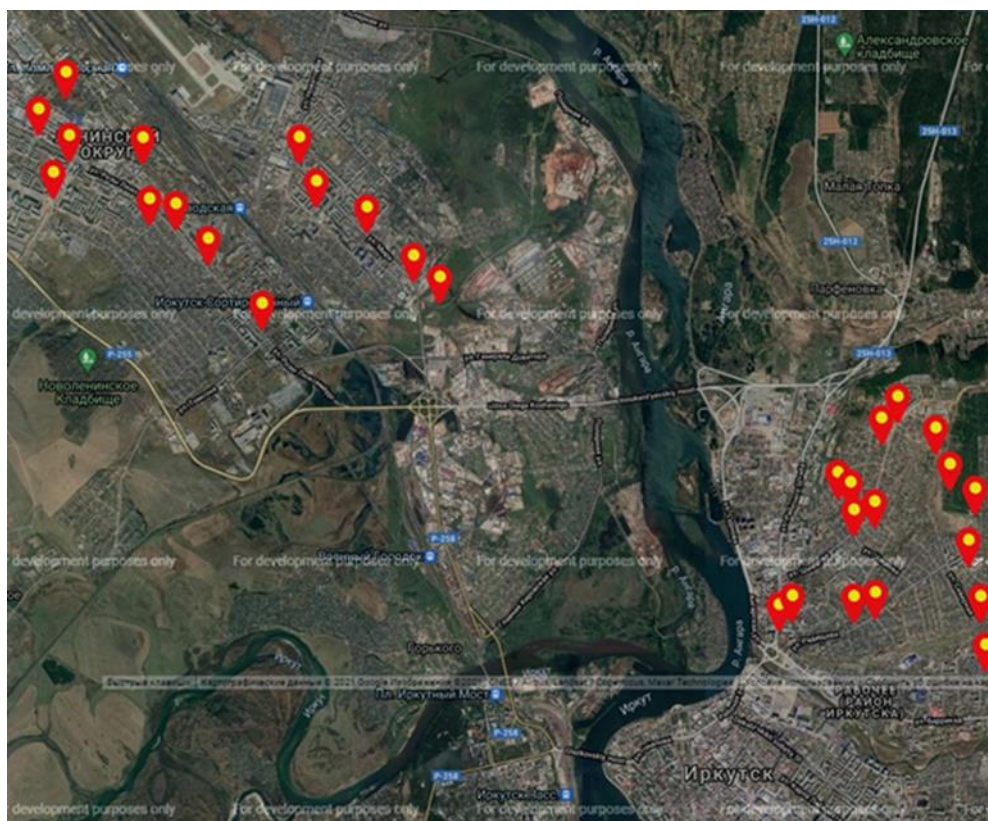


Рисунок 1 – Спутниковый снимок г. Иркутска с указанием точек отбора проб

Естественными для г. Иркутска считаются серые лесные почвы и реже дерново-подзолистые. Внесение ПГР стало причиной формирования засоленных почв – солонцов и солончаков. В настоящее время участки засоленных почв вдоль автодорог представляют собой зону «техногенного галогенеза». Изменяются некоторые показатели почв, происходит ее подщелачивание (рН меняется от 5,5 до 7,6). Подщелачивание почвы приводит к формированию локального щелочного геохимического барьера, на котором происходит осаждение ряда катионогенных тяжелых металлов. По мере увеличения содержания солей и

особенно солей натрия, возрос риск диспергирования агрегатов. Особенно это проявляется в весенний период с конца марта по конец апреля. Рассоление происходит благодаря атмосферным осадкам, которые выпадают в г. Иркутске только с мая месяца. На почвах с ПГР выявлено преимущественно хлоридно-гидрокарбонатное сульфатно-натриевое засоление. После высушивания аликвот из растворов водных вытяжек почв, соли образуют характерные кристаллы солей (Рисунок 2).



Рисунок 2 – Кристаллы солей из водных вытяжек почв

В зависимости от удаленности от центра города и количества внесенного ПГР в широких пределах изменяется минерализация воды (от 0,04 до 20,64 г/дм³). Образцы талого снега имеют в основном нейтральную или слабощелочную реакцию. Среди анионов преобладают гидрокарбонаты и хлориды, среди катионов – кальций, магний и натрий (Таблица 1).

Таблица 1 – Химический состав воды из снега в г. Иркутске (г/ дм³)

Точки отбора проб	Формула Курлова
м-н Юбилейный (без ПГР)	Cl^{-98}
	$M_{0,04} \overline{Na^{+}63Mg^{2+}30}$
середина Иннокентьевского моста	Cl^{-99}
	$M_{20,64} \overline{Na^{+}56Mg^{2+}31Ca^{2+}13}$
берег р. Ангара	Cl^{-94}
	$M_{2,88} \overline{Na^{+}68Mg^{2+}25}$
ул. Байкальская	Cl^{-97}
	$M_{8,68} \overline{Na^{+}73Mg^{2+}21}$
ул. Новаторов	Cl^{-96}
	$M_{7,48} \overline{Na^{+}81Mg^{2+}14}$
ул. Петрова	$Cl^{-82HCO_3^{-}18}$
	$M_{2,15} \overline{Ca^{2+}44Mg^{2+}28Na^{+}28}$
ул. Радищева	$Cl^{-69HCO_3^{-}31}$
	$M_{2,23} \overline{Mg^{2+}47Ca^{2+}35Na^{+}18}$
ул. Петрова	Cl^{-90}
	$M_{4,68} \overline{Mg^{2+}46Ca^{2+}39Na^{+}15}$
ул. Фельдшерская	$Cl^{-76HCO_3^{-}24}$
	$M_{2,66} \overline{Mg^{2+}70Ca^{2+}20}$
ул. Первомайская	$Cl^{-74HCO_3^{-}26}$
	$M_{1,81} \overline{Ca^{2+}64Mg^{2+}24Na^{+}12}$
ул. Щапова	$HCO_3^{-}84Cl^{-}16$
	$M_{2,56} \overline{Mg^{2+}66Ca^{2+}25}$
ул. Дмитрия Донского	$Cl^{-69HCO_3^{-}31}$
	$M_{2,11} \overline{Mg^{2+}64Ca^{2+}16Na^{+}19}$

Для определения микробиологической активности в плане выделения CO_2 , анализировали загрязненные почвы и почвы в парковых зонах. В почвах, отобранных в ноябре, количество CO_2 составляло от 0,8 до 2,1 г/сут., а уже в феврале уменьшалось от 0,01 до 1,2 г/сут. Интенсивность «почвенного дыхания» была выше там, где обработка ПГР не проводилась.

3. Выводы

Таким образом, использование противогололедных реагентов существенно повышает общую минерализацию как снега, так и почвенного раствора. Происходит засоление почв с образованием солончаков. Для предотвращения негативного влияния ПГР необходимо ограничить их использование за счет дозированного применения. Следует ограничить поступление снега с ПГР на почву и растения придорожных территорий, сооружать дренажные каналы для быстрого удаления талой массы. Необходим подбор деревьев и кустарников, способных выдерживать загрязнение и защищать деревья в зимнее время от попадания солей.

4. Литература:

- [1] Akulova V.V. Geocological problems of the city of Irkutsk // News of the Irkutsk State University. Series of Earth Sciences, 2008, vol. 1. pp. 22-32.
- [2] Litvin V. M., Levi K. G. Ecological and geodynamic assessment of the city of Irkutsk // Engineering-geological problems of urbanized territories: materials of the International. Yekaterinburg, 2001, vol. 1. pp. 269-275.
- [3] Aleksandrovskaya E.A., Mazepova V.Ch., Berezhnaya Yu.A. and Rozov Yu.N. The influence of de-icing salts on roadside soils in the area of Pushchino // Ecology of a small town. – Pushchino, 1987. pp. 144-152.
- [4] Ecogeochemistry of urban landscapes / ed. N.S. Kasimova. – M.: Publishing house Mosk. University, 1995. 336 pp.
- [5] Rozhnikova T.V., Lopatovskaya O.G. Chemical composition of de-icing materials // In the book: Modern problems of biology, ecology and soil science. Materials of the International scientific conference. Irkutsk State University, 2019. pp. 313-315.
- [6] Kasimov N.S., Kosheleva N.E., Vlasov D.V. and Terskaya E.V. Geochemistry of snow cover in the Eastern District of Moscow // Vestnik Mosk. un-ta. Ser. 5, geogr., 2012. – Vol. 4. – pp. 14-25.
- [7] Sister V.G., Koretsky V.E. Engineering and environmental protection of the water system of the northern metropolis in winter. M., 2004, 159 pp.

РТУТЬ В ГОРОДСКОЙ АТМОСФЕРЕ

Владимир Макаров

ФГБУН «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН»,
677010, Россия, г. Якутск, Мерзлотная, 36

MERCURY IN THE URBAN ATMOSPHERE

Vladimir Makarov

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36, Permafrost str., Yakutsk, 677010, Russia

Abstract. The geochemical features of mercury migration in the atmosphere of Yakutsk, a large city located in the permafrost zone, are considered. The average Hg content in suspended matter in the city's surface atmosphere ranges from 0.11-0.22 - snow (winter dust) to 13-14 mg/t - summer dust. The total annual intake of Hg from explosives from the atmosphere to the surface is estimated at 11 $\mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{year}$, 99% of which occurs in the warm season. The main sources of Hg entry into the surface atmosphere of Yakutsk are dusting from the soil surface and emissions from energy facilities and vehicles. Hg anomalies near energy facilities that burn natural gas are of low contrast. The occurrence of Hg anomalies in urban soils and soils of the cultural layer has little to do with deposition from the atmosphere and enrichment during the transformation of alluvial deposits.

1. Введение

Эколого-геохимические исследования городов базируются на изучении миграции и концентрации химических элементов и их соединений в природных и техногенных ландшафтах. Одной из наиболее важных задач является обеспечение экологической безопасности селитебных зон. Экологическая опасность загрязнения природной среды городов стала одной из актуальных проблем современности. В настоящее время интенсивно изучается техногенное накопление микро- и макроэлементов в окружающей среде городов [1, 2]. Между тем, практически отсутствуют данные по геохимическим особенностям территории городов, расположенных в криолитозоне.

Среди значительного спектра токсичных химических элементов особый интерес для оценки состояния компонентов окружающей среды и эколого-геохимической обстановки представляет ртуть. Ртуть ее соединения являются высокотоксичными веществами, относятся к веществам 1-го класса гигиенической опасности для человека и биоты, что определяет особую важность проблемы изучения миграции и концентрации Hg в зонах урбанизации.

Цель статьи – выявить особенности миграции и концентрации Hg в атмосфере северного города, расположенного в криолитозоне - Якутска. Изучение распределения Hg в специфических условиях селитебных территорий, где нет специализированных «ртутных» производств, обоснованы высокой экотоксичностью Hg даже в весьма низких концентрациях [3].

2. Материалы и методы

Геохимическая характеристика компонентов окружающей среды получена автором в результате многолетнего наблюдения за химическим составом атмосферных осадков и снежного покрова (1984-2021 гг.).

На территории г. Якутска в 2019-2020 годах изучалось распределение ВВ в летней и зимней (растворимой и твердой фазы снежного покрова) приземной городской атмосфере. Для исследования ВВ летней атмосферы на территории города было установлено 10 пылесборников.

Сбор пыли происходил в период с 17 июля по 15 октября 2019 г. Использовались также данные круглогодичного аэрогеохимического мониторинга на стационаре Института мерзлотоведения

СО РАН «Туймаада» и стационарных наблюдений гидрометеослужбы (ЯУГМС).

Для получения сведений о зимней атмосфере в марте 2020 г. на территории города было отобрано 80 проб снега (рис. 1). Фоновый участок наблюдений находился в районе оз. Чабыда в 25 км к юго-западу от города за пределами зоны техногенного воздействия.

Пробоотбор проводился в оптимальный период для изучения снега, непосредственно перед началом снеготаяния, в течение нескольких дней марта. Пробы снега на точке наблюдений отбирались на площадке 30×30 см (без снятия 1,5 см снега у почвы). Минимальная удалённость от проезжей части составляла не менее 30 м, в большинстве случаев – более 200 м. Для отбора пробы использовали маркированный по 0,5 см стеклянный цилиндр со стальным окаймлением диаметром 82 мм, который опускали с поверхности снежного покрова на плоскую прямоугольную стальную лопатку на высоте 1,5 см от почвы либо у поверхности льда. В каждом пункте выполняли 5–6 измерений толщины снежного покрова. Далее пробу помещали в пластиковый пакет и помещали на электронные весы для определения массы снега и расчета его плотности. Пробы ежедневно поступали в лабораторию Института мерзлотоведения СО РАН, где снег плавился при комнатной температуре. После полного таяния пробу разделяли на твёрдую и жидкую фазы путём фильтрования через бумажные фильтры «синяя лента» с диаметром пор 1 мкм. Данные о количестве и химическом составе ВВ в зимней атмосфере получены при изучении растворимой и твердой фаз снежного покрова.

Масса пыли в снеговой пробе служила основой для определения пылевой нагрузки P_n в $\text{мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$, т.е. количества твердых выпадений за единицу времени на единицу площади [4]. Расчет проводился по формуле: $P_n = P / (S \cdot t)$, где: P – масса пыли в пробе (мг); S – площадь шурфа ($0,0053 \text{ м}^2$); t – время от начала снегостава до отбора проб снега (зимний сезон - 196 суток).

Содержание Hg в атмосферной пыли анализировалось масс-спектральным (X-7, Thermo Elemental, США) методом в Аналитическом сертификационном испытательном центре Института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН.

Определение содержания Hg в природном газе, сжигаемом в одной из котельных города, было выполнено в лаборатории геохимии криолитозоны ИМЗ СО РАН (1991 г.) по методу, разработанному и применяемому для анализа воздуха [5].

Город Якутск, протягивается вдоль левого берега р. Лена на 20 км, в широкой долине Туймаада. Якутск является крупнейшим и старейшим городом, расположенном в пределах сплошной криолитозоны. Город интенсивно развивается, за последние годы численность населения возросла со 195 тыс. человек в 2000 г. до 378 тыс. человек на 01.01.2024 г.

Планировочная структура города радиально-кольцевая. Характер застройки не ровный: на окраинах города — преимущественно одно- и двухэтажные деревянные строения, в центральной части - капитальная застройка каменными зданиями (от 4-5 до 9-16 этажей), в новых микрорайонах 9-16 этажей. В городе насчитывается порядка 160 крупных предприятий, имеющих стационарные источники выбросов в атмосферу, и выбрасывающих ежегодно 11700 тонн загрязняющих веществ, преимущественно оксидов азота – 5,37 и углерода 5,03 тыс. т [6]. Стационарные источники выбросов преимущественно объекты теплоэнергетики: купные электростанции и многочисленные котельные, в основном работающие на газовом топливе, и предприятия стройиндустрии. По данным ГИБДД Якутска, в 2018 г. в столице и пригородах зарегистрировано порядка 119 тысяч единиц автотранспорта, выбрасывающих в атмосферу около 34 тыс. т загрязнителей.

3. Результаты и обсуждение

Современные (голоценовые) аллювиальные отложения в долине р. Лены, представляющие собой почвообразующий субстрат, являются исходным поставщиком продуктов гипергенного выветривания и имеют исключительное значение для формирования современного элювия и почв.

Много или мало Hg в аллювии р. Лены можно оценить, сравнив содержания этого элемента в аллювиальных отложениях с кларком земной коры (КЗК). Результаты сравнительного анализа

показывают, что для аллювиальных песчано-глинистых и песчаных отложений в районе города характерно существенное разубоживание Hg, на уровне 0,4 КЗК (Таблица 1)

Таблица 1 – Концентрация Hg в аллювиальных отложениях (Q_{al}) и кларк земной коры, мг/т.

Q_{al}	КЗК [7]	КЗК [8]	$Q_{al}/КЗК$
28	83	65	0,34-0,43

В геохимических циклах Hg большую роль играет ее атмосферный перенос. Многолетние наблюдения на арктических площадках показывают большую межгодовую изменчивость атмосферной ртути, что подразумевает сильную чувствительность Hg к факторам окружающей среды и, возможно, к изменению климата.

В атмосферном воздухе ртуть находится в газовой и пылеаэрозольной фазах, при этом в условиях техногенеза возрастает количество ртути в составе пылевой составляющей.

Среднее содержание Hg во взвешенных веществах (ВВ) приземной атмосферы Якутска колеблется от 0,11-0,22 - снег (зимняя пыль) до 13-14 мг/т - летняя пыль. Объем выпадения Hg из атмосферы рассчитан с учетом средней концентрации ВВ в атмосфере города и составляет 0,065 мкг/м²·сут в теплое время года и 0,03 x 10⁻³ мкг/м²·сут зимой (Таблица 2).

Таблица 2 – Распределение Hg в атмосферных ВВ и объемы выпадения (Pn) из атмосферы Якутска

$C_{мин}$	$C_{макс}$	$C_{ариф}$	$C_{геом}$	Pn	
мг/т				мкг/м ² ·сут	мкг/м ² сезон
Летние ВВ (14 проб)					
8	20	14	13	0,065	11,0
Зимние ВВ (87 проб)					
0,01	1,96	0,22	0,11	0,03 x 10 ⁻³	5,7 x 10 ⁻³

Суммарное годовое поступления Hg с ВВ из атмосферы на поверхность оценивается приблизительно в 11 мкг/м²·год, 99% которого приходится на теплое время года (169 дней). Эта сопоставимо с данными о величине атмосферного выпадения Hg в Северной Америке - 7–11 мкг/м² год [9]. Даже в пределах аномалий на территории города объем поступления Hg с ВВ из атмосферы не превышает 16-17 мкг/м²·год. Такой объем выпадений не представляет существенной опасности загрязнения почвенного покрова.

Оценка содержания Hg в зимней пыли, показала очень низкие содержания, менее 0,010 мг/т, но достигает 1-3 мг/т вблизи объектов энергетики и в центральной части города (Рисунок 2).

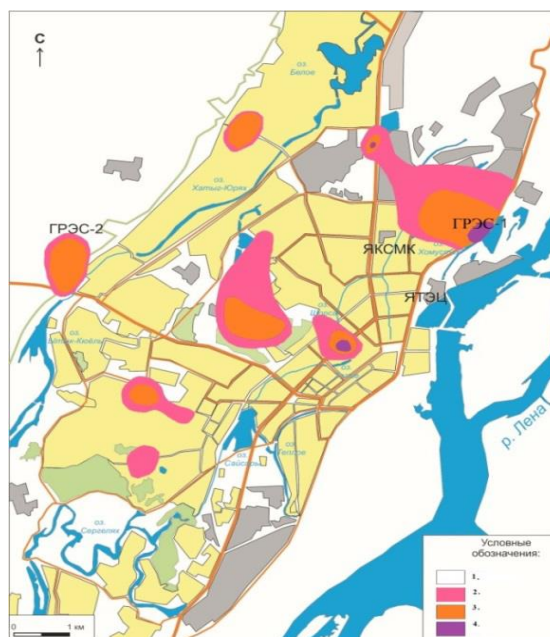


Рисунок 2 – Содержание Hg в зимней пыли (снежном покрове), мг/т
 1 – <0,2; 2 – 0,2-0,5; 3 – 0,5-1,0; 4 – 1,0-3,0.

Уровень превышения содержания Hg в нерастворимой фазе снега над фоновыми значениями – кларк концентрации (КК), по отдельным объектам городской инфраструктуры (транспорт, энергетика, стройиндустрия) и в целом по территории города представлен в Таблице 3.

Таблица 3 – Среднее содержание Hg в зимней пыли (снежном покрове) в районе объектов городской инфраструктуры и кларк концентрации – КК.

Показатели	Город	Дороги	ЯТЭЦ	ГРЭС-1	ГРЭС-2	ДСК	Фон
Hg, мг/т	0,22	0,40	0,07	0,55	0,59	0,098	0,084
КК	2,6	4,8	0,8	6,5	7,0	1,2	1

Максимальный уровень аномальности, по отношению к фону (в 6,5-7,0 раз), наблюдается в районах электростанций ГРЭС-1 и ГРЭС-2, где содержание Hg в зимней пыли в 2,5 раза выше, чем в среднем по городу.

Можно полагать, что возникновение аномалий Hg вблизи данных объектов энергетики, сжигающих природный газ связано с присутствием Hg в топливе. В газовом конденсате и природном газе большинства месторождений Hg присутствует естественным образом. Уровень содержания Hg в природном газе в целом не высок, но объемы добычи и использования газа таковы, что это может привести к значительным объемам выбросов Hg. В газовых месторождениях содержание Hg в газе колеблется от менее 0.1 до 70 мкг/м³, а в конденсате - от менее 65 до 623 мкг/кг (АСАР, 2005). Газ для потребителей содержит обычно очень низкий уровень Hg – около 0,05 мкг/м³ (5×10^{-8} г/м³).

Основной источник природного газа для жителей Якутска – Средневилюйское и Мастахское газоконденсатные месторождения. Поскольку о Hg в углеводородных газах стало известно сравнительно недавно – около 50 лет назад, она не всегда включалась в число компонентов, обязательных для предварительного опробования газовых и газонефтяных месторождений. Сведений о содержании Hg в природном газе и конденсате этих месторождений не найдено. По данным анализов, выполненных в 1991 г. В лаборатории геохимии криолитозоны ИМЗ СО РАН, среднее содержание Hg в природном газе, сжигаемом в одной из котельных города составило $3,4 \times 10^{-8}$ г/м³, при диапазоне определений $1,3-5,4 \times 10^{-8}$ г/м³. Это примерно на два порядка выше фоновых значений для приземной атмосферы Земли [2] и соответствует средней концентрации Hg в углеводородных газах газовых и нефтегазовых месторождений России [10].

В пределах атмосферических аномалий Hg, возникающих в районах объектов энергетики, где Hg поступает в атмосферу в основном в парогазовой форме, не образуются литохимических аномалий в почвах. Концентрация Hg в летней атмосферной пыли и в почвах практически идентичны.

Выпадение Hg с взвешенными веществами из атмосферы на поверхность почвы равно в среднем $0.055 \text{ мкг/м}^2 \cdot \text{сут}$ и не представляет опасности загрязнения почвенного покрова. Об этом свидетельствует и несовпадение контуров атмо- и литохимических аномалий Hg на территории города.

Техногенное поступление Hg в городские почвы и грунты КС практически не связано с выпадением из атмосферы и обогащением при преобразовании аллювиальных отложений, так как содержание в атмосфере невысоко, а в аллювии, на которых сформировался почвенный покров, значительно ниже кларкового. Об этом свидетельствует и отрицательное значение коэффициента аэрозольной концентрации, указывающие на отсутствие обогащения твердой фазе аэрозоля за счет состава исходного литогенного материала.

4. Благодарности

Исследования выполнены при поддержке комплексной программы фундаментальных научных исследований ИМЗ СО РАН (Проект СО РАН АААА-А20-120111690008-9).

5. Литература:

- [1] Urban Ecology (2004) Ed. N.S. Kasimova. M.: Scientific world, 624 p.
- [2] Ivanov V.V. (1997) Ecological geochemistry of elements: Handbook in 6 books: Book. 5: Rare elements / V.V. Ivanov, ed. E.K. Burenkova. – M.: Ecology. 576.
- [3] Ermakov V.V. (2010) Biogenic migration and detoxification of mercury. - Mercury in the biosphere: ecological and geochemical aspects. Proceedings of the International Symposium (Moscow, September 7-9, 2010). – M.: GEOKHI RAS. pp. 8 – 22.
- [4] Methodological recommendations for geochemical assessment of urban contamination with chemical elements. - M.: IMGRE, 1982. 112 p.
- [5] Guide to control of air pollution (1979) Leningrad: Gidrometeoizdat, 449 p.
- [6] State report on the environmental situation in the Republic of Sakha (Yakutia) in 2019: <https://minpriroda.sakha.gov.ru> (access date: 02/15/2023).
- [7] Vinogradov A. P. (1962) Average contents of chemical elements in the main types of igneous rocks of the earth's crust. Geochemistry (7). pp. 555–571.
- [8] Grigoriev N.A. Distribution of chemical elements in the upper part of the continental crust. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2009. 382 p.
- [9] Obrist D., Agnan Y., Jiskra M., Olson C.L., Colegrove D.P., Hueber J., Moore C.W., Sonke J.E., Helmig D. (2017) Tundra uptake of atmospheric elemental mercury drives Arctic mercury pollution. *Nature*. 547(7662), 201. <https://doi.org/10.1038/nature22997>.
- [10] ACAP, (2005) Assessment of Mercury Releases from the Russian Federation. Prepared for the Arctic Council by the Russian Federal service for Environmental, Technological and Atomic Supervision and the Danish Environmental Protection Agency, 344 c.

ОЦЕНКА ДИНАМИКИ НАРУШЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ МАГАДАНСКОЙ ОБЛАСТИ, СВЯЗАННЫХ С ДОБЫЧЕЙ ЗОЛОТА

Ольга Макарьева^{1,2}, Андрей Шихов^{1,3}, Полина Илюшина^{1,4}, Анастасия Землянскова^{1,2}

¹ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет» Институт наук о Земле
199034, Россия, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7–9

² ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет»,
685000, Россия, г. Магадан, ул. Портовая, 13

³ ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»,
614068, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15

⁴ ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова»,
119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, 1

ASSESSMENT OF THE DYNAMICS OF DISTURBED LANDSCAPES OF THE MAGADAN REGION ASSOCIATED WITH GOLD MINING

Olga Makarieva^{1,2}, Andrey Shikhov^{1,3}, Polina Ilyushina^{1,4}, Anastasiia Zemlianskova^{1,2}

¹ Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg State University, 7-9, University nab. St. Petersburg,
199034, Russia

² North-Eastern State University, 13, Portovaya str., Magadan, 685000, Russia

³ Perm State University, 15, Bukireva str., Perm, 614068, Russia

⁴ Lomonosov Moscow State University, 1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

Abstract. Gold mining in alluvial ore deposits is a key industry in the Magadan region. In recent years, the impact of gold mining on river and floodplain ecosystems has increased significantly. This study provides a detailed overview of land cover changes associated with gold mining in the Magadan region in the 21st century. The results indicate a significant increase in the area affected by mining between 2000–2002 and 2022. According to Sentinel-2 images, in 2022 it was 726 km². River runoff is also polluted with suspended solids. Based on Sentinel-2 images, it has been established that the main source of river pollution with suspended solids in the Susumansky and Tenkinsky districts is currently the developed alluvial gold deposits in the floodplain of the Berelekh river. Elevated concentrations of suspended solids in streamflow relative to the background persist all the way to the Kolyma Reservoir (200 km from the source of pollution).

1. Введение

Золотодобыча на рудных и россыпных месторождениях сопровождается значительным воздействием на природную среду, в частности загрязнением рек взвешенными веществами [1; 2] и тяжелыми металлами [3], нарушением земель, в том числе обезлесением и изъятием сельскохозяйственных угодий [4]. В регионах с суровым климатом и сплошным распространением многолетней мерзлоты, к числу которых относится Северо-Восток России, восстановление ландшафтов на нарушенных участках занимает продолжительное время, что усугубляет перечисленные проблемы. Это связано с существенным изменением геокриологических условий нарушенных полигонов, антропогенным изменением таликовых зон и процессов водообмена в долинах рек. Экологическое состояние нарушенных ландшафтов определяется характером проявления криогенных процессов – термокарста, солифлюкции, морозного пучения [5].

Магаданская область занимает первое место в России по добыче россыпного золота [6]. Объем добычи увеличился с 14,5 т. в 2013 г. до 19,8 т. в 2021 г., что ведет к обострению существующих экологических проблем. По объему добычи рудного золота наблюдался еще более значительный рост (в 4.5 раза за 8 лет). С учетом значительной площади нарушенных

земель возрастает необходимость их регулярного спутникового мониторинга, а также оценки восстановления растительного покрова на ранее обработанных участках месторождений.

2. Методы

Анализ динамики нарушенности земель выполнен по многолетнему архиву данных со спутников серии Landsat (сенсоров TM, ETM+, OLI), путем расчета нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI. Из архива были отобраны безоблачные изображения за 2000, 2001, 2009–2011, 2013–2021 гг. уровня обработки Level2 (с выполненной атмосферной коррекцией).

Анализ динамики NDVI позволяет выявить новые участки нарушения земель, связанные с золотодобычей и лишенные растительности, а также проследить процесс зарастания для обработанных участков. В качестве порогового значения при создании маски изменений использовалось значение разности NDVI менее -0.05 .

Для оценки мутности воды и концентрации взвешенных веществ использован модуль The Case 2 Regional Coast Color Processor [7], разработанный для программного пакета ESA SNAP версии 8.0. Алгоритм расчета TSM и других характеристик водной поверхности основан на моделировании переноса излучения. Расчеты выполняются набором нейронных сетей, которые позволяют восстановить количественные характеристики состояния поверхностных вод на основе коэффициентов спектральной яркости водной поверхности, полученных после атмосферной коррекции, и восстановленных коэффициентов поглощения и рассеяния излучения.

3. Результаты

В Магаданской области площадь участков добычи золота по снимкам Landsat-7 ETM+, полученным в 2000–2002 годах, оценивалась в 412 км^2 . По снимкам Sentinel-2, полученным в 2022 году, она увеличилась до 726 км^2 (Рисунок). Сравнивая изображения Sentinel-2, полученные в 2016–2018 и 2022 годах, были обнаружены 720 участков нарушенных ландшафтов, связанных как с новыми шахтами, так и с расширенными горными выработками, где добыча началась в предыдущие годы. Их общая площадь составляет 260 км^2 (35,8% от общей площади воздействия в 2022 г.). Около 82,5% от общего числа горнодобывающих площадей, выявленных по снимкам Sentinel-2 2022 года, и 80,5% новых (при начале добычи в 2016–2018 и 2022 годах) расположены в пределах горнодобывающих отводов.

По обоим группам снимков Landsat и Sentinel-2 выявлено около 156 км^2 территорий, подвергшихся воздействию горных работ. Таким образом, эти территории имеют низкий NDVI ($<0,1$) как в 2000-2002 гг., так и в 2022 г., что свидетельствует об отсутствии восстановления растительного покрова после горных работ в течение как минимум 20 лет.

Пространственное распределение территорий, подвергшихся воздействию горных работ, за последние 20 лет не претерпело существенных изменений. Значительно расширились площади добычи в бассейнах рек Берелех, Дебин и Тенька, где уже давно разрабатываются многочисленные россыпные и рудные месторождения золота. Наблюдаемое увеличение воздействия горнодобывающей промышленности соответствует существенному увеличению добычи золота в Магаданской области за последние 10 лет, особенно на месторождениях рудного золота. Так, добыча рудного золота увеличилась с 6,9 т до 31,78 т, а россыпного – с 14,5 т до 19,65 т в 2013 и 2022 гг. соответственно [6], что привело к существенному увеличению затронутых площадей, особенно связанных с добычей рудного золота. Так, площадь воздействия в бассейне реки Теньки ($S = 1834 \text{ км}^2$) увеличилась почти втрое (18 км^2 в 2000–2002 гг. и 51 км^2 в 2022 г.) за счет активной добычи на крупнейших рудных золоторудных месторождениях «Наталка» и «Павлик».

В результате исследования мутности воды по снимкам Sentinel-2 с применением модуля C2RCC Processor установлено, что основным источником загрязнения рек взвешенными веществами на территории Сусуманского и Тенькинского районов в настоящее время являются

разрабатываемые россыпные месторождения золота в пойме р. Берелёх. Повышенные относительно фона концентрации взвешенных веществ в воде сохраняются вплоть до Колымского водохранилища, т. е. почти на 200 км от источника загрязнения. Расчетные значения TSM в воде ниже источника загрязнения повышаются в 2–16 раз, при этом сезонная изменчивость определяется гидрологическими условиями (мутность уменьшается в период межени и растет при высоких уровнях воды).

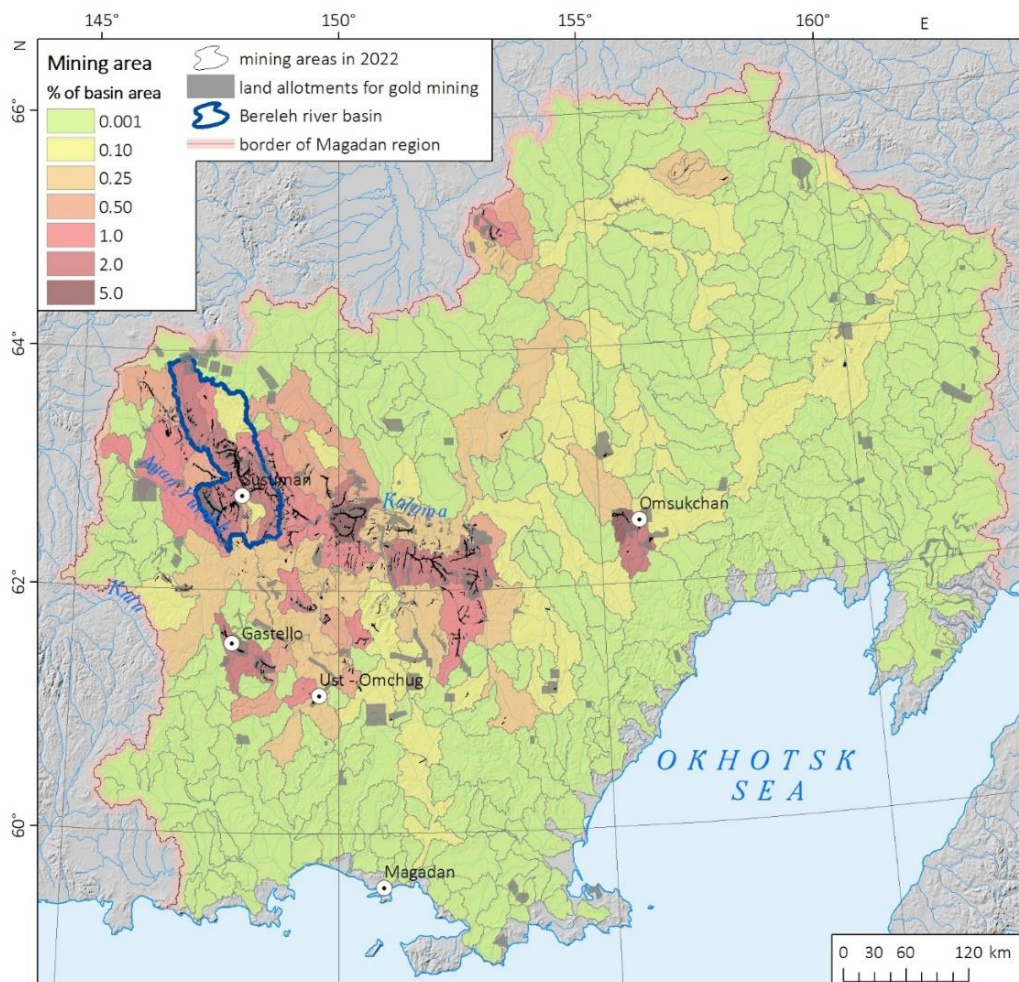


Рисунок – Общая площадь участков добычи по снимкам Landsat, полученным в 2000-2002 гг., рассчитана для крупных речных бассейнов ($S > 200 \text{ km}^2$) Магаданской области. Показан наиболее пострадавший бассейн реки Берелех

4. Заключение

Добыча золота на рудно-россыпных месторождениях является ключевой отраслью промышленности как в Магаданской области, так и в других районах Восточной Сибири и Дальнего Востока России. Суммарная добыча золота в России увеличилась в 1,6 раза с 2011 по 2020 гг. и превысила 300 тонн в год, при этом добыча золота из россыпей выросла с 60,5 тонн в 2011 г. до 82,4 тонн в 2020 г.

В настоящее время в России нет государственной системы мониторинга воздействия золотодобычи на окружающую среду. В Восточной Сибири и на юге Дальнего Востока спутниковый мониторинг проводится волонтерами при поддержке Всемирного фонда дикой природы [8], а инвентаризация затронутых земель завершена только для бассейна реки Амур [9]. Магаданская область, как и другие районы северо-востока России, осталась вне внимания как научных, так и волонтерских проектов в области оценки воздействия золотодобычи, хотя добыча россыпного золота здесь больше, чем в южной части Дальнего Востока России. Кроме того, для Магаданской области характерен субарктический климат и сплошная вечная

мерзлота, что препятствует восстановлению растительности на горнодобывающих объектах [10].

В соответствии с вышеупомянутым увеличением добычи россыпного золота, наши результаты указывают на существенное увеличение площади, затронутой горными работами, в Магаданской области в период с 2000–2002 по 2022 год.

Использованный метод идентификации мест добычи по снимкам Landsat и Sentinel-2 имеет ряд ограничений, которые приводят к недооценке территорий, подвергшихся воздействию. Во-первых, учитываются только территории с полностью уничтоженным растительным покровом. Во-вторых, некоторые затронутые территории могут быть пропущены, если в последние 4–6 лет не велись горнодобывающие работы или они расположены за пределами речных долин и шахтных отводов. В-третьих, значительная часть объектов добычи покрыта рукотворными водоемами, которые исключаются из анализа, поскольку нет очевидных способов отличить их от природных. Таким образом, мы приводим нижнюю границу оценки площади воздействия добычи золота, которая, однако, отражает основные закономерности пространственного распределения воздействия добычи золота и его изменения за последние 20 лет.

Что касается мониторинга загрязнения рек, дальнейшие исследования в этом направлении предполагают проведение полевой верификации полученных оценок TSM, а также выявление значимых источников загрязнения вод в других районах Магаданской области. Отсутствие гидрометрических станций, измеряющих общее содержание взвешенных веществ ниже по течению от мест добычи золота, а также изменения мутности воды, связанные с летними дождевыми паводками, существенно усложняют валидацию спутниковых данных. оценки загрязнения реки. Однако площади, подверженные добыче золота, рассчитанные в контексте речных бассейнов, **мОшибка! Источник ссылки не найден.** могут использоваться в качестве косвенного индикатора для оценки воздействия добычи золота на речные системы и качество воды.

5. Благодарности

Исследование поддержано Санкт-Петербургским государственным университетом в рамках проекта «Комплексная оценка естественных и антропогенных факторов интенсификации водообменных процессов криолитозоны в условиях изменения климата».

6. Литература:

- [1] Чупаченко О.Н. Учебно-методическое пособие по проведению общественного мониторинга загрязнений рек при добыче россыпного золота с использованием космоснимков. М., Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2020. 36 с.
- [2] Gallo Corredor J.A., Lizeth Vargas González G., Velasco Granados M., Gutiérrez L., Pérez E.H. Use of the gray water footprint as an indicator of contamination caused by artisanal mining in Colombia // *Resources Policy*. 2021. V. 73. Art. No. 102197. DOI: 10.1016/j.resourpol.2021.102197.
- [3] Радомская В.И., Радомский С.М. Анализ влияния предприятий золотодобычи на состояние водных ресурсов // *Известия Самарского научного центра РАН*. Т. 16. №1(3). С. 920–923.
- [4] Schueler V., Kuemmerle T., Schröder H. Impacts of surface gold mining on land use systems in Western Ghana // *Ambio*. 2011. V. 40(5). P. 528–539. DOI: 10.1007/s13280-011-0141-9
- [5] Иванов В.В. Геоэкологические особенности освоения месторождений полезных ископаемых Якутии // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2013. № 8-1. С. 59-62
- [6] Добыча золота в Магаданской области. URL: <https://zolotodb.ru/article/11259> (дата обращения 01.03.2022).
- [7] Brockmann C., Doerffer R., Peters M., Stelzer K., Embacher S., Ruescas A. Evolution of the C2RCC neural network for Sentinel 2 and 3 for the retrieval of ocean colour products in normal and extreme optically complex waters. European Space Agency, (Special Publication). 2016. V. 740. P. 54.

- [8] Gao, Bo-Cai NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Rem. Sens. Environ.* 1996, 58(3), 257–266. doi:10.1016/S0034-4257(96)00067-3
- [9] Egidarev, E.G.; Simonov E.A. Assessment of the Environmental Effect of Placer Gold Mining in the Amur River Basin. *Water Resources*, 2015, 42(7), 897–908, doi:10.1134/S0097807815070039.
- [10] Tikhmenev P.E.; Smirnov A.A.; Tikhmenev E.A.; Stanchenko G.V. Anthropogenic dynamics and recovery of disturbed landscapes at the Far East Russia permafrost area. *E3S Web of Conferences* 2020, 169, 03009, 5, doi:10.1051/e3sconf/202016903009.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ РАССОЛОВ В ПРЕДЕЛАХ КАРЬЕРНОГО ПОЛЯ ТРУБКИ «БОТУОБИНСКАЯ»

Евгений Манькин, Федор Санников
Мирнинско-Нюрбинский ГОК АК «АЛРОСА» (ПАО),
678175, Россия, г. Мирный, ул. Молодежный переулок, 6

FEATURES OF THE FORMATION OF NATURAL BRINES WITHIN THE QUARRY FIELD OF THE BOTUOBINSKAYA PIPE

Evgenii Manykin, Fedor Sannikov
Mirninsky-Nyurbinskiy Mining and Ore Processing Plant PJSC «ALROSA»,
3, Molodejnyi pereulok str., Mirny, 678175, Russia

Abstract. The article briefly presents the geological and hydrogeological aspects of the Botuobinskaya kimberlite pipe located at the Nakyn production site. The chemical and filtration characteristics of water from the host sediments are analyzed the features of the geological structure and distribution of groundwater in the region are identified. As a result of the study, hypotheses are put forward regarding the origin of the detected brines and technical solutions have been proposed for efficient development of the deposit, considering hard hydrogeological conditions. These conclusions are important for a deeper understanding of geological processes and optimization of diamond production in this region.

1. Введение

Кимберлитовая трубка Ботуобинская находится в северо-западной части Накынского кимберлитового поля Средне-Мархинского алмазоносного района. Она прорывает карбонатные, терригенно-карбонатные породы ордовика и кембрия, а с поверхности перекрыта 78-110 метровой толщиной мезозойских образований. По длинной оси на уровне эрозионного среза под юрскими отложениями трубка вытянута на 264 м в северо-восточном направлении вдоль зоны рудовмещающего диагонального разлома по азимуту (25°-28°). Юго-западный фланг рудного тела с глубины 200 м находится под вмещающими отложениями ордовика и кембрия.

Территориально относится к зоне Средневилюйского криоартезианского бассейна, характеризующегося залеганием подмерзлотных соленых вод в отложениях нижней юры и рассолов в палеозойских [1].

Изучение фильтрационных характеристик данного объекта в рамках всего Накынского кимберлитового поля является важной задачей, необходимой для полноценной отработки месторождения на всю глубину разведанных запасов.

Глубина отбора проб воды из вмещающих отложений составила 31 и 52 м. Химический состав воды проанализирован количественными традиционными и инструментальными методами.

2. Краткая характеристика геолого-гидрогеологических особенностей кимберлитовой трубки Ботуобинская

Геологические условия изучаемой площади, а именно наличие двух этажей строения (кристаллического фундамента и осадочного чехла) определяются ее нахождением в пределах древнего кратона – Сибирской платформы. Формирование особенностей осадочного чехла на разных этапах развития, тесно коррелируется с развитием таких структур как Вилюйская синеклиза и Анабарская антеклиза. [2] Образования осадочного чехла представлены карбонатно-терригенными, галогенно карбонатными, карбонатными и терригенными осадками палеозоя и мезозоя. Структурные этажи разделены между собой перерывами в осадконакоплении, угловыми и стратиграфическими несогласиями. Магматические

образования пользуются незначительным распространением и представлены силлами долеритов, а также дайками долеритов, выполняющими региональные разломы.

В районе месторождения характерно распространение двух типов подземных вод: надмерзлотных и подмерзлотных. [3]

Надмерзлотные воды (грунтовые воды сезонного талого слоя) широко распространены в районе месторождений. Надмерзлотные воды заключены в четвертичных отложениях сезонно-талого слоя, для которых водоупором является поверхность многолетнемерзлых пород.

Подмерзлотные воды. Подмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс (ПВВК) развит в интервалах глубин ниже абсолютной отметки -150 м. По химическому составу воды относятся к хлоридно-кальциевым рассолам с минерализацией до 368 г/л.

Межмерзлотные воды. Межмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс (МВВК) имеет спорадический характер распространения и в пределах карьера не обнаружен.

3. Основной раздел

Впервые водопоявление в трубке «Ботуобинская» зафиксировано в декабре 2023 года во время бурения разведочных скважин 44/480 на глубине 52м и 58/540 на глубине 31м была вскрыта вода (рисунок 1).

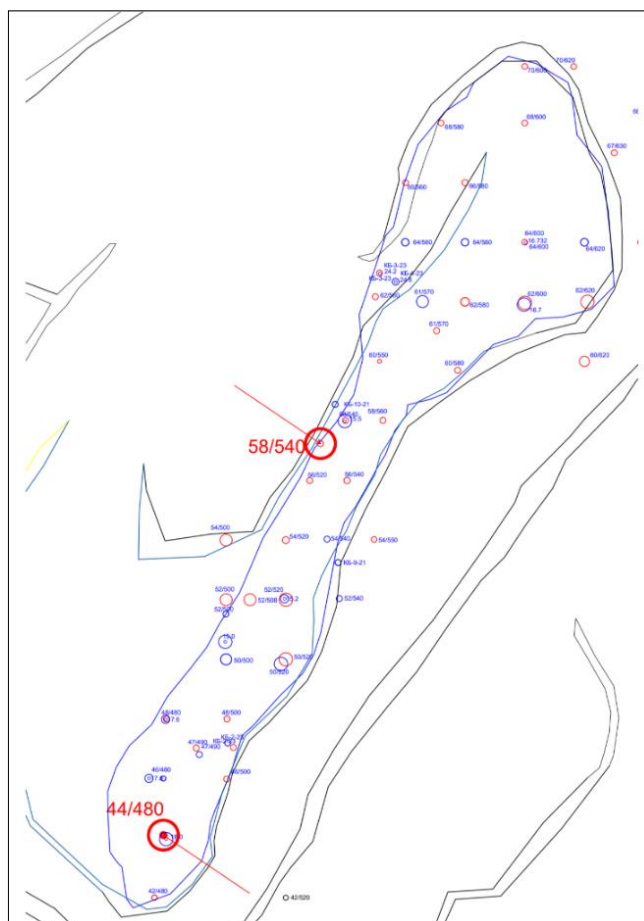


Рисунок 1 – План рудного тела трубки «Ботуобинская»

Расстояния между скважинами составляет около 150м (рисунок 2). Обе скважины находятся в рудном теле. В других скважинах водопоявления не отмечаются. По схеме плоскостей субвертикальных зон нарушений (рисунок 3) [4] в рудном теле нарушений не зафиксировано.

Отобрано 2 пробы для произведения химического анализа с глубины 49,5м в скважине 44/480 и с глубины 40м в скважине 58/540. По результатам произведенного химического анализа вода в обеих пробах хлоридно-кальциевая. В скважине 44/480 минерализация - 248 г/л. В скважине

58/540 минерализация - 131 г/л. В отобранных образцах воды присутствовало большое количество взвешенных веществ.
 За время наблюдений с 14 по 16 декабря 2023г в скважине 44/480 уровень воды поднялся на 1,5м, в скважине 58/540 на 0,6м.

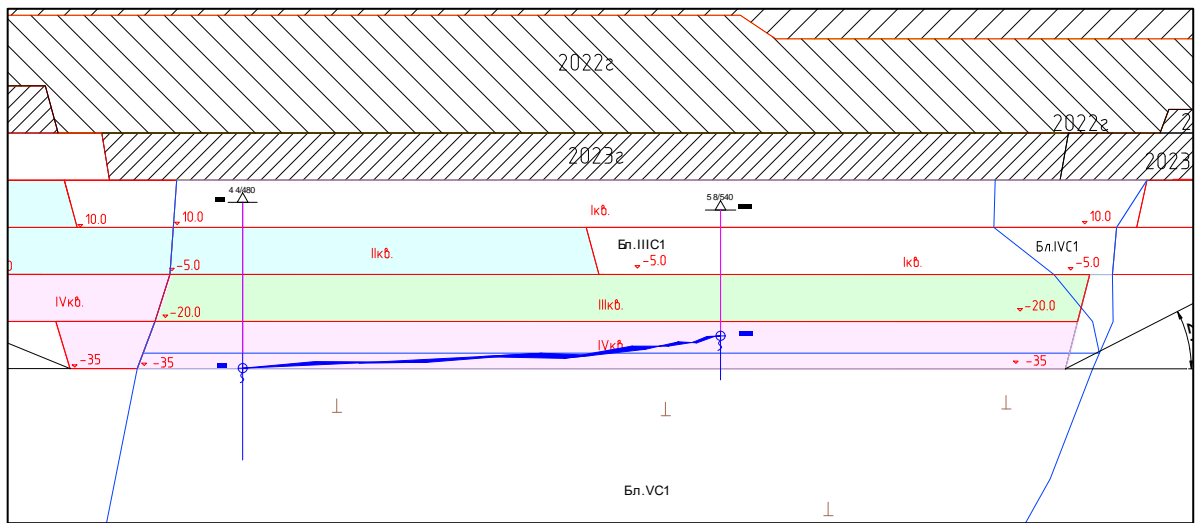
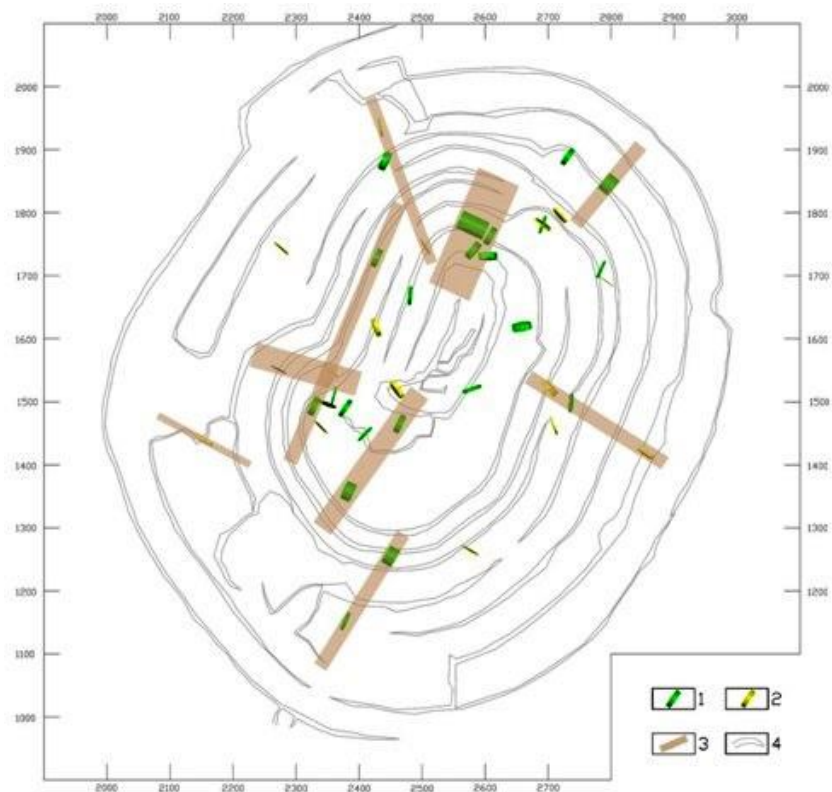


Рисунок 2 – Срез разреза по линии II-II тр. «Ботубинская»



1 – зоны северо-восточной ориентировки; 2 – зоны северо-западной ориентировки; 3 – предполагаемые области влияния разломов; 4 – контуры карьера «Ботубинский»

Рисунок 3 – Трехмерная схема плоскостей субвертикальных зон нарушений, зафиксированных в точках наблюдения на различных горизонтах карьера «Ботубинский»

4. Выводы

- 1) Вскрытые рассолы, на настоящий момент не являются подтверждением наличия в разрезе тр. Ботуобинская межмерзлотного верхнекембрийского водоносного комплекса, а указывают на наличие в рудном теле, а также в зонах эндо- и экзоконтактов преимущественно иммобилизованных линз природных рассолов. Необходимо отметить, что МВБК в пределах Накынского кимберлитового поля характеризуется спорадическим распространением, ограничивающим разломом для него в плане является Ботуобинский разлом. Абсолютные отметки кровли комплекса +161,1 ÷ +92,3 м. Эффективная мощность до 12,7 м.
- 2) Результаты химических анализов проб указывают на высокую степень сходимости с рассолами подмерзлотного верхнекембрийского водоносного комплекса, что в свою очередь позволяет рассматривать два варианта возникновения данных линз:
- а. Вскрытые рассолы являются иммобилизованными рассолами концентрирования;
- б. Формирование зафиксированных рассолов связано с инъецированием и последующей частичной криометоморфизацией из ниже залегающего подмерзлотного верхнекембрийского водоносного комплекса. Данное предположение дополнительно подтверждается гидродинамическими параметрами ПВБК (абс. отм. пьезометрической поверхности и др.), что позволяет его рассматривать в качестве приоритетного.
- 3) В блоках, где были вскрыты рассолы ожидаются незначительные водопроявления при их отработке. Характер водопроявлений может представлять из себя капельное или низкодебетное струйное выделение рассолов (до 10 м³/сут) или одномоментное вскрытие линзы в объеме 200-500 м³. Рассматриваемые объемы рассолов будут вывезены вместе с рудой на обогатительный передел, и на данный момент времени не требуют отдельных технических решений.

5. Литература:

- [1] Shepelev, V.V., Tolstikhin, O.N., Piguzova, V.M. and others. Permafrost-hydrogeological conditions of Eastern Siberia. Novosibirsk: Nauka, 1984. P. 87.
- [2] Yannikov A.M., Zyryanov I.V., Korepanov A.Yu. Cryohydrogeological conditions as a key factor in the design of drainage systems using the example of kimberlite pipes in Western Yakutia // Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal). 2023. No. 5. P. 112-129.
- [3] Yannikov A.M., Ilkov A.T. Formation of brine-absorbing reservoirs in the permafrost layer, using the example of the Botuobinsky site (Republic of Sakha (Yakutia)) // "Geology and Subsoil Use" ESOEN. Moscow. 2021. No. 4. pp. 64-73.
- [4] Yannikov A.M. The influence of structural-tectonic factors on the formation of cryohydrogeological conditions of the Nakyn kimberlite field // Materials of the VI International Scientific Conference dedicated to the 50th anniversary of the Geological Institute named after. N. L. Dobretsova SB RAS geodynamics and minerageny of northern Eurasia. Ulan-Ude. 2023. pp. 609-612.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА МИГРАЦИЮ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Стелла Маркова, Владимир Макаров
ФГБУН «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН»,
677010, Россия, г. Якутск, Мерзлотная, 36

INFLUENCE OF SNOW COVER TEMPERATURE ON THE MIGRATION OF CHEMICAL ELEMENTS

Stella Markova, Vladimir Makarov
Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36, Permafrost str., Yakutsk, 677010, Russia

Abstract. The article analyzes the results of geochemical monitoring of snow cover at the geocryological station "Tuymaada". The temperature characteristics of the snow cover on the soil and surface and the migration of chemical elements in winter were studied. The features of the formation of the chemical composition of the snow cover due to the upward migration of chemical elements from the soil surface are considered.

Keywords: snow cover, monitoring, temperature, geochemistry.

1. Введение

Изучению химического состава снежного покрова природных и техногенных ландшафтов Якутии посвящен ряд работ (Макаров, 2014; Макаров и др., 1990). Особый интерес представляют мониторинговые исследования, которые проводятся на Центрально-Якутском комплексном геокриологическом стационаре «Туймаада» (КГСТ). Стационар располагается в Центральной Якутии, на надпойменной террасе р. Лены в пригородной юго-западной части г. Якутска и представляет собой почти горизонтальную поверхность с альтитудой около 110 м (Рисунок 1).

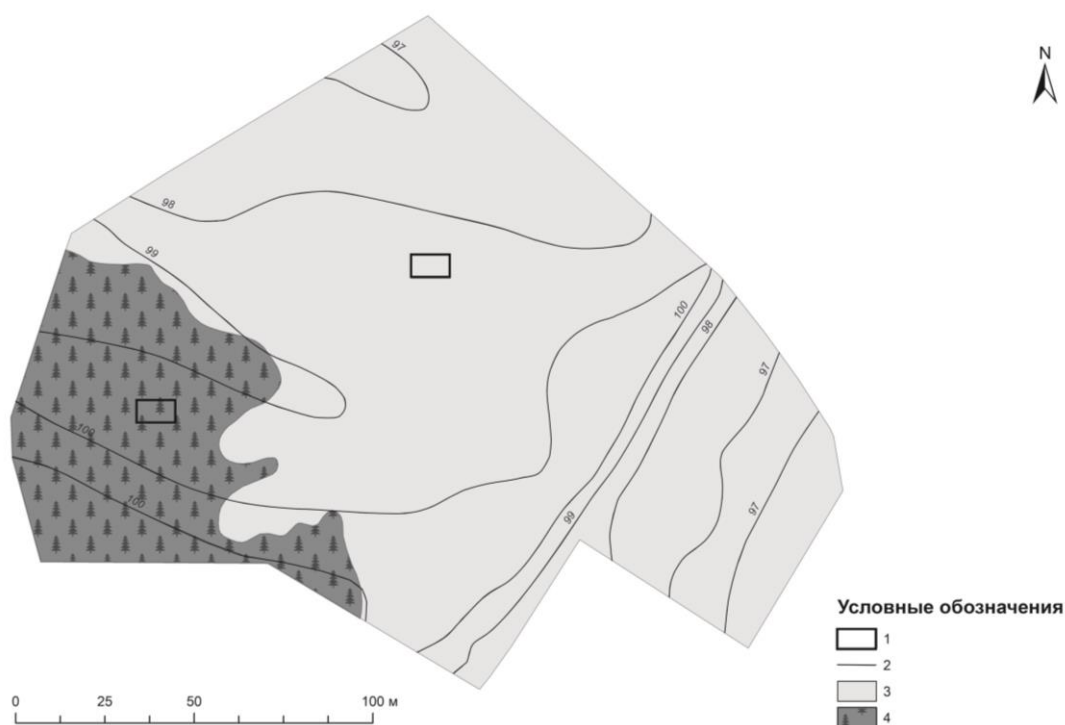


Рисунок 1 – Комплексный геокриологический стационар «Туймаада» (КГСТ)
1 - площадка наблюдений; 2 – горизонтали 3 – луг; 4 - сосновый лес

2. Основная часть

На территории КГСТ проведен мониторинг физических характеристик и химического состава снежного покрова в период с октября 2017 г. по апрель 2018 г. Пробы снега отбирались на ровной луговой площадке размерами 6х6 м, в центральной части КГСТ. Интервал отбора проб составлял 10 дней, а во второй половине апреля 3 дня. В пункте наблюдений измерялась высота и плотность снега, температура приземного воздуха и снега на поверхности и на почве. Пробы снега отбирались с помощью снегорезчика на всю глубину снежного покрова. Химический анализ снеговой воды выполнен в лаборатории подземных вод и геохимии криолитозоны ИМЗ СО РАН (аналитики Л.Ю.Бойцова, С.А. Потапова и О.В.Шепелева). В образцах снега определялось содержание макрокомпонентов: SO_4^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} ; микроэлементов – Cs, Li, Sr, Ba, F, P; измерялась величина pH, Eh и электропроводности.

Высота снежного покрова невелика – 24–25 см, и оставалась относительно постоянной с 29 января до 30 марта.

Характерная особенность снежного покрова на участке мониторинга – небольшая плотность 0,087–0,170 г/см³. Снег выпадает очень сухой и мало уплотняется в течение зимы.

Зима в период наблюдений малоснежная, 2/3 зимнего времени без осадков, а всего выпало около 64 мм осадков. Сравнительно обильные снегопады наблюдались в 2017 г.: 8-20 октября – 5,8 мм, 7-12 ноября – 3,8 мм; 2018 г.: 10-16 января – 4,6 мм и 29 марта-3 апреля – 14,3 мм (рисунок 2).

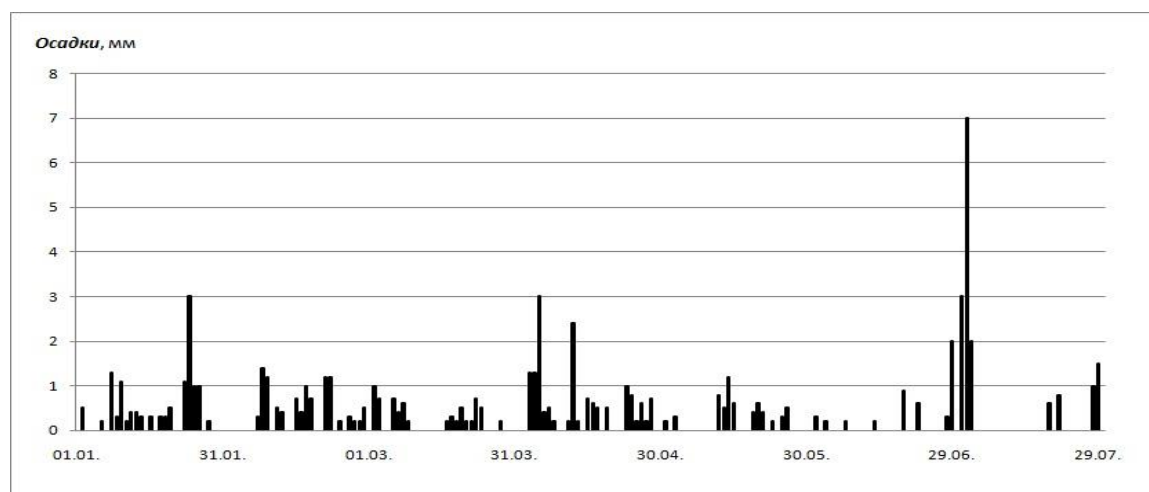


Рисунок 2 – Объем атмосферных осадков

В период наблюдений температура воздуха изменялась в диапазоне от минимальной – 42,9 (20.12.17) до +7,3°C (23.04.18). Температура снега колебалась: на поверхности снежного покрова от -42,1 (10.01.18), до +2,6°C (23.04.18); , на подошве снежного покрова была значительно выше от минимальной -28,7°C (01.03.18)

В конце осени-начале зимы наблюдалось постепенное понижение температуры воздуха и снежного покрова почти до конца ноября когда температура воздуха опустилась до -22 °С, а температура снега была равной на поверхности и на почве -40 °С (Рисунок 3).

Кратковременные зимние периоды потепления, затронувшие атмосферу и верхнюю часть снега, наблюдались 9 и 29 декабря, 18 января и 7 февраля. Эти положительные термальные аномалии слабо отразились на повышении температуры на подошве снежного покрова в январе и привели к существенному повышению до -21 °С в феврале. Температура снега на подошве снежного покрова в период мониторинга была несколько выше, чем на поверхности – в диапазоне от – 28,7°C (01.03.18) до -0,6°C (23.04.18).

С конца февраля (27.02.18) когда температура воздуха и снега оказалась равной $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, началось непрерывное равномерное повышение температуры воздуха и снега, с ежедневным трендом около $+0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, продолжавшееся вплоть до таяния снега.

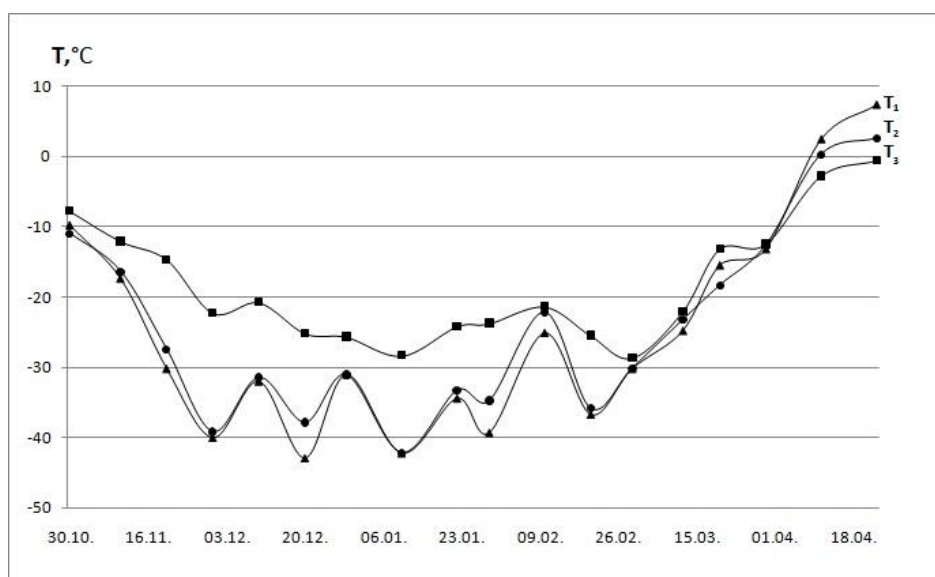


Рисунок 3 – Динамика температуры воздуха и снежного покрова (T₁ – на почве, T₂ – на поверхности, T₃ – воздух)

Первое потепление с переходом температуры воздуха выше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдалось 6 – 7 апреля, когда температура воздуха повысилась до $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Постоянное потепление с переходом температуры воздуха в дневное время выше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (с 10 часов утра) установилось с 7 апреля, а в течение суток с 16 апреля. Разница температур на поверхности – подошве снежного покрова в начале зимнего периода была $3,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (30.10.17), достигла максимальных значений в конце ноября – около $17\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в конце наблюдений равнялась $3,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (23.04.18).

По химическому составу снеговая вода в период мониторинга оставалась постоянно гидрокарбонатно-кальциевой ультрапресной, с диапазоном изменения минерализации в пределах одного порядка $12,8\text{--}28,2\text{ мг/л}$, в среднем около 21 мг/л . Динамика минерализации и температуры снежного покрова показана на рис. 4.

Повышение минерализации снежного покрова обусловлено количеством осадков (ноябрь, январь, апрель) и повышением температуры системы субстрат-снег во время февральской и апрельской оттепели. Когда за 20 дней февраля минерализация снега возросла с 17 до 28 мг/л, а в конце марта–начале апреля на 4 мг/л, при практическом отсутствии поступления из атмосферы (см. Рисунок 2).

Наблюдается зависимость поступления ряда ионов (F^- , NO_2^- , HCO_3^- , Cl^-) в напчвенные слои снега от температуры (Рисунок 5). Наиболее активно на зимнюю температурную аномалию системы субстрат-снег реагируют повышением концентрации (в скобках возрастание в раз):



3. Результаты исследований

Многолетними исследованиями физико-химических закономерностей миграции химических элементов в мерзлых системах проведенными в ИМЗ СО РАН установлены процессы миграции ионов в жидкоподобной пленке в мерзлотных системах (Федосеева, 2003). Химические элементы мигрируют в нижнюю часть снежного покрова по жидкоподобной пленке, существующей на границе частиц грунта и на поверхности кристаллов снега. При этом интенсивность миграции зависит от температуры грунта и снежного покрова. В нашем случае миграция фиксируется при температуре $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$. Толщина жидкоподобной пленки и миграционная активность ионов снижаются с понижением температуры. Даже небольшое

понижение температуры приводит к существенному уменьшению коэффициента диффузии. Так, величина коэффициента диффузии Sr, при понижении температуры всего на два градуса, снижается почти на порядок - с $(1,6-4,2) \cdot 10^{-8}$ при температуре мерзлых пород -2°C до $(0,1-0,8) \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{сек}$ при температуре -4°C [2].

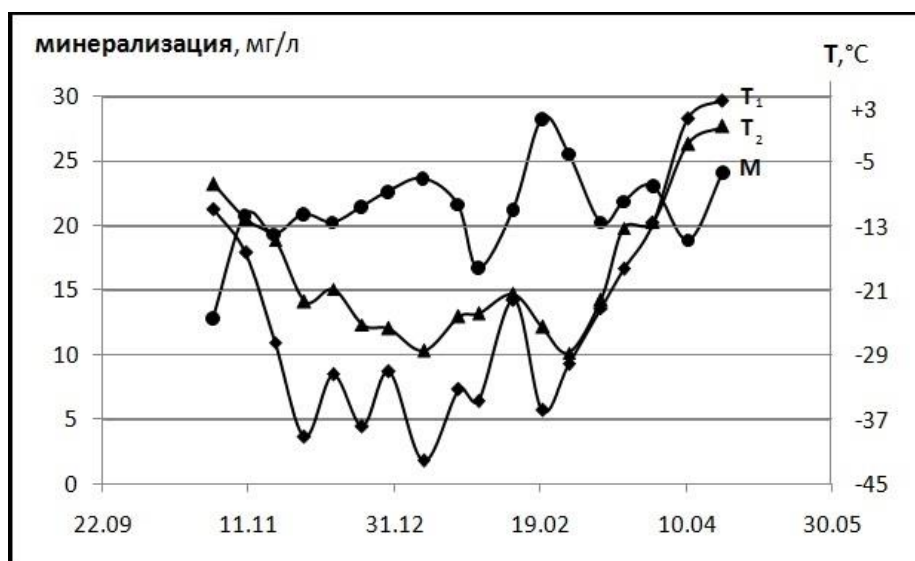


Рисунок 4 – Динамика минерализации (M) и температуры снежного покрова

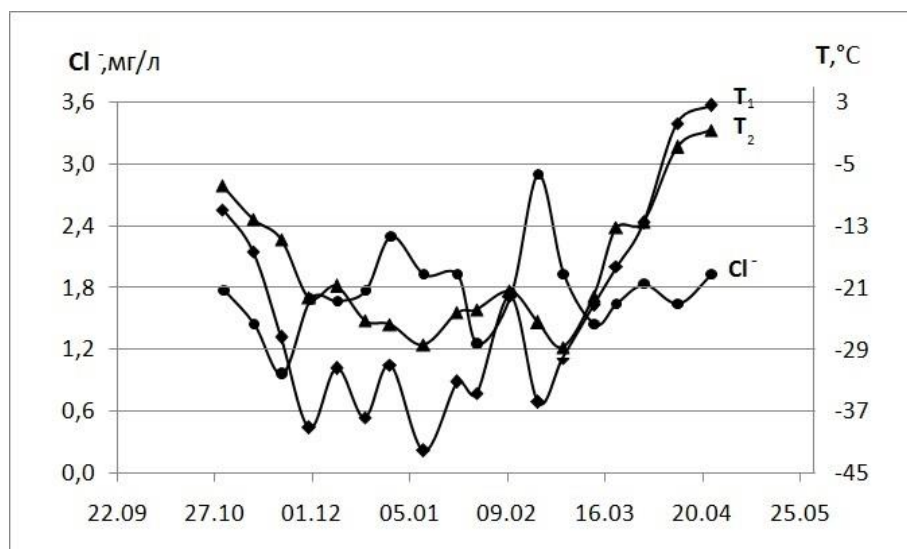


Рисунок 5 – Динамика содержания Cl⁻ в снежном покрове и температуры снега

Можно полагать, что наблюдаемое интенсивное повышение концентрации ряда ионов в подошвенной части снежного профиля при существующем значении температуры снега, обусловлено уменьшением величины коэффициента диффузии в грунтах.

4. Литература:

- [1] Макаров В.Н. Геохимия снежного покрова таёжных и горных мерзлотных ландшафтов Якутии // Лед и снег. 2014. №1 (125). С. 73-80
- [2] Макаров В.Н., Федосеев Н.Ф., Федосеева В.И. Геохимия снежного покрова Якутии. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО А СССР, 1990. - 152 с.
- [3] Федосеева В.И. Физико-химические закономерности миграции химических элементов в мерзлых грунтах и снеге / В.И. Федосеева. - Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения СО РАН, 2003. – 140 с.

ИЗМЕНЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В МЕЖМЕРЗЛОТНЫХ ВОДАХ

Василина Менкярова, Алексей Сивцев, Иван Рудых

ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова»,
677000, Россия, г. Якутск, ул. Белинского, 58

PRESSURE CHANGES IN PERMAFROST WATERS

Vasilina Menkyarova, Alexey Sivtsev, Ivan Rudykh

North-Eastern Federal University, 58, Belinsky str., Yakutsk, 677000, Russia

Abstract. It is noted the need to study the features of the oil and gas content of the upper part of the section in the area of influence of perennial weathered rocks (MMP). The geological description and conceptual model of formation of the Upper Chimidikaen oil phenomenon in the zone of influence of perennial German rocks are given. The characteristic of interpermafrost groundwater type of the Bestyakh terrace r. Lena is given. On the basis of literary data and in situ observations, a mechanism for changing the pressure of inter-permafrost waters is proposed. It is concluded that the presence of oily formations in the frozen zone indicates the proximity of the oil source in the lower part of the cut.

1. Введение

Верхняя часть разреза востока Сибирской платформы в условиях повсеместного развития многолетнемерзлых пород (400-600 м) зачастую при оценке перспектив потенциальной нефтегазоносности принимается как бесперспективная. Однако зафиксированные многочисленные поверхностные и приповерхностные нефтепроявления, прямые признаки нефтеносности в колонковых скважинах [8], получение жидкой нефти и существование межмерзлотных водоносных горизонтов в зоне развития многолетнемерзлых пород (ММП), как минимум оставляют место для неоднозначной оценки их перспектив. Кроме того, близповерхностные нефтегазопроявления можно рассматривать, как прямой признак наличия залежей нефти в более глубокозалегающих горизонтах.

2. Основная часть

На водоразделе истоков рек Чимидикээн (левый приток р. Тюнг) и Мунакан (правый приток р. Муна), в области сочленения Вилюйской синеклизы с юго-западным склоном Анабарской антеклизы было обнаружено «Верхнечимидикээнское» нефтепроявление (Рисунок 1).



● - расположение Верхнечимидикээнского нефтепроявления

Рисунок 1 – Обзорная схема расположения Верхнечимидикээнского нефтепроявления

Оно связано с маломощным (до 10 м) горизонтом рыхлых песков нижнеюрского возраста (верхний подъярус плинсбахского яруса, тюннская свита). Залежь представляет собой горизонт в основании нижнеюрского разреза, в котором пески, иногда гравелиты и галечники, насыщены густой окисленной нефтью, образуя своеобразный горизонт слипшихся пород темно-коричневого и черного цвета.

Нефтенасыщенные пески по резкой волнистой границе перекрываются рыхлыми, нецементированными песками. Нефтеносный песок в поперечном сечении образует сложно-построенную линзу мощностью до 3,7 м. Залежь «висячая», оторвана от кембрийского цоколя слоем неизменного, без битума, песка мощностью до 3 м и перекрыта также неизменным песком мощностью до 5,7 м (Рисунок 2).

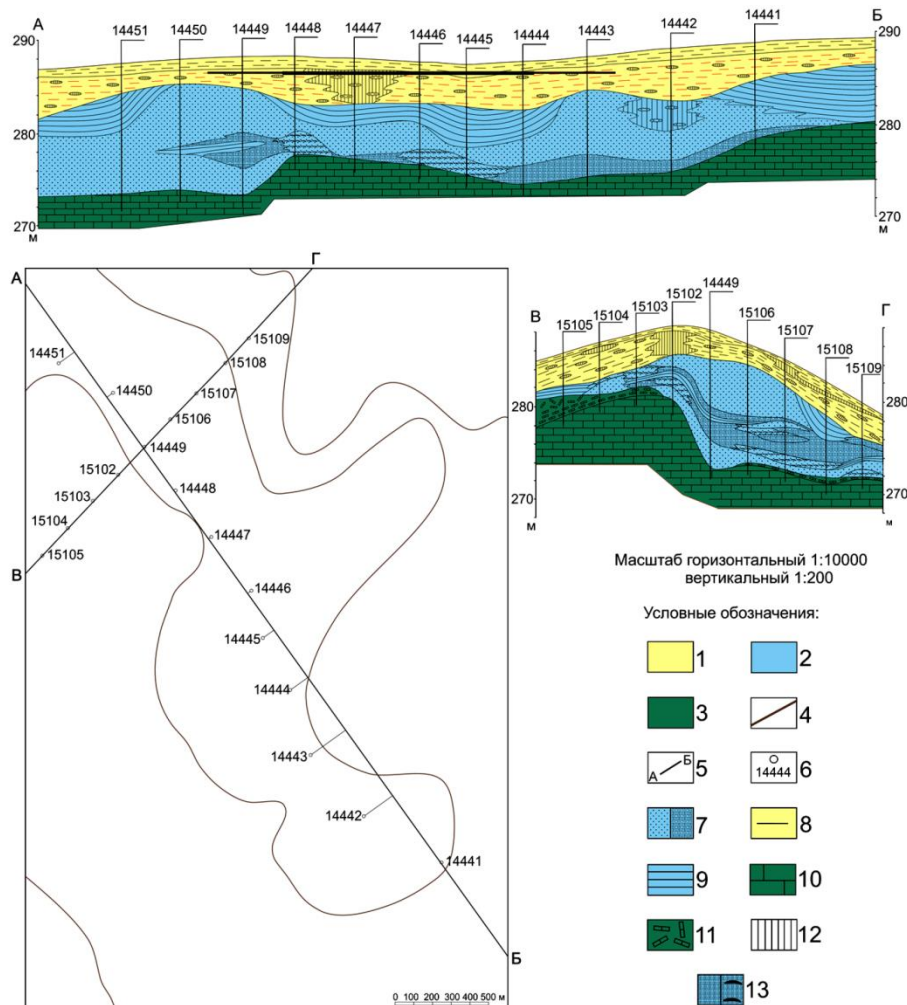


Рисунок 2 – Строение залежи битуминозных песчаников нижней юры на водоразделе верховьев рек Мунакан-Чимидикээн. Макетировано по данным ПО «Аэрогеология».

Условные обозначения: 1 – Средне-верхнечетвертичные отложения. Глины, суглинки с рассеянной галькой; 2 – Юрская система, нижний отдел, плинсбахский ярус, верхний подъярус, тюннская свита. Пески, глины, галечники; 3 – Кембрийская система, средний отдел, майский ярус, силигирская свита; 4 – Линеаменты дешифрирующиеся на КС; 5 – Линии разрезов; 6 – Скважины и их номера; 7 – Пески а) неизменные, б) с нефтенасыщением; 8 – Суглинки; 9 – Глины; 10 – Известняки; 11 – Кора выветривания на известняках кембрия – глина с плитками и щебенкой известняков; 12 – Лед; 13 – Битуминозные пески: а) с полным заполнением, б) с линзовидными, комковатыми включениями.

Генезис и необычная морфология нефтепроявления остаются до настоящего времени дискуссионными. Поскольку нефтенасыщенные пласты в пределах нефтепроявления подстилаются неизменными чистыми песчаниками юры и известняками среднего кембрия, они могли образоваться только за счет латеральной миграции из сопредельных территорий.

Вместе с тем особый интерес вызывает избирательная линзовидная насыщенность юрских терригенных отложений.

По поводу необычной морфологии Верхнечимдикээнского нефтепроявления, в опубликованной литературе [6] сделано предположение об экранировании УВ при аномально низких пластовых давлениях и низких температурах «субпокрышками» - маломощными пачками пород, которые в обычных условиях не способны удерживать УВ от рассеяния.

В предыдущих исследованиях было сделано предположение [7], что морфология Верхнечимдикээнского нефтепроявления может быть обусловлена деятельностью межмерзлотных водоносных горизонтов.

Подземные воды межмерзлотного типа установлены и изучены на бестяхской террасе р. Лены. Четвертая надпойменная терраса, названная П.А. Соловьевым бестяхской [4], протягивается вдоль правобережья современной долины р. Лены. Ширина ее в устьевой части р. Лютенга составляет 2-3 км, на широте Табагинского мыса – 19 км, а у пос. Намцы достигает 31 км. Абсолютные отметки поверхности террасы постепенно понижаются с юга на север от 163 до 140 м [4]. Выделяемый район работ относится к области сплошного распространения многолетнемерзлых пород [3]. Для бестяхской террасы характерно широкое развитие надмерзлотно-межмерзлотных радиационно-тепловых и гидрогенных таликов [5], площади которых до настоящего времени достоверно не установлены. Подземные воды межмерзлотного типа по данным пробуренных скважин залегают на глубинах до 100 м. Верхний уровень межмерзлотных вод устанавливается на глубинах от 10-11 до 30-50 м, а подошва таликов вскрыта лишь отдельными скважинами на глубинах 60-80 м [3].

Водовмещающие породы представлены песчано-галечниковыми аллювиальными отложениями четвертичного возраста мощностью до 90 м и подстилающими их терригенными отложениями нижней юры или карбонатными образованиями среднего кембрия. Нужно заметить, что стратиграфически и литологически данный разрез схож с разрезом Верхнечимдикээнской площади.

На основе изучения литературных данных [2] сделано предположение, что избирательная нефтенасыщенность песчаников может быть обусловлена своеобразным природным насосом в межмерзлотных водах (Рисунок 3). На основе натуральных наблюдений уровня воды в колодцах в пос. Нижний Бестях (Якутия) и образования наледей грунтовых вод построена динамика давления межмерзлотных вод. Максимальный уровень вод в колодцах отмечается в январе, а минимальный в августе.

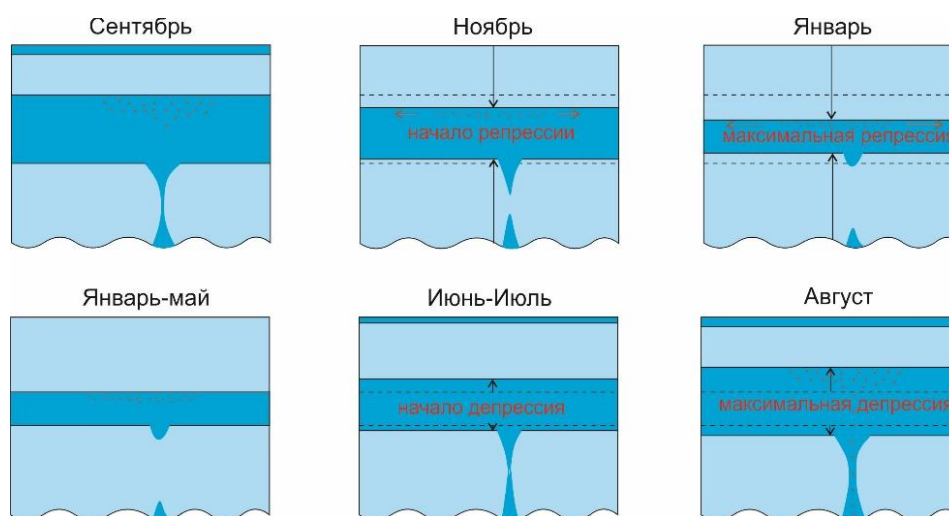


Рисунок 3 – Динамика давления межмерзлотных вод

По всей видимости, Верхнечимдикээнское нефтепроявление находится или находилось в зоне развития гидрогеогенных (водно-тепловых) таликов, существующих в результате напорной восходящей фильтрации подземных вод глубокой (подмерзлотной или межмерзлотной)

циркуляции по тектоническим дизъюнктивным нарушениям, пластам водопроницаемых пород, пликативных структур или раскарстованным зонам. Весьма вероятно, вместе с восходящими водами ежегодно в пласт попадали незначительные порции нефти. Нефть попадая в пласт накапливается в верхней части талой зоны межмерзлотного горизонта и на следующем цикле репрессии уже продвигается в зону низких давлений. За несколько тысяч лет существования межмерзлотного горизонта с питающим гидрогеогенным таликом может накопиться значительное количество нефти.

Наличие в мёрзлой зоне нефтенасыщенных пластов свидетельствовать о близости источника нефти в нижней части разреза.

3. Выводы

Обнаружение нефтяных проявлений в зоне многолетнемерзлых пород подчеркивает значимость изучения водоносных горизонтов на предмет обнаружения нефтяных залежей, в частности в пределах нефтегазоносных бассейнов. Наличие признаков нефтегазоносности в верхней части разреза является поисковым признаком для нахождения месторождений нефти и газа на традиционных глубинах (1,5-2,5 км).

При этом особый интерес представляют слабоизученные в отношении нефти и газа районы северного склона Алданской антеклизы, а также Лено-Анабарский и Предверхоянский прогибы и перспективные территории недр Восточной Якутии с широким распространением многолетнемерзлых грунтов.

4. Литература:

- [1] Sivtsev A. I., Alexandrov A. R., Pavlova K. A., Sedalisheva S. I. Inter-permafrost aquifers - prospective object for oil// Oil and gas business. 2017. Volume 15, 1. P.58-64. (translated from English).
- [2] Romanovsky N. N. Underground waters cryolithozony / Under Ed. V. A. Vsevolozhsky. M.: Izd-v MGU, 1983. 231 p (translated from English).
- [3] Semernya A.A. Estimation of inter-permafrost water resources in Central Yakutia based on observations of spring run-off (on the example of the Eruu spring)//Science and education, 1, 2016. P.41-47. (translated from English).
- [4] Soloviev P.A. Cryolithozona of the northern part of the Leno-Amginsky Interriver. M.: Izd-vo Academy of Sciences of the USSR, 1959. 144 p (translated from English).
- [5] Boytsov A.V. Geocryology and groundwater cryolithozony. Tyumen: TyumGNU, 2011. 176 p. (translated from English).
- [6] Sitnikov V.S., Mikulenko K.I. The role of cryolithozony in oil and gas accumulation in the east of the Siberian platform // Labor International. science. -practical. conf. «Problems and Prospects of Complex Development of Mineral Deposits of Cryolithozona». Yakutsk: Izd-in-In-Ta Permafrost CO RAS, 2005. T. 2. P.182-184. (translated from English).
- [7] Inter-Permafrost Aquifers - Prospective Site for Oil / A. I. Sivtsev, A. R. Alexandrov, K. A. Pavlov, S. I. Sedalisheva // Oil and gas business. - 2017. - T. 15, 1. - P. 58-64. (translated from English).
- [8] Menkyarova, V. S. Gas manifestations in the upper part of the section / V. S. Menkyarova // Ammosov-2023: Collection of materials of the General University Scientific Conference of Students and Masters, Yakutsk, 27 April 2023 / Rare Legion: N.S. Grigoryev, A. Mikhailov Yakutsk: M.K. Ammosov Northeastern Federal University, 2023. - P. 873-876. (translated from English).

КРИОГЕННЫЙ РЕЛЬЕФ ХРЕБЕТ КИСИЛЯХ

Юрий Мурзин

ФГБУН «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН»,
677010, Россия, г. Якутск, Мерзлотная, 36**PERIGLACIAL LANDFORMS IN THE KISILYAKH RIDGE**

Yuri Murzin

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36, Permafrost str., Yakutsk, 677010, Russia

Abstract. The Kisilyakh Ridge located in northern Yakutia is a minor ridge in the north-eastern part of the Chersky Range. The ridge is about 100 km long, rising at its highest point to 1726 m. Most of the Kisilyakh Ridge divides the Yana and Adycha drainage basins. The climate is extremely continental, with cold winters, relatively warm summers and low precipitation. Annual precipitation is 180–200 mm, of which 83–134 mm fall in summer. The mean annual air temperature is -15.9°C . The severe climate is responsible for the existence of continuous, cold permafrost, ranging in thickness from 200 to 500 m and in temperature from -6.0°C to -10.0°C , as well as for the variety of periglacial features. Kigilyakhs, or tors, occur on summits, protruding up to 30 m. Cryoplanation terraces are found at lower elevations, representing flat surfaces bounded by steep risers up the slope. The final stage of cryoplanation terrace development are tumps, or cryopediplains, representing flat cut summits. On gentle slopes above the treeline, ploughing boulders are encountered, representing granite blocks moving faster than the surrounding slope material.

1. Введение

Хребет Кисилых расположен на севере Якутии и является одним из малых хребтов в северо-западной части горной системы Черского. Протяжённость хребта около 100 км, с наивысшей отметкой 1726 м. Большая часть Кисилыхского хребта, является водоразделом рек Яны и Адычи. В настоящее время хребет представляет собой древнюю поверхность выравнивания [1]. На вершинах этой денудационной поверхности широко распространены такие криогенные формы рельефа как: кигиляхи, каменные моря, курумы. В разных частях склонов: нагорные террасы, бороздящие валуны, дели.

2. Основной раздел статьи

Наиболее распространённой криогенной формой рельефа являются кигиляхи, представляющие собой столбообразные скалы неправильной формы [2, 3, 4, 5]. Слово «кигиляхи» происходит от якутского «кисилых». Корень слова «киси» означает «человек». Так якуты называют высокие каменные столбы причудливой формы, образованные в результате криогенного выветривания плотных горных пород, преимущественно гранитов. Издали они похожи на человека или группы людей, за что и были так названы. Синонимы – кукуры, койтас, камни монахи (Рисунок 1).

Кигиляхи тянутся по гребню главных и боковых водоразделов Кисилыхского хребта. Наиболее крупные из них, высотой до 30 м, находятся на наиболее возвышенных вершинах. Здесь они образуют протяжённые скальные стенки, отделённые друг от друга узкими лабиринтами проходов. По мере удаления от вершины размеры кигиляхов уменьшаются, но их формы становятся более разнообразными. Кисилыхский хребет сложен терригенными породами: тёмно-серыми глинистыми сланцами, аргилитами, алевролитами триаса и светло-серыми песчаниками юры. Эта осадочная толща сильно дислоцирована и во многих местах прорвана интрузиями гранитов и гранитоидов мелового возраста. Именно они и образуют кигиляхи.



Рисунок 1 – Кигиляхи на водоразделе хребта Кисиях. Фото Мурзин Ю.А.

В гольцовой зоне, на северных и северо-восточных склонах хребта Кисиях, среди глыбового материала каменных морей, формируются нагорные террасы, представлявшие собой плоские площадки, ограниченные выше по склону крутыми уступами. Протяжённость уступов нагорных террас в отдельных случаях достигает нескольких сотен метров. Под уступами нагорных террас до начала августа сохраняются сезонные снежники (Рисунок 2). Конечной стадией развития нагорных террас являются усечённые плоские вершины – тумпы (Рисунок 3). На хребте Кисиях расположено несколько таких вершин, приуроченных к наиболее возвышенным частям водоразделов.

В выработке горизонтальных площадок на склонах участвуют различные геолого-геоморфологические процессы. Одни из них подготавливают горную породу к переносу, другие осуществляют этот перенос. В процессе подготовки к переносу основную роль играет нивация – разрушение горных пород в местах сохранения летом снежных скоплений. Наиболее интенсивно она протекает на линии, где поверхность нагорных террас сочленяется с вышерасположенным крутым участком склона. Здесь обнажаются скальные породы, которые обильно увлажняются стекающей со склонов и поступающей от тающих снежников водой. В результате попеременного промерзания и оттаивания поверхности разрушаются. Эту линию назвали линией забоя [6].



Рисунок 2 – Уступ нагорной террасы с сезонным снежником. Фото Мурзина Ю.А.

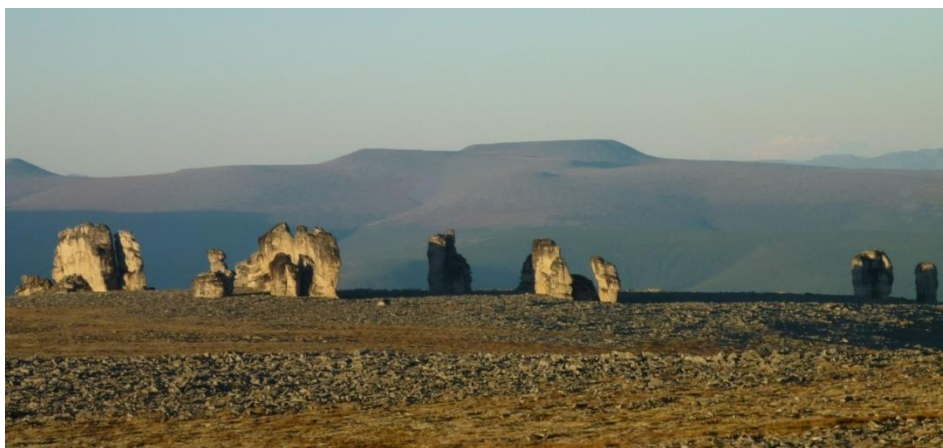


Рисунок 3 – Хребет Кисилых. На дальнем плане поверхность выравнивания – тумпы.
Фото Тостяковой Т.Д.

На плоских водоразделах хребта, в результате процессов морозного выветривания, образованы обширные поля каменных морей. В субгольцовом поясе (с абс. отм. местности 500-700 м), каменные моря постепенно, по ложбинам стока, сменяются курумными потоками. Отдельные курумы, спустившиеся к подножию склонов до поверхности террасы р. Адычи, образуют коллювиальные нагромождения крупнообломочного материала. Протяжённость таких крупноглыбовых развалов достигает 500м, при ширине 10-15м и высоте до 2-3м. Параллельно с глыбовым материалом курумов, с водораздела хребта Кисилых, интенсивно перемещается тонкодисперсный материал. В отдельных случаях благодаря выносу супесчано-суглинистого материала с курумного потока на поверхности тыловой части первой террасы р. Адычи формируется мощный чехол склоновых наносов, в которых отмечены повторно-жильные льды с базальной криогенной текстурой.

В гольцовой зоне, на пологих склонах, были отмечены «бороздящие» валуны, представляющие собой отдельные глыбы гранитов, движущиеся с большей скоростью, чем окружающие их склоновые массы (Рисунок 4).



Рисунок 4 – «Бороздящий» валун на пологом склоне хребта Кисилых. Фото Мурзина Ю.А.

Бороздящие валуны представляют собой обломки горных пород различных размеров и конфигураций. Максимальный размер таких глыб составляет 2 на 1 м. Чаще всего, появление обломков горных пород на склоне обусловлено пучению, реже обвалам. С наступлением заморозков, благодаря тому, что теплопроводность валунов почти на два порядка выше снега

0,14 и 0,002 м³/с соответственно [7], под бороздящими валунами фиксируются наиболее низкие температуры. Это вызывает первоочередное промерзание горной породы под валунами и миграции влаги к фронту промерзания, т. е. под валун. Весной, бороздящие валуны прогреваются быстрее, и под ними начинает протаивать льдистый грунт, отличающийся к тому же высокой пластичностью. Оттаивающий супесчано-суглинистый материал превращается в жидкую массу, по которой валуны и скользят вниз по склону в течении всего тёплого периода. Характерной криогенной формой рельефа пологих склонов являются дели, представляющие собой линейно вытянутые плоскодонные без русловые ложбины стока. На аэрофотоснимках они выделяются как полосы более тёмного фона. Своё начало дели берут с водоразделов, с каменных морей, курумов. Заканчиваются дели чаще всего у подножия склонов, где образуют чехол супесчано-суглинистых отложений конусов выноса. Днище делевых ложбин занято густым, мелким угнетённым листовничным лесом с развитым моховым покровом и постоянно увлажнено. Глубина сезонного оттаивания грунтов в таких условиях не превышает 0,4-0,5м. Под моховым покровом залегает сильно льдистый горизонт мощностью до 0,5м.

3. Выводы

В гольцовой зоне хребта Кисилых, являющейся древней поверхностью выравнивания, широко распространены такие криогенные формы рельефа как: кигиляхи, нагорные террасы, каменные моря, курумы. На пологих склонах ярко выражены солифлюкционные потоки, бороздящие валуны, дели.

4. Литература:

- [1] Валпетер А.П., Карташов И.П. Реликты пенепленизированного рельефа на Северо-Востоке СССР и проблема определения их возраста // Проблемы поверхностей выравнивания. - М: Наука, 1964. - С. 164-170.
- [2] Тимофеев Д.А. Терминология денудации и склонов. - М.: Наука, 1978. - 242 С.
- [3] Фёдорцев В.А. Кигиляхи // Проблемы Арктики. 1938. №1. - С. 5-12.
- [4] Богдарын Сюльбэ. Топонимика Якутии. Якутск: Якутское кн. изд-во. 1985. - 144 С.
- [5] Мурзин Ю.А. Кигиляхи Якутии // Наука и Техника в Якутии. №1 (4). 2003.- С. 103-108.
- [6] Боч С.Г., Краснов И.И. О нагорных террас и древних поверхностях выравнивания на Урале и связанных с ними проблемами // Изв. ВГО, Т.78. вып.1. 1943. - С. 14-25.
- [7] Гравис Г.Ф. Стадийность в развитии нагорных террас (на примере хр.Удакан) // Вопросы географии забайкальского севера. М.: Наука 1964. - С 133-142.
- [8] Горбунов А.П. Бороздящие валуны // Мерзлотные исследования в осваиваемых районах СССР. Новосибирск: 1980. - С 160-167.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИРОДНЫХ ВОД Г.САЛЕХАРД (ЯНАО) В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД 2023 Г

Валентина Паламарчук^{1,2}, Анна Башкова¹

¹ ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики»,
629007, Россия, г. Салехард, ул. Республики, 20

² ФГБУН «Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева» РАН,
107045, Москва, Уланский пер., 13, стр. 2

GEOCHEMICAL FEATURES OF THE NATURAL WATERS OF SALEKHARD (YAMALO-NENETS AUTONOMOUS DISTRICT) IN THE SUMMER OF 2023

Valentina Palamarchuk^{1,2}, Anna Bashkova¹

¹ Arctic Research Centre of the Yamal-Nenets autonomous district, 20, Respubliki str., Salekhard,
629007, Russia

² Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS,
13, Ulansky per., bldg 2, Moscow, 107045, Russia

Abstract. The report presents the results of studies on the major- and trace-component compositions of surface and groundwater in Salekhard in summer 2023. The tested natural waters are ultra-fresh and fresh (salinity 32-192 mg/l), hydrocarbonate with a mixed cationic composition. Surface waters varied from acidic and slightly acidic in the inter-temperate period to neutral and slightly alkaline in the end of the summer period. In the period under review, the maximum permissible concentrations of 13 trace-elements were observed, which requires the organization of systematic observations.

1. Введение

Территория Ямало-Ненецкого автономного округа по обеспеченности населения запасами и ресурсами подземных и поверхностных вод относится к наиболее благоприятным регионам России. Однако, вопрос хозяйственно-питьевого водоснабжения в регионе остается острым, что связано, прежде всего, с качеством воды [3]. В результате многолетней эксплуатации подземных вод практически на всех городских водозаборах региона отмечается рост железа и уменьшение рН, на некоторых - наличие техногенных компонентов-загрязнителей нефтепродуктов и фенолов, превышение фонового содержания фосфатов, хлоридов и ионов азотной группы и неудовлетворительные органолептические показатели (мутность, цветность, вкус) [5]. Многолетнее техногенное воздействие приводит не только к загрязнению природных вод округа, но и к изменению их уровня и характера взаимосвязи между отдельными водоносными горизонтами, а также между подземными и поверхностными водами. Для изучения многолетней динамики химического состава вод, а также для прогноза их изменений, необходима организация режимных наблюдений за природными водами округа. Подобные работы велись на территории г. Салехард с 1976 по 1990 гг. Был накоплен значительный фактический материал. Однако ввиду того, что не все скважины наблюдательной сети имели одинаковую продолжительность наблюдений, а также из-за отсутствия надежной измерительной аппаратуры, которой можно было проводить измерения в условиях развития многолетнемерзлых пород (ММП), режим подземных и поверхностных вод был охарактеризован недостаточно полно. С 2023 г сотрудники Научного центра изучения Арктики приступили к возобновлению гидрогеологических исследований на территории г. Салехард, что также позволит оценить динамику изменений состояния подземных и поверхностных вод в условиях меняющегося климата и, соответственно, на фоне деградации многолетнемерзлых пород.

Целью проведенных исследований являлась оценка современного состояния природных вод г. Салехард в летний период 2023 г (Рисунок 1).

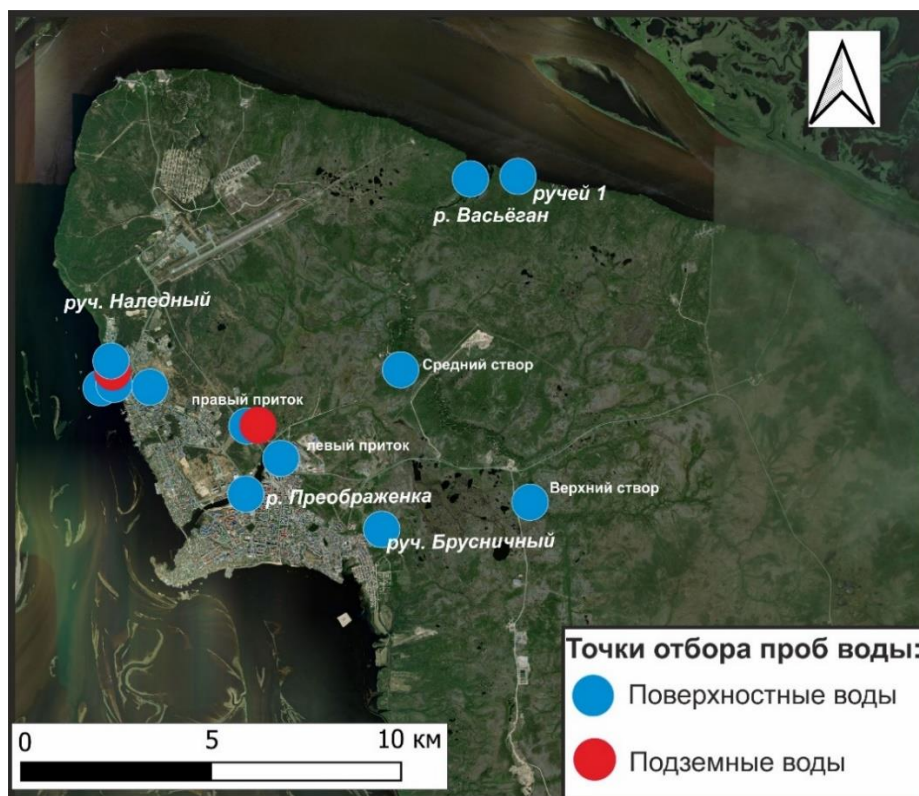


Рисунок 1 – Точки отбора поверхностных и подземных вод

Гидрохимическое опробование поверхностных вод и родников было проведено в июле-октябре 2023 г. Было отобрано 37 водных проб для характеристики их макрокомпонентного состава и 51 водная проба для изучения микрокомпонентного состава. При статистической обработке результатов химических анализов поверхностных вод также привлечены фондовые материалы [6, 8]. Аналитические исследования состава воды выполнены в химико-аналитической лаборатории ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики», г. Надым методами фотометрии, гравиметрии и титриметрии, а также в Аналитическом сертификационном испытательном центре Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН (г. Черноголовка) масс-спектральным (ICP-MS) и атомно-эмиссионным (ICP-AES) методами анализа с индуктивно связанной плазмой.

2. Территория исследований

Салехард расположен в северо-западной части Западно-Сибирской низменности. Для территории исследования характерен резко континентальный тип климата. В последние десятилетия наблюдается повышение среднегодовых значений температуры воздуха и количества осадков. Так в г. Салехард среднегодовая температура воздуха за последние 50 лет составляет минус 5,7°С, а среднегодовое количество осадков – 455 мм [9]. Мощность ММП в пределах рассматриваемой территории крайне изменчива и варьирует в зависимости от геоморфологических уровней от 10-20 до 150-200 м [6]. Главной водной артерией и базисом эрозии для всех гидрографической сети является р. Обь. Вдоль восточной границы исследуемой территории протекает р. Васьёган. Длина реки 20 км, площадь водосбора 88 км². Она имеет хорошо разработанную долину, с четко выраженной поймой и характеризуется крутым уклоном русла. В пределах городской черты протекает р. Преображенка. Длина реки 9 км, площадь водосбора составляет 31 км². Долина реки в верховьях сильно заболочена и имеет ширину до 8-12 м. В северной части города в районе Ангальского мыса протекает руч. Наледный. Длина ручья около 4 км, с притоком около 7 км. Площадь водосбора порядка 10 км². Русло ручья сильно извилистое и залесенное. В среднем течении ручья наблюдаются высачивания подземных вод, вследствие чего происходит оползание и обрушение берега.

Основными источниками питания поверхностных водотоков являются атмосферные осадки, поэтому режим их неустойчив. Замерзают реки в октябре, а вскрываются в конце мая – начале июня, ледоход сравнительно непродолжителен [6]. В районе исследования выделяется два гидрогеологических этажа, соответствующих криогенно-таликовому комплексу плиоцен-четвертичных отложений и таликовому комплексу мезозойских отложений. Четвертичные отложения представлены чередованием водоупорных и водопроницаемых пород, не выдержанных по площади и разрезу. По положению водовмещающих пород относительно многолетнемерзлых выделяются следующие типы подземных вод в четвертичных отложениях: подземные воды сквозных таликов (талые подрусловые отложения р. Обь и ее крупных притоков); надмерзлотные подземные воды несквозных таликов (талики прибрежной части р. Обь, подрусловые талики небольших рек, подозерные талики); надмерзлотные воды присклоновых таликов (талики распространены повсеместно небольшими по площади участками); межмерзлотные подземные воды (приурочены к талым отложениям различной мощности среди ММП слоистого строения); подмерзлотные воды (распространены практически повсеместно, за исключением криогенного водоупора и сквозных таликов) [6].

3. Результаты гидрохимических исследований

Химический состав поверхностных и подземных вод охарактеризован по пробам, отобранным в районе гидростворов в летний период 2023 г. Результаты макрокомпонентного анализа представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Средненный макрокомпонентный состав опробованных природных вод

Место отбора проб	pH	Минерализация	Катионы				Анионы				
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻
мг/л											
Р. Васьёган, устье	7,0	118	8,2	3,8	14,5	3,0	63	12	12,5	0,1	0,6
Р. Васьёган, среднее течение	6,4	59	6,0	3,0	4,7	0,6	36,0	5,5	2,6	0,02	0,22
Р. Васьёган, верхнее течение	6,8	60	6,0	2,7	5,6	0,5	38,1	3,7	3,4	0,01	0,23
Р. Преображенка, правый приток	6,0	60,6	6,4	3,0	2,1	0,3	40,1	4,2	2,1	0,01	0,23
Р. Преображенка, левый приток	6,0	97,2	12,6	4,0	4,9	0,8	56,0	12,1	6,0	0,01	0,25
Р. Преображенка, среднее течение	-	103	13,6	4,9	6,8	1,0	58,5	12,8	5,0	0,02	<0,1
Руч. Наледный	7,2	179	25,1	9,0	8,7	1,1	114,0	15,2	5,0	0,02	0,36
Руч. Брусничный, верхнее течение	6,9	46,0	4,6	2,2	4,8	0,1	26,0	4,4	3,9	0,01	0,3
Ручей I	6,9	25	2,7	1,3	1,9	0,1	13	5,1	1,4	0,001	0,2
Родник на р. Преображенка	-	21	0,9	0,5	1,0	0,08	13	5,1	0,4	0,03	<0,1

- нет данных

На верхнем створе р. Васьёган воды имели гидрокарбонатный кальциево-натриево-магниевый состав с минерализацией 65-70 мг/л. К концу октября минерализация понизилась до 35 мг/л, вероятно, за счет разбавления вод реки дождевыми и снеговыми осадками. Вниз по течению реки наблюдались изменения в катионном составе вод, он стал кальциево-магниевым-натриевым. Минерализация в среднем течении составляла 50-65 мг/л, к концу октября также наблюдалось ее понижение до 39 мг/л. Водородный показатель (pH) с июля по октябрь изменялся от 4,1 до 7,7-8,0. В устье реки состав вод гидрокарбонатный натриево-кальциевый с минерализацией около 117 мг/л. Вероятно, состав речных вод в нижнем течении изменился за счет более минерализованных и богатых натрием подземных вод [8], а также многочисленных притоков. Река Преображенка формируется двумя ручьями. Воды правого ручья в летний период 2023 г имели гидрокарбонатный кальциево-магниевый состав с минерализацией 33-87 мг/л. pH изменялся от 4,1 до 7,4. В нижнем течении этого ручья отмечают низкую скорость течения и относительная стабильность уровня воды, что вероятно связано с наличием в это месте выходов подземных вод, которые влияют на гидрологический режим ручья. Подземные воды

имели гидрокарбонатно-сульфатный кальциево-натриево-магниевый состав и минерализацию 21 мг/л. Повышенные содержания сульфатов могут быть связаны с усилением процессов вымораживания, и как следствие, приводить к возрастанию концентраций в водах ионов SO_4^{2+} и Cl [2]. Воды левого притока были гидрокарбонатные и гидрокарбонатно-сульфатные кальциево-магниевые с минерализацией 51-117 мг/л. pH изменялся от 4,1 до 7,3. В водах ручья отмечались повышенные концентрации ионов аммония до 1,9 мг/л, что, вероятно, связано с периодическим сбросом сточных вод. В среднем течении р. Преображенка (рядом автомобильным мостом) воды имели гидрокарбонатный кальциево-магниевый состав и минерализацию 100-105 мг/л. Концентрация аммония составляла 0,4-1,1 мг/л.

Воды ручья Наледного и его притока в летний период 2023 г были гидрокарбонатными кальциево-магниевыми с минерализацией 165-192 мг/л. В среднем течении ручья были обнаружены выходы подземных вод в виде «грифонов» (Рисунок 2а), а также остатки наледи (Рисунок 2б). Данный участок является перспективным для организации гидрогеологических исследований.



Рисунок 2 – Выходы подземных вод (а) и остатки наледи (б) в русле руч. Наледный

В пределах городской территории также были опробованы воды в верхнем течении руч. Брусничный. По химическому составу воды были гидрокарбонатными кальциево-натриево-магниевыми с минерализацией 46 мг/л. Также отмечают повышенные концентрации аммония (до 0,8 мг/л), что вероятно связано с загрязнением, вызванным строительными работами по берегам ручья. Также был опробован небольшой ручей, впадающий в р. Обь, недалеко от дельты р. Васьяган. Воды ручья были гидрокарбонатными кальциево-магниевыми с минерализацией 25 мг/л.

Важной составляющей комплексных исследований процессов формирования химического состава природных вод является определение содержания микрокомпонентов. Основными естественными источниками появления микрокомпонентов в природных водах являются горные породы, техногенными – автотранспорт, нефтеперерабатывающая промышленность, металлургия, сельское хозяйство [1]. На приведенной диаграмме (Рисунок 3) можно проследить изменения концентраций микрокомпонентов в природных водах г. Салехард в летний период 2023 г.

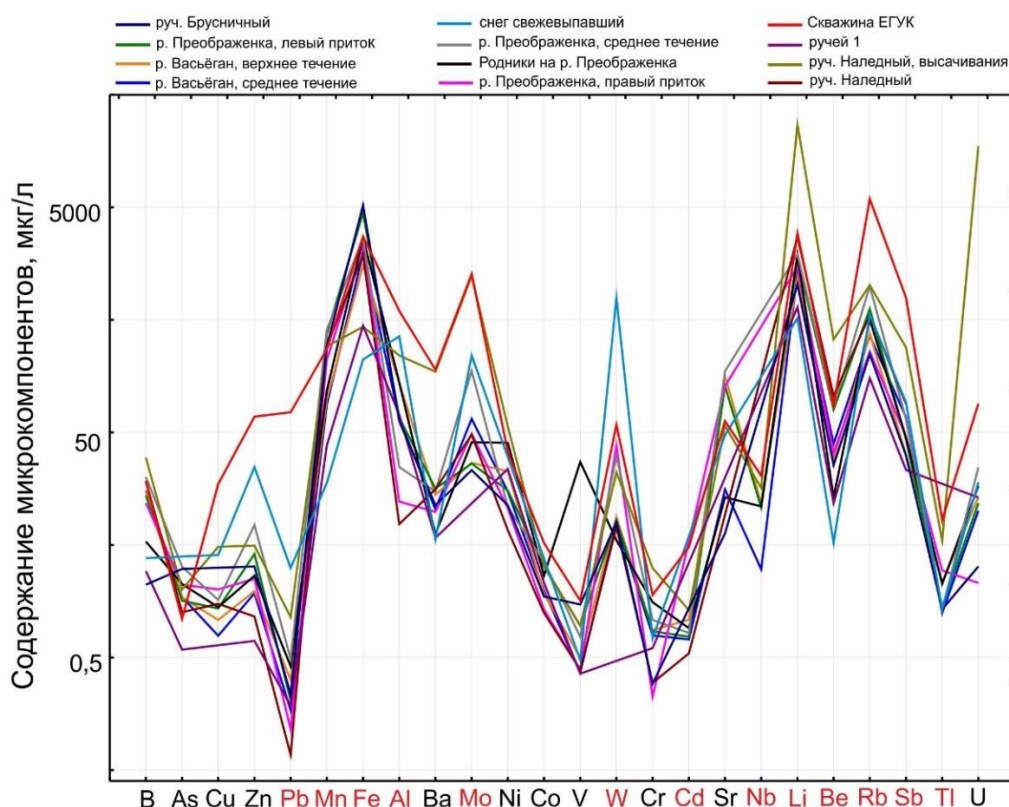


Рисунок 3. Log-распределение микрокомпонентов в природных водах г. Салехард в летний период 2023 г (красным цветом показаны компоненты с превышениями ПДК).

В 2004 г. по результатам проведения комплексной гидрогеологической, инженерно-геологической и геоэкологической съемки [6] в поверхностных водах были выявлены высокие концентрации марганца, фтора, железа, цинка, алюминия и ванадия, не превышающие ПДК [4]. В летний период 2023 г на территории г. Салехард наблюдались превышения предельно-допустимых концентраций (ПДК) 13 микроэлементов I, II, и III классов опасности – свинца, марганца, железа, алюминия, молибдена, вольфрама, кадмия, ниобия, лития, бериллия, рубидия, сурьмы и талия.

Повышенные содержания железа и марганца характерны для природных вод всего Ямало-Ненецкого округа [2]. Геохимический облик природных вод округа определяется высокими концентрациями фульвокислот и гуминовых кислот, с которыми Fe^{2+} и особенно Fe^{3+} образуют устойчивые комплексные соединения. Также природные воды с высокими концентрациями органических веществ гумусового ряда характеризуются высокими потенциальными возможностями накопления марганца [2]. Во всех исследуемых поверхностных и подземных водах наблюдались превышения ПДК Li и Rb. Повышенные концентрации этих микрокомпонентов были отмечены также в водах ручья 1, который находится вдали от городской части (условно фоновый участок), а также в свежеевыпавшем в октябре снеге.

Наиболее высокие концентрации микроэлементов отмечались в рр. Васъёган и Преображенка, что отчасти может быть связано со сбросом стоков с очистных сооружений, а также с городскими стоками. Кроме того, в опробованных подземных водах также наблюдаются превышения ПДК многих микроэлементов. Наибольшие превышения зафиксированы в промышленной части города (родники в руч. Наледном и скважина ЕГУК). Помимо этого, практически во всех пробах наблюдались превышения ПДК Tl и Be (кроме фонового ручья и руч. Наледного).

Вероятно, превышения ПДК некоторых элементов могут быть связаны с началом разработки в 2003 г месторождения хромитов в горном массиве Рай-Из [7]. Массив находится на левом берегу р. Обь в 100 км по прямой от г. Салехард. Перенос загрязняющих веществ воздушным путем может являться источником поступления тяжелых металлов. Поэтому для того, чтобы

понять являются ли превышения ПДК данных микрокомпонентов «хроническими» или сезонными необходимо вести годовой мониторинг микрокомпонентного состава компонентов геологической среды (воды, почвы, воздух и т.д.).

4. Выводы

В летний период 2023 г природные воды г. Салехард были гидрокарбонатными со смешанным катионным составом и минерализацией 21-192 мг/л (ультрапресные и пресные). В р. Преображенка, протекающей в центральной части города, наблюдаются повышенные содержания сульфатов и аммония за счет сброса стоков с очистных сооружений. Анализ микрокомпонентного состава показал, что в опробованных поверхностных и подземных водах наблюдались превышения ПДК 13 элементов: Pb, Mn, Fe, Al, Mo, W, Cd, Nb, Li, Be, Rb, Sb, Tl, что связано как с естественными факторами (повышенные содержания железа и марганца), так и с техногенными воздействиями, что требует организации систематических наблюдений.

5. Благодарности

Исследования проводились в рамках реализации проекта «Методика автоматизированного гидрогеологического мониторинга для расчёта и прогноза состояния грунтов основания объектов» при участии НИП «Российский центр освоения Арктики», г. Салехард.

6. Литература:

- [1] A.I. Alekseev, M.V. Sereda, S. Yuzvyak. Chemistry of water (Theory, properties, application). St. Petersburg: NWTU, 2001, 180 p.
- [2] Beshentsev, V. A. Ecology of groundwater of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. Russian Academy of Sciences, Ural Department, Institute of Geology and Geochemistry named after A. N. Zavaritsky. Yekaterinburg: Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2005, 165 p.
- [3] Beshentsev, V. A. Groundwater resources of the Yamalo-Nenets oil and gas producing region and problems of their use // News of the Ural State Mining University, 2013, vol. 2 (30), pp. 15-20.
- [4] GN 2.1.5.1315-03. Maximum permissible concentrations (MPC) of chemicals in the water of water bodies for economic, drinking and cultural water use. Hygienic standards.
- [5] Information on the current state of groundwater and dangerous exogenous geological processes in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug in 2022.
- [6] Report on a comprehensive hydrogeological, engineering-geological and geocological survey of a scale of 1:50,000 Sheet Q-42-50- A (Salekhard). Scientific supervisor, D.G.-M.N. Prof. Gryaznov O.M., Yekaterinburg., 2004.
- [7] Rogachev S. Harp. The magazine "Geography". 2008, vol 14.
- [8] Shastin A.M. et al. Report of the Salekhard hydrogeological detachment of the PKGRE on the results of stationary regime observations at the Salekhard complex hydrogeological and engineering-geological station for the period from 1976-1990, Labytnangi, 1991, 590 p.
- [9] Weather in Salekhard – URL: <https://meteo.ru/> (accessed 09/20/2023).

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ ЦЕНТРАЛЬНЫХ ОБЛАСТЕЙ ПРЕДВЕРХОЯНСКОГО ПРОГИБА

Александр Погодаев^{1,2}, Розалия Севостьянова²

¹ АО «Туймаданефтегаз», 677005, Россия, г. Якутск, ул. Курашова, 44 А

² ФГБУН ФИЦ «ЯНЦ СО РАН» «Институт проблем нефти и газа СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, ул. Петровского, 2

HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS OF OIL AND GAS POTENTIAL OF THE CENTRAL REGIONS OF THE PRE-VERKHOYANSK TROUGH

Alexander Pogodaev^{1,2}, Rozaliia Sevostianova²

¹ JSC «Tuymadaneftegaz», 44 A, Kurashova str., Yakutsk, 677005, Russia

² Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, 2, Petrovsky str, Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. Based on the established patterns of placement of gas fields and deposits in the Khapchagai district of the Vilyuisk oil and gas bearing region, promising zones of possible oil and gas accumulation in Permian and Triassic deposits of the Preverkhoyansk trough within the Berge-Oloysky shaft and the zone of Kitsch uplifts determined by positive structural elements and favorable hydrodynamic regimes are substantiated.

1. Введение

Начало планомерных гидрогеологических исследований территории Якутии относится к тридцатым годам прошлого столетия (исследования Н.И. Толстихина, 1935-1938 гг.). Первые сведения о гидрохимии, динамике и геотермии глубоких горизонтов мезозоя Вилуйской синеклизы и Приверхоянского прогиба получены по материалам бурения и опробования опорных скважин: Вилуйской (Ю.Д. Горшенин и др, 1954), Намской (Е.И. Сарычев и др.1956), и Бахынайской (Г.А. Падва, и др. 1956; Л.А. Грубов 1959).

Первоначальные работы поискового бурения на нефть и газ были сконцентрированы в центральной части Предверхоянского прогиба (Таблица 1) на Китчанской, Сангарской и Усть-Вилуйской структурах, подготовленных сейсморазведкой МОВ в комплексе со структурным колонковым бурением, где в 1956 г. было открыто первое в Якутии газовое месторождение – Усть-Вилуйское. К северу от него в 1961 г. было выявлено Собо-Хаинское месторождение газа. Одновременно геологоразведочные работы были развернуты в Вилуйской синеклизе, в пределах Хапчгайского мегавала, которые привели к открытию нескольких газоконденсатных месторождений: Бадаранского (1962 г.), Неджелинского (1963 г.), Средневилуйского (1963 г.), Толонского (1966 г.), Мастахского (1967 г.) и Соболюхского (1972 г.). В 1976 году в пределах Малькай-Логлорской структурной зоны северо-западного борта Вилуйской синеклизы (Тюнгский нефтегазоносный район, НГР) было открыто крупное Среднетюнгское месторождение (Рисунок 1). В последующие годы эффективность поисково-разведочных работ на территории Вилуйской синеклизы существенно снизилась. При этом степень освоения газовых ресурсов не превышает 25% [1].

Обширные территории восточной окраины Сибирской платформы на современном этапе изученности находятся в ожидании и преддверии открытий крупных (и средних) месторождений нефти и газа, которые могут состояться как на арктической территории Лено-Анабарской впадины, так в северных и центральных областях Предверхоянского прогиба, а также в юго-восточной периферии платформы, в пределах Алдано-Майского прогиба.

Формирование залежей углеводородов здесь обусловлено многими геодинамическими и, следовательно, гидродинамическими обстановками. Главным показателем единства может выступать их общая принадлежность к краевой депрессии Сибирской платформы и преобладающие тектонические условия формирования региональной динамики подземных вод и связанных с этим миграционных процессов.

Таблица 1 – Скважины, пробуренные в пределах Северо-Востока Сибирской платформы

№ пп	Площадь, № скв.	Категория скважин	Альтитуда, м	Возраст пород забоя (система/отдел)	Забой, м	Год бурения
1	Намская	Опорная	84,6	Триас, средний	3007	1956
2	Бахынайская, 1	Опорная	48,7	Триас, нижний	2825	1956
3	Китчанская, 1	Поисковая	74,5	Триас, средний	2101	1955
4	Сангарская, 1	Поисковая	233,0	Юра, средний	1459	1955
5	Китчанская, 2	Поисковая	73,1	Триас, нижний	2520	1959
6	Бергеинская, 1	Поисковая	69,4	Юра, верхняя	3506	1960
7	Китчанская, 3	Поисковая	169,0	Триас, нижний	2085	1961
8	Олойская, 1	Поисковая	74,66	Юра, верхний	3504	1961
9	Олойская, 2	Поисковая	74,58	Юра, верхний	3981	1961
10	Бергеинская, 2	Поисковая	70,0	Юра, верхняя	3576	1962
11	Бергеинская, 3	Поисковая	69,2	Юра, верхняя	3525	1962
12	Бергеинская, 4	Поисковая	63,1	Мел, нижний	1891	1962
13	Китчанская, 4	Поисковая	168,3	Пермь, верхний	2848	1963
14	Сангарская, 2	Поисковая	71	Триас, средний	2600	1963
15	Сангарская, 3	Поисковая	306,5	Юра, нижний	2074	1964
16	Эксеняхская, 1	Параметрическая	110	Юра, нижний	3123	1973
17	Среднелунхинская, 111	Поисковая	118,5	Триас, нижний	3977	1975
18	Кобяйская, 101	Поисковая	150,6	Юра, нижний	4141	1977
19	Сангарская, 4	Поисковая	234,8	Триас, нижний	3753	1979
20	Усть-Вилуйская, 50	Поисковая	85(?)	Пермь, верхний	4016	1979
21	Усть-Вилуйская, 52	Поисковая	90 (?)	Триас, нижний	3387	1991

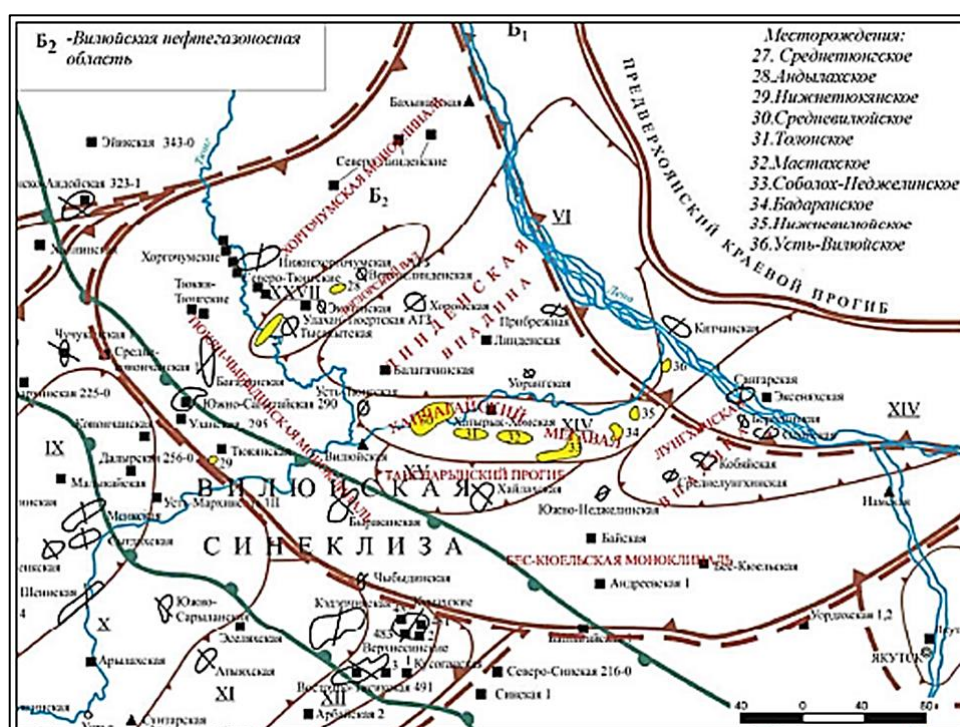


Рисунок 1 – Фрагмент обзорной карты размещения поисковых работ на нефть и газ на территории Республики Саха (Якутия), (Б2 - Вилуйская НГО; Б1 - Предверхоёнская НГО).

В современном структурном плане пассивная окраина Сибирской платформы представлена в редуцированных размерах и деформированном виде сообразно со складчато-сдвиговыми и дизъюнктивными процессами постпалеозойского тектогенеза [2].

Основными тектоническими элементами Приверхоёно-Вилуйского артезианского суббассейна являются: южные склоны Анабарского массива, северный склон Алданского массива, Вилуйская впадина, Предверхоёнский краевой прогиб, осложненный наложенной

кайнозойской складчатостью, и Верхоянская складчатая зона, современный (горный) рельеф, сформировавшийся в четвертичное время, амплитуда новейших поднятий до 2000 м и более. Геологический разрез здесь представлен породами кайнозой-палеозойского возраста. Промышленная газоносность установлена в отложениях верхнего палеозоя-мезозоя (комплекс ПТ пермь-триас).

Установлено, что гидрогеологическая система мезозойских и верхнепалеозойских отложений показывает достаточно высокие уровни газонасыщенности вод углеводородным газом, преимущественно метаном. Даже самые приближенные количественные оценки свидетельствуют о значительном объеме водорастворенного газа и его существенном преобладании относительно суммарных запасов свободного газа открытых месторождений.

Нефтегазоносность следует рассматривать как свойство осадочного бассейна, его функциональное состояние в качестве природного резервуара для нефти и газа, существующее на определенном этапе развития. В условиях Вилуйской синеклизы вполне очевидна приуроченность практически всех разведанных запасов газа промышленных категорий к крупным высокоамплитудным валлообразным поднятиям: к Малыкай-Логлорской структурной зоне и Хапчагайскому мегавалу, расположенным по бортам Линденской впадины.

Наличие больших концентраций углеводородных газов в пластовых водах продуктивных комплексов свидетельствует о высоком уровне современного масштаба газообразования, широком развитии процессов вертикальной и латеральной миграции, что является благоприятным фактором, способствующим образованию залежей свободного газа в ловушках с необходимыми структурными условиями. По некоторым оценкам суммарные ресурсы водорастворенных УВ-газов здесь могут составлять до 85 трлн. м³ [3].

2. Закономерности размещения и сохранности залежей нефти и газа

Закономерности в размещении и сохранности залежей нефти и газа зависят от сложной совокупности многих природных факторов, каждый из которых, так или иначе, участвует в динамичном процессе первичного формирования или переформирования залежей, ключевую роль здесь могут играть гидродинамические условия пластовых систем [4].

В хорошо изученном бурением разрезе верхнего палеозоя и мезозоя Вилуйской синеклизы, как уже было показано, выделяются пермский, нижнетриасовый, триас-нижнеюрский и юрско-меловой водоносные комплексы. Первые три ассоциированы с неджелинским, таганджинским и кысыл-сырским резервуарами, содержащими основные месторождения УВ в контуре Хапчагайского мегавала. Пермский комплекс, расположенный под неджелинской покрывкой, отличается от остальных водоносных комплексов своеобразными показателями минерализации, водообильности и значениями пластовых давлений (наличие АВПД).

Приведенные напоры вод ступенчато после разделяющих водоупоров, увеличиваются сверху вниз по разрезу и для продуктивных отложений средней и верхней юры составляют: -30 м, -45 м; нижней юры: +70 м, +80 м; нижнего триаса: +120 м, +140 м; верхней перми до +1500 м. Распределение приведенных пластовых давлений с понижением значений от центральных погруженных районов Вилуйской синеклизы к её бортам, свидетельствует об элизионном характере гидродинамического режима и наличии внутренних источников питания при создании напоров (Грубов, 1975, Сурнин, 1983, Шабалин, 1999).

Проявления элизионного гидродинамического режима водоносных комплексов способствует процессам латеральной миграции УВ-флюидов. Минерализация вод возрастает с глубиной, в триасовом комплексе она составляет от 34 г/л до 43 г/л, в пермском до 70-100 г/л. Воды практически бессульфатны, в них отмечено содержание брома, йода, аммония, нефтяных кислот и большого количества растворенных газов. Четкая ступенчатая дифференциация гидрогеологического разреза по солевому составу, величинам пластового давления на границах изолирующих толщ, характеру газовой зональности, наглядно иллюстрирует наличие благоприятных условий для формирования крупных зон нефтегазонакопления (Рисунок 2).

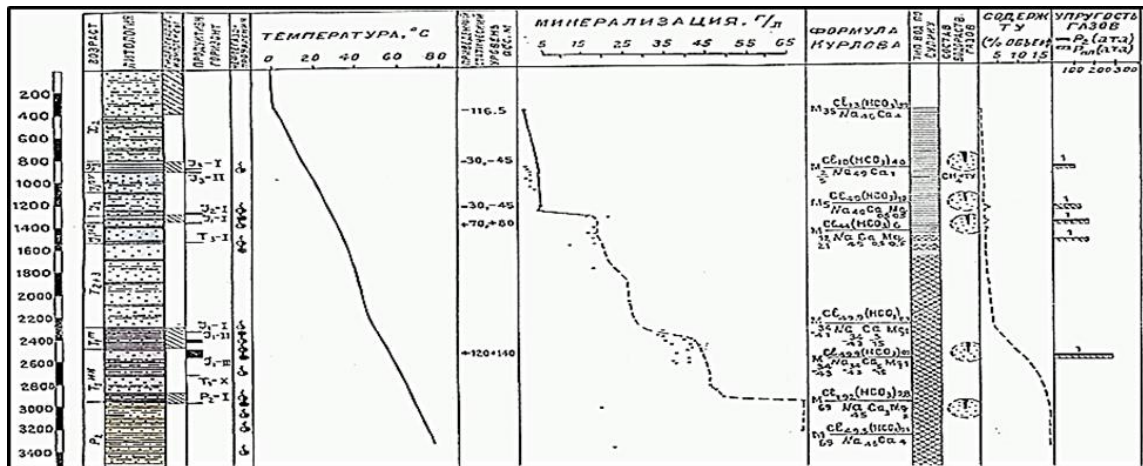


Рисунок 2 – Сводный гидрогеологический разрез, Хапчагайского гидрогеологического района. (по Грубову Л.А., 1975; Шабалину В.П., 1999).

Газоносность нижнеюрского комплекса находится в зависимости от качества экранирующих свойств мономской глинистой толщи. Залежи, как правило небольшие, образуются при вторичном улавливании газовых потоков в процессе активной вертикальной, межрезервуарной миграции за счет переформирования залежей нижнетриасового комплекса, это характерно для Вилюйской газоносной области в целом и проявляется, как правило, на площадях, где мономская свита опесчанена или имеет незначительную толщину.

В качестве контролирующих факторов, определивших особенности геологического строения, закономерности формирования, размещения и сохранности триасовых залежей Хапчагайского мегавала наряду со структурными, являются также изолирующие способности мономской глинистой покрывки, которые в совокупности с условиями глубин погружения залежей, высотой газового интервала при массивном характере насыщения, определили современное размещение залежей и высоту продуктивного интервала.

Наиболее качественным резервуаром, благодаря высоким изолирующим свойствам перекрывающей 80-100 метровой глинистой толщи неджелинской свиты нижнего триаса, считаются песчано-глинистые пермские отложения [5]. Для залежей верхнепермского продуктивного комплекса Хапчагайского вала характерной отличительной чертой является наличие аномально-высоких пластовых давлений (АВПД) с коэффициентом аномальности до 1,4.

3. Гидродинамические закономерности Усть-Вилюйского гидрогеологического района

На Усть-Вилюйской структуре промышленная газоносность установлена в отложениях нижнего и среднего лейаса (горизонты J1-1, J1-II и J1-III). Залежь продуктивного горизонта J1 - III залегает на глубине 1940-2030 м. Залежь пластовая сводовая, высотой 43 м. Дебиты газа до 2 млн. м³/сут. Содержание конденсата до 25 г/см³. Пластовое давление 19,9 МПа, пластовая температура +58°C (Кокоулин, 1972). На месторождении было пробурено 27 скважин, в т.ч. 20 разведочных и 7 эксплуатационных, общим метражом 106 тыс. пог. м. На Собо-Хаинском газовом месторождении пробурено 8 разведочных скважин общим метражом 13958 м.

Структурные планы данной территории, уточнены в полевой сезон 2014-2016 гг. (профиль р. Лена, АО «Росгеология») и по материалам Намского отчета (ФГБУ «ВНИГНИ», 2022).

По профилю р. Лена прослежены и стратифицированы следующие отражающие горизонты: J - близ кровли юрских отложений; Т-Р- вблизи подошвы юрских отложений; Р2 – внутривпермская граница; F - поверхность кристаллического фундамента. Ряд отражающих горизонтов прослежены не повсеместно. Волновая картина осложняется Китчанским надвигом и тектоническими нарушениями с большой амплитудой смещения. По результатам совместной интерпретации сейсмических профилей восточного обрамления Сибирской платформы и профиля р. Лена удалось значительно уточнить строение Китчанского выступа и смежных структур. В пределах Мунского свода и Китчанского надвига подстилающие меловой сейсмокомплекс юрские отложения выходят на дневную поверхность (Рисунок 3).

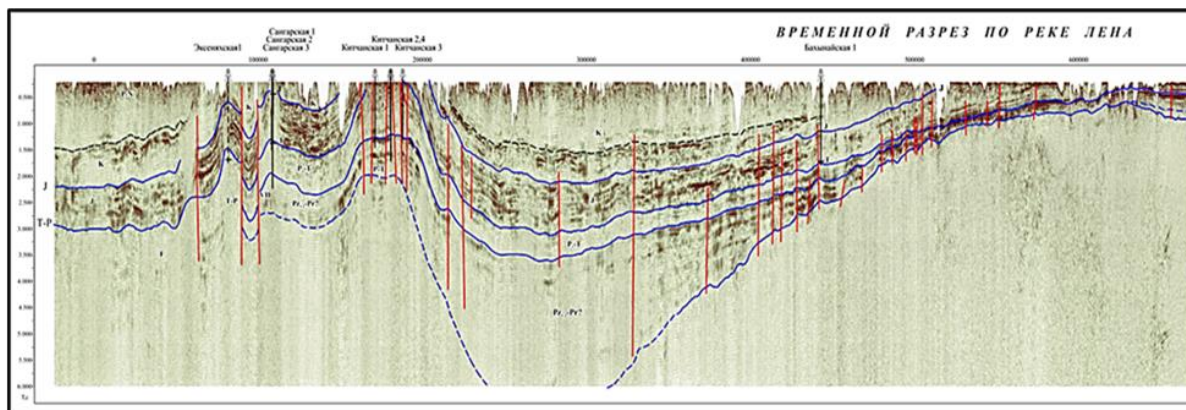


Рисунок 3 – Фрагмент сейсмического разреза по профилю р. Лена направление с юга на север вдоль Предверхоанского прогиба, Центральная часть, пограничная с Виллойской синеклизой (Китчанский выступ, Линденская впадина, Мунский свод). Временной интервал 6 сек. Протяженность 650 км.

Отдельное положение в группе структур Усть-Виллойского района занимают Бергеинская и Олойская структуры, осложняющие Берге-Олойский вал в зоне сочленения Виллойской синеклизы и Предверхоанского прогиба. Глубоким бурением до глубины 3980 м вскрыты песчано-глинистые угленосные отложения мела и верхней юры (Рисунок 4).

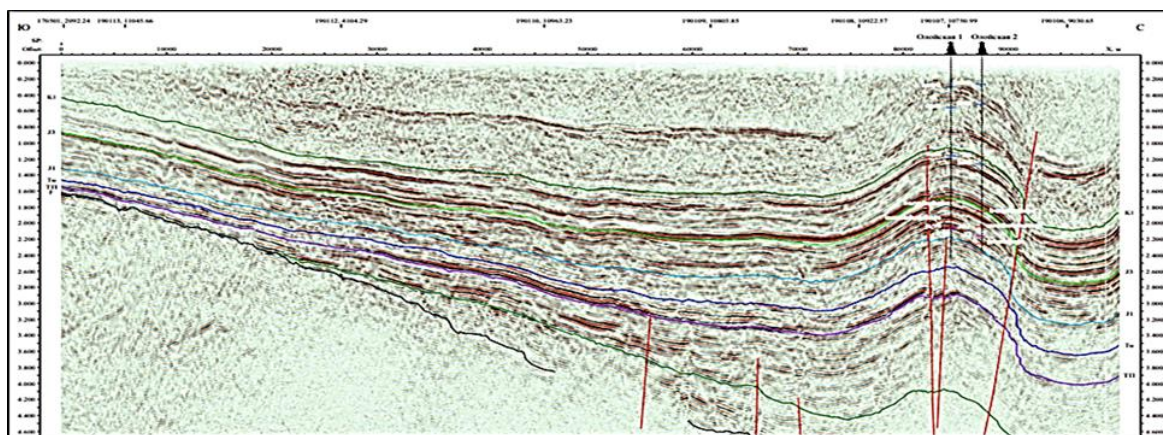


Рисунок 4 – Фрагмент временного разреза 190120. Олойская антиклинальная структура. Отметка глубины кровли по горизонту ТП – 5600 м. Протяженность профиля 100 км, направление Юг-Север.

В гидрогеологическом разрезе Усть-Виллойского района выделяются две обособленные гидродинамические зоны. Верхняя гидродинамическая зона прослеживается до глубин 500-700 м и вмещает юрско-меловые и средне-верхнетриасовые отложения в надвинутом крыле Китчанской структуры. Особенностью разреза верхней гидродинамической зоны является связь водоносных горизонтов с поверхностными водами через таликовые окна в относительно маломощной толще мерзлых пород. На левобережье р. Лены (Собо-Хаинская, Усть-Виллойская структуры) такими окнами служат подозерные и подрусловые талики (Грубов, 1961). На правобережье (Сангарская, Китчанская структуры) питание водоносных горизонтов верхней гидродинамической зоны осуществляется через участки тектонической и экзогенной трещиноватости пород на западных склонах Китчанской горной гряды. Площади Китчанской, Сангарской и, вероятно, Эксеняхской структур являются областью транзита с интенсивно промытой верхней частью разреза. Пьезометрическая поверхность понижается с северо-востока на юго-запад к области разгрузки под руслом р. Лена. Пластовые температуры понижены. Для поиска УВ эти отложения бесперспективны.

В нижнюю гидродинамическую зону входит триас-нижнеюрский водоносный комплекс, изолированный сверху региональным флюидоупором аргиллитов сунтарской свиты верхнего

лейаса. Здесь господствует упругий гидродинамический режим, обусловленный особенностями литогенеза, тектоническими движениями и внутрипластовыми перетоками глубинных флюидов. В целом, пластовые давления в водоносных горизонтах на 5-7 % выше условного гидростатического давления ($P_{пл}/P_{уг}=1,05\div 1,07$) - скважины нередко переливали. Значения приведенных давлений триас-нижнеюрского водоносного комплекса (плоскость сравнения – 3500 м) в Усть-Вилуйском районе на 1,2-1,5 МПа выше соответствующих давлений в центре Вилуйской гемисинеклизы. На схеме распределения приведенных пластовых давлений триас-нижнеюрского водоносного комплекса. Усть-Вилуйский район уверенно выделяется как пьезомаксимум (Сурнин, 1986).

4. Выводы

Современные структурные формы территории исследования и сопровождающие их гидродинамические режимы являются главными факторами для условий миграции и аккумуляции углеводородов. Определяющими эти процессы тектоническими элементами являются в первую очередь своды, мегавалы, структурные выступы, бортовые части замкнутых впадин и региональные моноклинали [6]. Для Предверхоаянского прогиба объектами исследования, прежде всего, являются Берге-Олойский вал и зона Китчанских поднятий. Примечательной особенностью вскрытого разреза на Бергеинской и Олойской структурах являются повышенные газопоказания и газопроявления, наблюдавшиеся в процессе бурения скважин в нижней части разреза (на глубинах более 2900 м). В составе метанового газа были установлены уникальные содержания тяжелых углеводородов (до 20%). Газонасыщенность рассолов и выходы газа могут свидетельствовать о наличии крупных залежей в отложениях пермо-триасового комплекса (проектная глубина скважин 6500 м).

5. Литература:

- [1] Berzin, A.G. Features of the placement of hydrocarbon deposits and the nature of geological structures in Western Yakutia. Novosibirsk: Nauka, 2011, 255 pp.
- [2] Kanygin A.V., Gonta T.V., Timokhin A.V. The origin of Paleozoic terranes of Northeast Asia: geological evidence of the split of the pericratonic margin of the Siberian paleocontinent and migration of its fragments // *Geology and Geophysics*, vol. 61, No. 11, pp. 1459-1476.
- [3] Kleimenov V.F., Kachalov Yu.M. Specificity of gas accumulation in the cryolithozone of the Far North regions // *Geochemical and geophysical methods of exploration, modeling and development of oil and gas fields. Collection of scientific works of VNIGNI*. - M.: 2001. – pp. 36-47.
- [4] Pogodaev A.V. The influence of the AVPD regime on the conditions of formation and preservation of gas deposits in the Upper Permian deposits of the Khapchagai megawall // *Oil and gas Geology. Theory and practice*, 2018, vol.13, No.4, pp 1-19.
- [5] The history of oil and gas formation and oil and gas accumulation in the east of the Siberian platform/ B.A. Sokolov, A.F. Safronov, A.An. Trofimuk, G.S. Fradkin, V.E. Bakin, et al. Moscow: Nauka, 1986, 167 pp.
- [6] Mikulenko K.I. Tectonics and problems of oil and gas potential of the boundary zones of the Siberian platform and folded regions / K.I. Mikulenko, K.V. Timirshin // *Russian geology*, 1997, No. 8, pp.24-28.

**ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ В РАЙОНЕ ПОСЕЛКА
МОХСОГОЛЛОХ ХАНГАЛАССКОГО РАЙОНА РЕСПУБЛИКИ САХА
(ЯКУТИЯ)**

Анна Полубелова¹, Надежда Павлова², Василий Огонеров²

¹ ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова»,
677000, Россия, г. Якутск, ул. Белинского, 58

² ФГБУН «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН»,
677010, Россия, г. Якутск, Мерзлотная, 36

**THE HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS OF THE TERRITORY
SURROUNDING THE MOKHSOGOLLOKH SETTLEMENT IN THE
KHANGALASSKY DISTRICT OF THE SAKHA REPUBLIC (YAKUTIA)**

Anna Polubelova¹, Nadezhda Pavlova², Vasily Ogonerov²

¹ North-Eastern Federal University, 58, Belinsky str., Yakutsk, 677000, Russia

² Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36, Permafrost str., Yakutsk, 677010, Russia

Abstract. In July of 2023 a groundwater discharge site was discovered in the exposed limestone strata along the Lena river valley, near the settlement of Mokhsogollokh. In order to determine the origin of the spring, the natural conditions of the territory have been researched. This study is based on published materials describing the geological structure of the area and the chemical composition of surface and ground waters, the data taken from the Melnikov Permafrost Institute archive on the hydrogeological and hydrocryological conditions of the area, and on the chemical analysis of water samples taken from the discovered source and the Lena River. Based on a comparative analysis on the chemical composition of various waters in the area it has been determined that the origin of the spring is linked to the thawing of ice wedges. Due to the ongoing change in climate, there is an increasing likelihood that the amount and flow rate of similar springs will grow. Considering that the second flood wave on the Lena River is formed in early summer by the waters of the active layer, a more in-depth study of groundwater springs like the one discovered is required.

1. Введение

На территории Центральной Якутии в среднем течении р. Лены источники подземных вод широко распространены на правобережье реки. Они, как правило, приурочены к подножию песчаной бестяхской надпойменной террасы р. Лены. Эти родники довольно подробно изучены и описаны в литературе [1-3]. Интерес к ним связан с их высокими дебитами (суммарно более 500 л/с), круглогодичной разгрузкой и хорошим качеством подземных вод. Источники образованы преимущественно водами надмерзлотно-межмерзлотного стока, фильтрующимися от областей питания по песчаным четвертичным отложениям и верхней трещиноватой зоне кембрийских известняков.

На левобережье р. Лены, напротив изученной области разгрузки межмерзлотных вод, наличия высокодебитных источников не установлено, но в летний период имеются небольшие выходы подземных вод, которые практически не изучены. Два из таких источников были обнаружены в 2023 г. в районе пос. Мохсоголлох в Хангаласском районе Якутии.

Целью исследований было охарактеризовать мерзлотно-гидрогеологические условия в районе пос. Мохсоголлох и выявить генезис обнаруженных источников. Для этого были изучены фондовые материалы Института мерзлотоведения СО РАН с результатами изучения геокриологических и гидрологических исследований в рассматриваемом районе, проанализированы опубликованные данные о геологическом строении территории, химическом

составе поверхностных и подземных вод, а также отобраны пробы воды из обнаруженного источника и р. Лены.

2. Результаты работ

Поселок Мохсоголлох расположен на левом берегу р. Лены в Республике Саха (Якутия), севернее пос. Верхний Бестях и южнее г. Покровск. На рассматриваемом участке р. Лена течет в пределах Приленского плато в неширокой долине, сложенной известняками, левый склон которой отвесно обрывается к урезу воды. На правобережье развита пойма шириной 4,0-5,5 км. Направление течения реки с юго-запада на северо-восток. Русло р. Лены имеет ширину около 2,5-3,0 км метров. Глубина реки составляет в среднем 3-5 м, достигая по фарватеру до 15-20 м. Река Лена относится к восточносибирскому типу рек. Водный режим рек этого типа отличается высоким весенним половодьем и паводками в теплое время года. В холодный период года отмечается устойчивая и продолжительная зимняя межень. В р. Лену на рассматриваемом участке впадают руч. Бестях, Сасабыт, Аллах, Покровка, сток в которых бывает только летом. В геологическом строении рассматриваемого района принимают участие известняки и мергели среднекембрийского возраста, их вскрытая мощность 80-240 м. Сверху они перекрыты четвертичными песками, супесями и суглинками мощностью до 33 м [4].

Территория исследований находится в зоне сплошного распространения многолетних мерзлых пород. Глубина сезонного протаивания пород составляет 1,5-2,0 метра [5]. Под р. Леной распространен сквозной талик. Существование его в районе г. Покровск было установлено экспедицией Гидропроекта при буровых работах в 1958 г. Скважинами глубиной 70-200 м, пробуренными на островах и в русле реки, пройдены песчано-галечниковые отложения мощностью до 27 м и подстилающие их трещиноватые кембрийские известняки [3]. Подрусловой талик от пос. Верхний Бестях и до г. Покровск относится к классу инфильтрационных. Поглощение речного стока на рассматриваемой отрезке р. Лены было зафиксировано при гидрологических измерениях в 1987-1988 г. гидрогеологами Центрально-Якутской геолого-съёмочной экспедиции [6]. Сквозной талик ограничен руслом р. Лены. По мере удаления от русла мощность многолетнемерзлых пород быстро увеличивается и уже в 40 м она составляет 105-141 м, в 140 м равна 171 м, в 1 км – 250 м, а на Приленском плато в верховье руч. Бестях достигает 400 м.

На водоразделах ручьев широко распространены повторно-жильные льды в суглинках и супесях [7]. Глубина их залегания изменяется от 2,3 до 4,0 метров, а мощность составляет 6-9 и более метров. Поверхность, где развиты повторно-жильные льды и отмечается высокая льдистость перекрывающих их пород, подвержена термокарстовым процессам. При протаивании таких отложений формируются термокарстовые озера. На рассматриваемой территории эти озера имеют площадь до 0,11 км² и глубину преимущественно от двух до четырех метров [8]. Надмерзлотные талики под озерами в районе пос. Мохсоголлох изучались Н.П. Анисимовой в 1962 г. По данным буровых работ было установлено, что максимальная мощность таликов под озерами составляет 17 м.

Подземные воды в пределах рассматриваемого района распространены в слое сезонного протаивания пород, в надмерзлотных подозерных таликах, сквозном подрусловом талике под р. Леной и под многолетнемерзлыми породами.

По результатам химических анализов, воды р. Лены обладают невысокой минерализацией, которая в период половодья не превышает 100 мг/л, в августе составляет около 160 мг/л, а зимой достигает максимального значения (390–560 мг/л). Химический состав речной воды гидрокарбонатно-хлоридно-натриевый (Рисунок 1), по водородному показателю воды нейтральные или слабокислые (рН=6,3-7,4).

Под р. Леной в четвертичных отложениях подземные воды имеют схожий химический состав с речной водой. В кембрийском водоносном горизонте в сквозном подрусловом талике минерализация воды составляет 600-700 мг/л, в анионном составе воды преобладают гидрокарбонат-ионы, а в катионном – ионы натрия [3].

В термокарстовых озерах в естественных условиях вода пресная или слабосоленая, ее минерализация изменяется от 500 до 1400 мг/л, химический состав гидрокарбонатный кальциево-магниевый [9]. На территории г. Покровск соленость озерной воды превышает 2000 мг/л, а химический состав гидрокарбонатно-хлоридный натриевый [8].

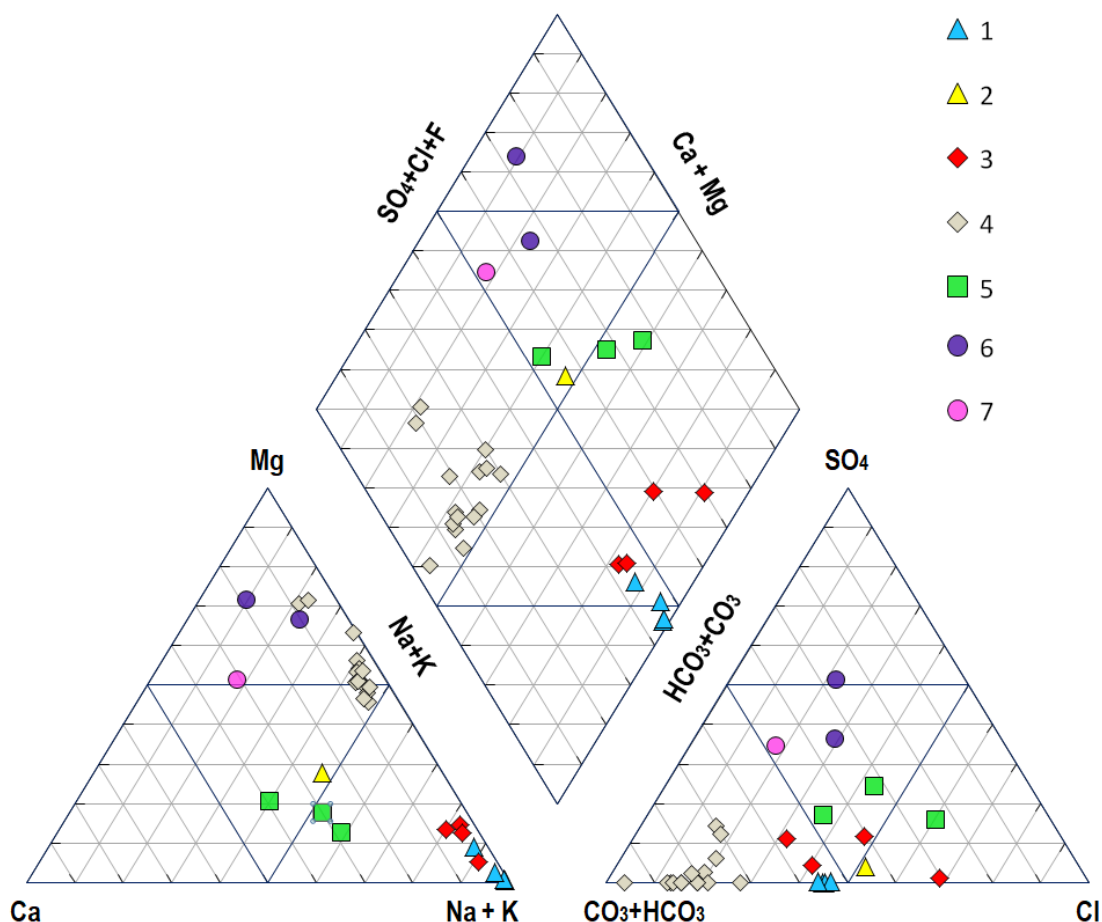


Рисунок 1 – Пайпер-диаграмма химического состава поверхностных и подземных вод в районе исследования:

- 1 – подмерзлотные воды кембрийских отложений, 2 – воды четвертичных отложений подруслового талика р. Лены, 3 – воды озер на территории г. Покровск, 4 - воды озер в окрестностях пос. Мохсоглолох,
- 5 – воды р. Лены, 6 – расплав повторно-жильных льдов с включениями грунта,
- 7 – источник подземных вод.

В таликах под озерами минерализация воды выше, чем в озере в 1,5-2,0 раза без изменения химического типа. В промерзающих таликах содержание растворенных веществ в воде может достигать 4000 мг/л, а химический состав преобразуется до сульфатно-магниевый.

По данным Н.П. Анисимовой, в районе пос. Мохсоглолох, расплавы чистых повторно-жильных льдов по величине минерализации (40-70 мг/л) ультрапресные. Их анионный состав гидрокарбонатный, содержание главных катионов примерно равное. Вода, образующаяся при таянии сегрегационного льда, при взаимодействии с вмещающим грунтом обогащается водорастворимыми солями, в результате чего ее минерализация может достигать 1200 мг/л, а в ее составе преобладающими становятся сульфат-ионы и ион магния.

Подмерзлотные воды вскрыты скважинами на пойме и низкой надпойменной террасе р. Лены на глубинах 141-175 м. Они содержатся в трещиноватых известняках и доломитах кембрийского возраста [10]. Подмерзлотные воды обладают напором. Их уровни в скважинах устанавливаются на глубине 40-48 м, что соответствует абсолютным отметкам 92,5-95,5 м. Химический состав подмерзлотных вод хлоридно-гидрокарбонатный натриевый, а

минерализация равна 1320 мг/л по величине $pH=8,1$ воды слабощелочные, содержат фтор в количестве 6-8 мг/л.

Подмерзлотные воды кембрийский отложений изучались также в пос. Верхний Бестях и г. Покровск [11]. На этой территории в хлоридно-гидрокарбонатных водах концентрации сероводорода достигают 163 мг/дм³, что позволяет считать их минеральными сульфидными. Формирование состава воды происходило в восстановительных условиях, а время ее нахождения в недрах, определенное гелиево-аргоновым методом, ориентировочно составляет 0,5 млн. лет.

Надмерзлотные воды в сезонноталом слое маломощны, быстро промерзают и истощаются.

В июле 2023 г. в обрывистом склоне долины р. Лены были обнаружены два выхода подземных вод. Высачивание происходило из известняков на 5-6 м выше поймы р. Лены. По данным химического анализа, вода обладает повышенной минерализацией – 1297,3 мг/л, ее анионный состав смешанный (с преобладанием гидрокарбонатов), катионный состав представлен в основном ионами магния и кальция, $pH=7,5$, содержание фтора 0,6 мг/л. По химическим показателям вода обнаруженного источника близка к химическому составу расплава, образующемуся при оттаивании сильнольдистого грунта.

На аэроснимке прослеживается увлажненное понижение в рельефе, берущее начало от заболоченного участка около дороги и ориентированное в сторону р. Лена (Рисунок 2). Из этого снимка можно предположить, что вода к месту ее выхода поступала по этой ложбинке.



Рисунок 2 – Местоположение источника подземных вод

3. Заключение

Таким образом, обнаруженный очаг разгрузки подземных вод, по всей видимости, связан с протаиванием льдистых грунтов. В условиях отмечаемого потепления климата вероятность увеличения количества и дебита таких родников возрастает. Учитывая, что в начале лета происходит формирование второй волны паводка на р. Лены за счет вод сезонноталого слоя, требуется более углубленное изучение родников, подобных обнаруженному.

4. Благодарности

Анализ результатов мерзлотно-гидрогеологических исследований выполнен в рамках НИОКТР 122012400106-7 «Подземные воды криолитозоны: закономерности формирования и режима,

5. Литература:

- [1] Voitsov, A.V., Regime of freshwater springs in Central Yakutia in the context of ecology of transport related construction // in Permafrost Zone and Groundwater of Siberia, Part 2. Yakutsk: Permafrost Institute SB RAS, 1996, pp. 46–62.
- [2] Shepelev, V.V., Suprapermafrost water in permafrost zone. Novosibirsk: Geo, 2011, 169 pp.
- [3] Anisimova, N.P. Pavlova, N.A., Hydrogeochemical studies of permafrost in Central Yakutia. Novosibirsk: Geo, 2014, p.189.
- [4] Kopylov T. T., The geologic map of pre-Quaternian rocks, page P-52-XXII, edit. V. R. Tumanov, Yakutskgeologiya <https://rasterdb.vsegei.ru/img.php?id=60526> (date of access 22.01.2024).
- [5] Permafrost-Landscape map of Yakutia on a scale of 1:1 500 000 / Fedorov A.N., Torgovkin Y.I., Shestakova A.A., Vasilyev N.F., Makarov V.S, etc. 2017 <http://mpi.ysn.ru/images/mlk20182.pdf> (date of access 22.01.2024).
- [6] Groundwater Monitoring in Cryolithozone / V.T. Balobaev, V.V. Shepelev, Eds. Yakutsk: Inst. merzlotovedeniya SO RAN, 2002, 172 pp.
- [7] Ivanov, M.S. Cryogenic Structure of Quaternary Deposits in Lena–Aldan Depression). Novosibirsk: Nauka, 1984, 125 pp.
- [8] Arzhakova S.K., Zhirkov I.I., Kusatov K.I., Androsov I.M. Rivers and Lakes of Yakutia. Yakutsk Bichik, 2007, 132 pp.
- [9] Anisimova, N.P., Formation of Groundwater Chemistry in Taliks: Case Study of Central Yakutia, Moscow: Nauka, 1971, 195 pp.
- [10] Balobaev, V.T., Ivanova, L.D., Nikitina, N.M., Shepelev, V.V., Lomovtseva, N.S., and Skutin, V.I., Groundwater of Central Yakutia and Perspectives of Its Use, Novosibirsk: Geo, 2003, 137 pp.
- [11] Beletsky V.L., Kyrbasov P.V., Saltwater in the middle Cambrian sediments of the area near the Lena river. // Hydrocryological and hydrogeological research of Siberia, Yakutsk: Yakutskoye knizhnoye izdatelstvo, 1972, pp.164-167.

СПОСОБ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЙ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ОСНОВАНИЯ ШТАБЕЛЯ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ

Владимир Попов

ФГБУН «Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр. Ленина, 43

METHOD FOR PROVIDING TEMPERATURE CONDITIONS WHEN ORGANIZING THE FOUNDATION OF A LEACHING STACK IN CRYOLITHOZONE CONDITIONS

Vladimir Popov

Chersky Mining Institute of the North, SB RAS, 43, Lenin ave., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. For the effective implementation of the chemical processes necessary for leaching, it is recommended to maintain the temperature of the stack in the positive region. When laying the base of a stack, volumes of soil with a negative temperature may fall into it. To prevent freezing of the lower horizons of the stack, it is proposed to use chemical reagents containing quicklime. The results of mathematical modeling determined the concentrations of reacting reagents and the dynamics of the temperature field in the base of the stack, ensuring the complete thawing of frozen volumes and the stability of the leaching process in the stack.

1. Введение

Реализация круглогодичного функционирования производств по кучному выщелачиванию металлов в условиях Крайнего Севера, предполагает проведение работы при отрицательных температурах среды и в мерзлых грунтах. Для эффективного осуществления необходимых при выщелачивании химических процессов температура штабеля должна находиться в положительной области. При заложении основания штабеля в него попадают объемы грунта, имеющие отрицательную температуру. В зависимости от их наличия и количества в теле штабеля возможно перекрытие фильтрационных путей для рабочего раствора и аварийный выход раствора на боковую грань штабеля. Одним из распространенных профилактических методов борьбы с подобными негативными проявлениями является оттаивание мерзлых грунтов при их отрицательной температуре путем инъектирования в их объемы концентрированных водных растворов солей, безводных сжиженных и газообразных химических реагентов способных активно взаимодействовать со льдом и предохранять оттаянные грунты от возможного последующего замерзания [1]. Как показывают результаты изучения опытов развитых стран мира - наиболее эффективным оказался метод оттаивания грунтов при отрицательных температурах с применением химических реагентов.

2. Построение математической модели

Представляется следующей физической картина рассматриваемого процесса оттаивания мерзлых объёмов грунта основания штабеля для выщелачивания. При укладке основания штабеля в его объем помещаются пакеты с негашеной известью. На основании результатов работы [1] выбран следующий состав трехкомпонентной смеси химических реагентов с использованием негашеной извести. Исследуемые составы химических реагентов состоит из негашёной извести- (CaO), хлорид кальция CaCl , и хлорид натрия NaCl . Добавление последних двух компонентов вызвано необходимостью продлить время нахождения грунта в незамершем состоянии после окончания реакции разогрева грунта. Выбор указанного состава обоснован с учетом их специфических химических свойств и особенных реакции при взаимодействии с водой и мерзлым грунтом [1]. Негашёная известь – наиболее распространенный и доступный

строительный материал и широко использующийся в строительстве. Его основные активные составляющие – CaO превращается в Ca(OH)₂ при взаимодействиях с влажной средой или водой. Этот процесс происходит с самопроизвольным выделением тепла. Для расчетов использовались свойства стандартной порошкообразной медленногасящейся негашеной извести 1 сорта по ГОСТ 9179-2018 «Известь строительная. Технические условия». Содержание активных CaO + MgO, не менее 90%. На рисунке 1 представлено расположение брикета с известью в рудном штабеле.

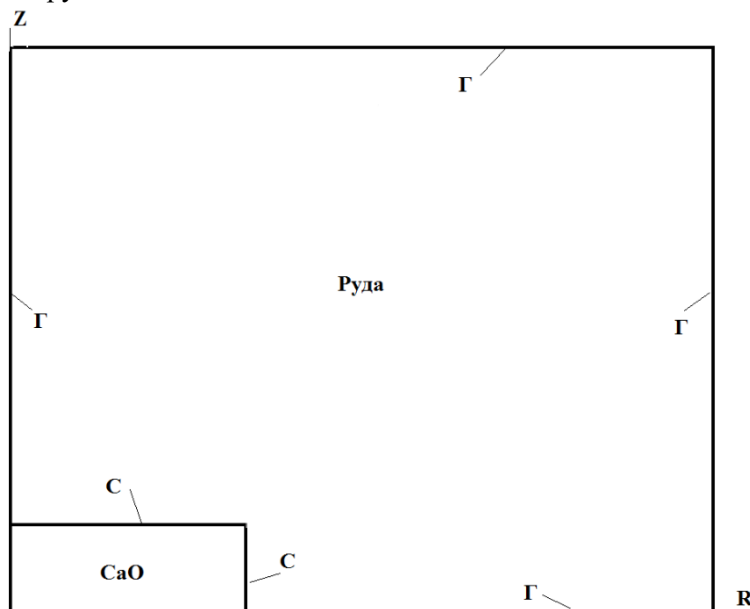
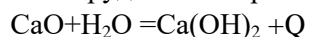


Рисунок 1 – Распределение включения извести в теле штабеля

Задача формулируется в цилиндрических координатах, на границах Γ ограниченной области тепловые потоки и влажностные равны нулю. На внутренней границе брикета C происходит диффузионный тепло и массообмен извести с рудным материалом. В соответствии с реакцией:



в зависимости от наличия влаги происходит выделение тепла Q в размере 64,88 кДж/моль.

Реакции подобного рода называются диффузионноконтролируемыми и представляют собой сопряженный процесс. Диффузионный поток влаги J_d суммируется по всей поверхности контактного контура C .

$$(1) J_{sd} = \sum c_i J_{id}$$

И скорость реакции гашения извести W моль/сек будет равна:

$$(2) W = k J_{sd}$$

Для задач диффузионного тепломассопереноса граничным условием на внешнем контуре Γ (рисунок 1) будет равенство нулю потоков влаги и тепла. На внутреннем контуре, разделяющем рудную массу и брикет извести, примем равенство нулю значения влагосодержания на контурной границе C . Результаты расчетов показали немонотонную зависимость мощности источника тепла от времени процесса и начального влагосодержания.

3. Выводы

Результаты расчетов соответствуют описанию процесса гашения извести в дисперсном материале, имеющем первоначально отрицательную температуру. Принятый алгоритм расчета процесса химического взаимодействия даже в случае отсутствия теплового эффекта может быть применен к моделированию химических превращений для реакций выщелачивания металла.

4. Литература:

- [1] Jusupbekov A.J., Montaeva A.C., Shakeshev B.T., Narikov K.A. Primenenie energoeffektivnih himicheskikh reagentov v processe lokalnogo ottaivaniy sezonno merzlih gruntov // QazBSQAKhabarshysy. Kurylys design and materials. No2 (84), 2022, pp. 229-238. <https://orcid.org/0000-0001-6459-140X>.

К ВОПРОСУ СОХРАНЕНИЯ СЫПУЧИХ СВОЙСТВ ПРОМЕРЗАЮЩИХ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Владимир Попов

ФГБУН «Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр. Ленина, 43

ON THE ISSUE OF PRESERVING THE BULK PROPERTIES OF FREEZING DISPERSE MATERIALS

Vladimir Popov

Chersky Mining Institute of the North, SB RAS, 43, Lenin ave., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. For industrial and transport industries, it is of great importance to solve the problem of freezing of wet bulk materials when transporting them in winter. A significant share of the total volume of transportation of these goods freezes. Therefore, the development of methods for predicting the thermal regime of bulk cargo, measures to prevent their freezing and restore flowability is an important task. This work is related to testing and testing the capabilities of mathematical modeling and forecasting the dynamic processing of bulk cargo stored in open areas under conditions of applying influences (mixing) that prevent their complete or partial freezing. A mathematical model has been presented and tested that makes it possible to study and solve practical problems related to the contact and thermal interaction of mixed or fragmented bulk materials in the presence of phase transformations, which ensures the determination of the start time of mixing and the required number of repetitions depending on the conditions set.

1. Введение

В результате смерзания сыпучих грузов возникают различные вне регламентные затруднения при проведении погрузочно разгрузочных работ. Так происходит увеличение времени на технологические работы с сыпучим грузом, его неполная выгрузка в результате примерзания к стенкам транспортных сосудов и повреждение последних. Выбор того или иного профилактического средства борьбы со смерзанием прежде всего определяется экономической эффективностью его применения, видом груза и технологией его переработки. В условиях устойчивых морозов эффективной мерой предохранения насыпных грузов от смерзания в вагонах в пути следования является предварительное (до погрузки) промораживание груза путем многократного пересыпания (перелопачивания) его массы экскаватором, скрепером, грейферным краном или другим механизмом. При этом необходимо, чтобы частицы груза возможно лучше обветривались наружным воздухом. Промораживание, можно считать законченным после того, как в середине слоя пересыпаемого груза температура понизится до -3°C и ниже. Промораживают груз и без пересыпания. Для этого его выкладывают на площадке слоем толщиной 300-500 мм и выдерживают на морозе. Промораживание особенно эффективно при устойчивых морозах в пункте погрузки и по маршруту следования.

2. Построение математической модели

На основе математической модели промерзания слоя сыпучего груза проведен сравнительный анализ промерзания слоя в естественных (ненарушаемых) условиях и при перемещивании при различных значениях температуры замораживания (среды) и влажности материала слоя. Критерий сравнения заключается в установлении целевой функции процесса промерзания слоя груза, учитывающей время промораживания при фиксированных температурах среды охлаждения и затраты на осуществление операций перемешивания - перемещение перемешивающего механизма - расчет пробега по площадке складирования, затраты на его обслуживание. На первом этапе в качестве целевой функции предлагается выбор суммы

квадратов отклонения температуры $T(i)$ элементов слоя груза от задаваемой температуры среды T_{cp} .

Решается одномерная задача теплопроводности с фазовым переходом по высоте штабеля. Возможна ситуация, когда при некоторых сочетаниях высоты штабеля и температур охлаждающей среды (воздуха) время промерзания выйдет за пределы установленного диапазона (1 сутки). В этом случае необходимы дополнительные управляющие процессы, интенсифицирующие смерзание груза в объеме штабеля. В качестве такого процесса выбрано перемешивание слоя груза. Его расчетным аналогом является осреднение температуры по высоте и продолжение счета с неизменными краевыми условиями. Расчетной задачей является выбор момента перемешивания при условии минимального их количества.

Составим функцию влияния (чувствительности) для отслеживания процесса смерзания груза в штабеле.

$$(1) B_j = \sum_{i=1}^{i=N} (T_{ij} - T_{sr})^2 \Delta t$$

На рисунке 1 представлен график процесса замораживания слоя руды толщиной 0,2 м. при начальной температуре слоя $+5^\circ\text{C}$ и температуре среды охлаждения (воздуха) -20°C . Поведению индикатора процесса уравнение (1) соответствует процесс промерзания лишь за счет теплопроводности материала слоя (график 1) при отсутствии любых других воздействий. График № 2 соответствует одномоментному воздействию перемешивания через каждый час. Общее время процесса составляет 50 часов.

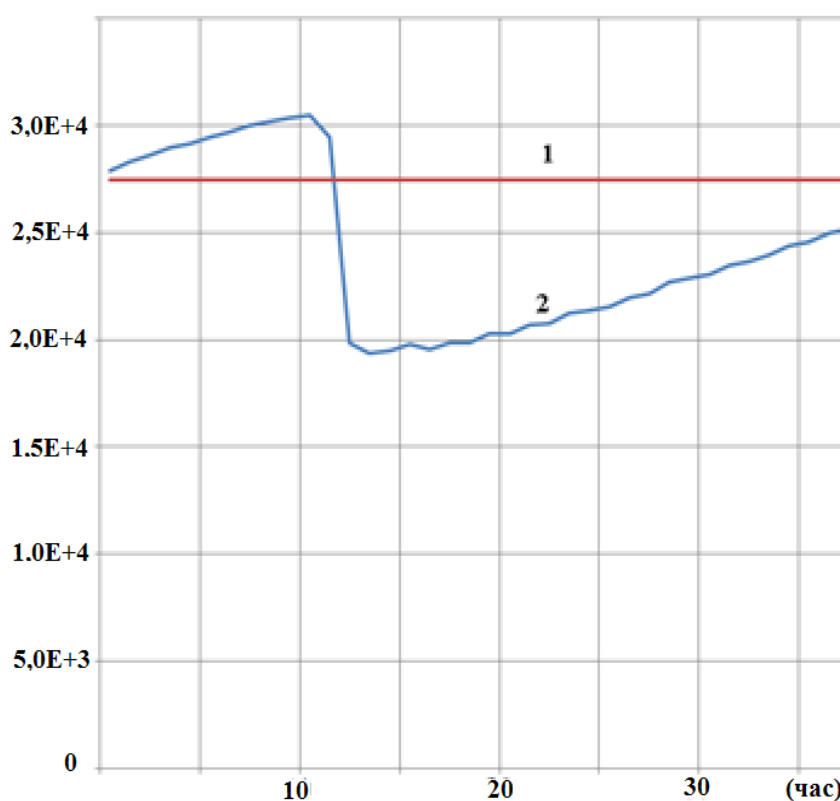


Рисунок 1 – Изменение целевой функции для различных значений момента включения перемешивания

На рисунке 2 представлены результаты расчета промораживания с перемешиванием при различных вариантах времени включения перемешивания.

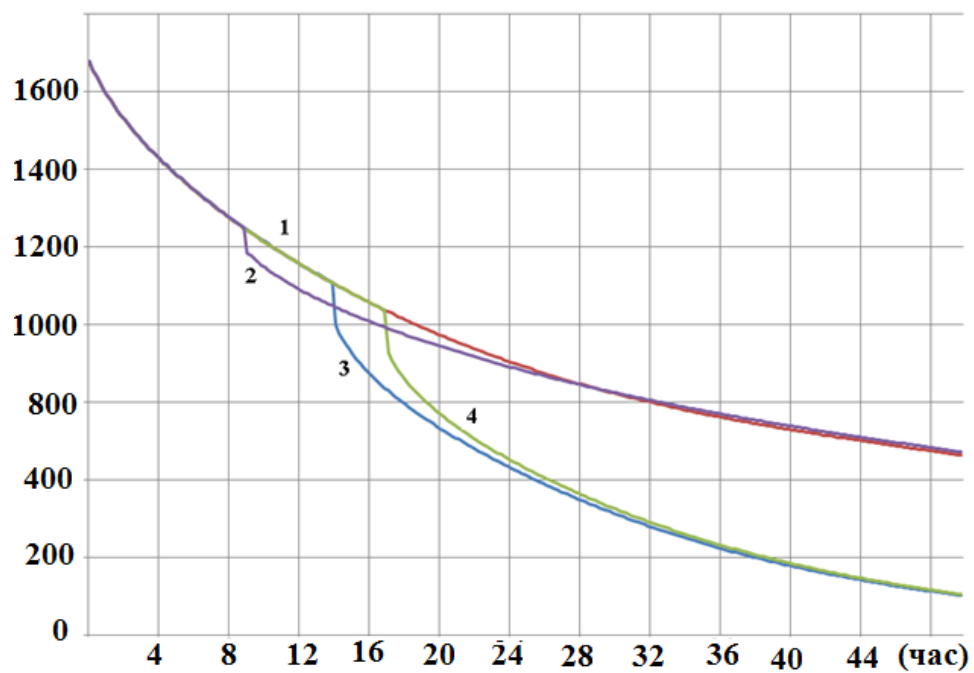


Рисунок 2 – Значения целевой функции при охлаждении за счет теплопроводности (1); с добавлением перемешивания через 9 часов после начала процесса (2); с добавлением перемешивания через 14 часов после начала процесса (3); с добавлением перемешивания через 17 часов после начала процесса (4)

3. Выводы

Результатами расчетов установлено, что при конкретных значениях температуры среды - 20°C и толщине слоя, подготовленного к проморозке равного 0,2 м., эффективное время для однократного перемешивания начинается с момента процесса равного 14 часов, когда примерно 33% толщины слоя будет проморожено.

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ РИСКА СКЛАДИРОВАНИЯ ЖБО СЕЛА БОРОГОНЦЫ (ЦЕНТРАЛЬНАЯ ЯКУТИЯ)

Владимир Попов, Ольга Васильева, Ангелина Донская
ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова»,
677000, Россия, г. Якутск, ул. Белинского, 58

GEOECOLOGICAL RISK FACTORS OF STORAGE OF LIQUID HOUSEHOLD WASTE IN THE VILLAGE OF BOROGONTSY (CENTRAL YAKUTIA)

Vladimir Popov, Olga Vasilyeva, Angelina Donskaya
North-Eastern Federal University, 58, Belinsky str., Yakutsk, 677000, Russia

Abstract. The article considers the natural conditions of the place of storage of liquid household waste in the village of Borogontsy in Central Yakutia in the alas basin, separated from the valley of the Burkhaanai stream, which flows into the world's largest alas Myuryu with the lake of the same name by a small bridge. Lake Myuryu has the status of a unique natural object with a special regime of use and protection. It is shown, based on earth.google satellite imagery dithering of different years, on the probability of the destruction of the cofferdam and the flow of liquid waste into the stream. The main risk factors for the development of catastrophic geocological processes are determined.

1. Введение

Село Борогонцы с населением порядка 6 тысяч человек – административный центр Усть-Алданского района Республики Саха (Якутия) расположен на территории крупнейшего в мире аласа Мюрю, площадью около 60 км² на Лено-Алданском междуречье в физико-географической стране Средняя Сибирь на фрагменте Центральнаякутской равнины в 103 км на северо-восток от г. Якутска. Здесь располагается крупное озеро Мюрю, которое согласно Указа Президента Республики Саха (Якутия) от 16 августа 1994 г. № 836 «О введении особого режима пользования и охраны уникальных озер Республики Саха (Якутия)» имеет статус особо охраняемой природной территории республиканского значения. В последние годы увеличивается количество благоустроенных объектов в с.Борогонцы, что определяет необходимость удаления жидких бытовых отходов (ЖБО), их складирование производится в термокарстовой котловине аласа (далее алас ЖБО) на северо-западной окраине части аласа Мюрю, по правой стороне нижнего течения руч. Бурхаанай (Рисунок 1).



Рисунок 1 – Местоположение места складирования ЖБО

2. Результаты исследований

Алас ЖБО по морфологии его котловины находится все еще на стадии своего развития – дюёдя. Расстояние между его бортами и аласом Мюрю составляет 710 м. До места складирования можно добраться по грунтовой дороге, на которую можно выехать от основной дороги «Борогон», расстояние от нее составляет один километр. Большой частью дорога проходит по долине ручья Бурхаанай, стекающего в алас Мюрю и, в конечном счете, в озеро Мюрю (Рисунок 2). Котловину аласа ЖБО и долины ручья разделяет перемычка высотой до 6 – 8 метров, в узкой части можно сказать – это практически тело грунтовой дороги. Южнее перемычка пока еще является реликтом межаласного рельефа, поросшего лиственничным лесом, шириной до 60 метров. При этом в настоящее время уровень воды в озере значительно выше ложа долины ручья порядка 15 м. Питание озера связано с таянием снега весной и атмосферными осадками, а также техногенными водами жидких бытовых отходов.

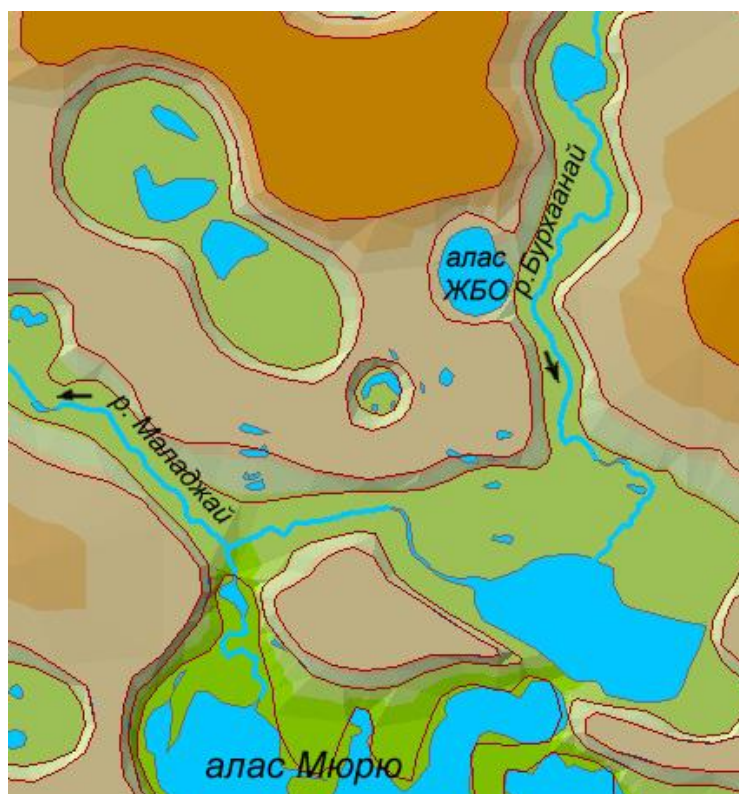


Рисунок 2 – Модель рельефа и гидрографической обстановки

По сути, вся территория изначально представляла собой плоскую равнину, насыщенную породами ледового комплекса – едому, льдистость колеблется от 0,4 до 0,8 долей единицы, обычно наличие повторно-жильных льдов разной мощности [1, 2]. Преобладающими породами верхних горизонтов четвертичных отложений является алеврит. Основные криогенные процессы: термокарст, морозобойное растрескивание, пучение, солифлюкция на склонах. По мере развития процессов термокарста и термоэрозии рельеф территории стал иметь котловинно-долинный вид, покрытый лиственничными лесами на межаласьях и луговой растительностью в понижениях [3]. Глубина вреза долин и аласов до 20 – 25 м.

Площадь аласа по ее бровке по историческим космическим снимкам earth.google [4] растет, в 1985 году было 1,2 км², в 2015 году – 1,3 км², в 2022 году – 1,4 км² (Рисунок 3). Можно также констатировать, что растет и скорость процесса термокарста, скорее всего это связано с техногенным воздействием, как складирование ЖБО. Так как первый промежуток времени составляет 30 лет, площадь увеличилась на 0,1 км², теперь увеличение площади на 0,1 км² произошло за 7 лет, хотя несомненно и то, что основной прирост произошел в районе сброса отходов, где процесс термокарста дополняется процессами термоэрозии в результате слива

жидкости. На космоснимках (Рисунок 3) также видно, что имеет место быть уменьшение ширины перемычки между аласом и долиной ручья, покрытой лесом.



Рисунок 3 – Космоснимки разных лет с источника Google Earth

Основными факторами развития процесса разрушения перемычки между аласом ЖБО и долиной ручья Бурхааная являются:

- высокая льдистость отложений;
- грунт, представленный лессовидными суглинками и супесью;
- климатические и погодные условия;
- техногенное воздействие, связанное со складированием жидких и твердых отходов.

Высокая льдистость определяет возможность термокарста и термоэрозии, ведущих к вытаиванию подземных льдов с последующей просадкой грунта и формированию отрицательных форм рельефа. Определяющим этот процесс являются температура грунтов в годовом цикле, при положительных температурах грунта лед будет таять, жидкая вода насыщать лессовидный суглинок, имеющий высокие показатели пористости. Он во влажном состоянии становится пластичным, текучим, что формирует склоновые и эрозионные процессы: солифлюкцию, эрозию, оврагообразование. Эти процессы идут достаточно интенсивно, что хорошо видно на склоне со стороны аласа.

3. Выводы

Участок складирования бытовых жидких и твердых отходов с.Борогонцы, представляет собой термокарстовую котловину, не завершившую свое природное развитие в зрелый алас, таким образом процесс расширения его котловины не завершен. Алас ЖБО отделен от долины ручья Бурхааная небольшой перемычкой, понижение его гипсометрических отметок или полное разрушение – вопрос времени, связанное с количеством вывозимого ЖБО, осадками и температурой воздуха. Таким образом в настоящее время необходимо констатировать высокий геоэкологический риск загрязнения ручья Бурхааная и уникального озера Мюрю.

4. Литература:

- [1] Ivanov M.S. Cryogenic structure of quaternary sediments of the Leno-Aldan depression. – Novosibirsk. – Nauka. – 1984. – 125 p. (translated from English).
- [2] Bosikov N.P. Evolution of the Alas of Central Yakutia. – Yakutsk. – Publishing house of IMZ SB RAS. – 1991. – 128 p. (translated from English).
- [3] Torgovkin Ya.I., Shestakova A.A. Spatial analysis of cryogenic relief forms of the northern part of the Leno-Amginsky interfluvium (on the example of the Alas of Ust-Aldan ulus) // Bulletin of the Northeastern Federal University named after M.K. Ammosov. The Earth Sciences series. – 2019. – No.4. – pp.102-112. (translated from English).
- [4] <https://earth.google.com>

РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАБОТ ПО ИЗУЧЕНИЮ СУБАЭРАЛЬНЫХ НАДМЕРЗЛОТНЫХ ТАЛИКОВ РАЙОНА РЕКИ ШЕСТАКОВКА, ЦЕНТРАЛЬНАЯ ЯКУТИЯ

Сергей Попов^{1,2}, Марина Кашкевич¹, Наталья Романова³, Алиса Мальшева¹, Людмила Лебедева^{2,1}

1 ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет» Институт наук о Земле
199034, Россия, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7–9

2 ФГБУН «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН»,
677010, Россия, г. Якутск, Мерзлотная, 36

3 ООО «ГеофизПоиск», 199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 26 линия,
15, корп. 2, лит. А

RESULTS OF GEOPHYSICAL INVESTIGATIONS TO STUDY SUBAERIAL SUPRA PERMAFROST TALIKS IN THE AREA OF THE SHESTAKOVKA RIVER, CENTRAL YAKUTIA

Sergey Popov^{1,2}, Marina Kashkevich¹, Natalia Romanova³, Alisa Malysheva¹, Liudmila Lebedeva^{2,1}

1 Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg State University, 7-9, University nab. St. Petersburg,
199034, Russia

2 Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36, Permafrost str., Yakutsk, 677010, Russia

3 GeophysPoisk LLC, 15, bldg. 2, lit. A, 26th line Vasilievsky island, St. Petersburg, 199106, Russia

Abstract. Complex geophysical investigations to study subaerial taliks and permafrost in the experimental area of Left Shestakovka basin (Central Yakutia) were carried out in Autumn of 2023. They included GPR research and CDP sounding, as well as electrical prospecting. It was founded that the depth of the talik on the right flank of the river is range from 2 to 14 meters, with an average depth of 6.1 m. Its depth on the left flank of the river varies from 3 to 7.1 meters, with an average value of 4.2 m. The electrical survey was indicated that the near-surface layer is characterized by resistivity variations from 590 to 4459 $\Omega \cdot m$. Its thickness is about 2 m. The next layer with a thickness of 3 – 5.5 m, has resistivity from 100 to 267 $\Omega \cdot m$, and can be associated with talik. The third layer is determined by increasing the resistivity to 2049 $\Omega \cdot m$, which is typical for permafrost. The lowest layer is characterized by decreasing the resistivity to values of about 221 $\Omega \cdot m$. This is can be associated with lithological composition or with groundwater.

1. Введение

Криолитозона покрывает большую часть территории нашей страны, занимая при этом практически всю Сибирь. Текущие климатические изменения приводят к её постепенной деградации [1], что сказывается в том числе и на хозяйственной деятельности. Поэтому комплексное изучение криолитозоны является актуальной насущной задачей, не только в научном, но и в прикладном аспекте. Талики являются важной частью криолитозоны. Они представляют собой толщи осадочных горных пород, находящихся в талом состоянии на протяжении более одного года, и окружённые многолетнемерзлыми или сезонно-мёрзлыми породами. Интерес к изучению таликов обусловлен их влиянием на процессы теплопереноса, протекающие в криолитозоне. Их исследование выполняется как путём термометрического мониторинга в скважинах, так и геофизическими методами. При этом особое место, в силу своей мобильности и эффективности, заняли георадиолокация и электроразведка [2].

Эти виды работ на протяжении длительного времени выполняются сотрудниками Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН на специально созданных для этого

стационарах [3,4]. Работы, о которых излагается ниже, являются логическим продолжением планомерных комплексных исследований процессов, протекающих в криолитозоне Центральной Якутии.

2. Район работ и методика их выполнения

Экспериментальный участок «Левая Шестаковка» занимает территорию около 1 км², и расположен в бассейне одноимённой реки, левого малого притока реки Лены, на пологом склоне денудационной равнины с абсолютными высотами 190–210 м. Комплексные геофизические исследования в этом районе выполнялись в период с 29 августа по 4 сентября 2023 г. Они включали в себя георадарное профилирование, зондирование методом ОГТ и вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ). Схема расположения работ представлена на Рисунке 1.

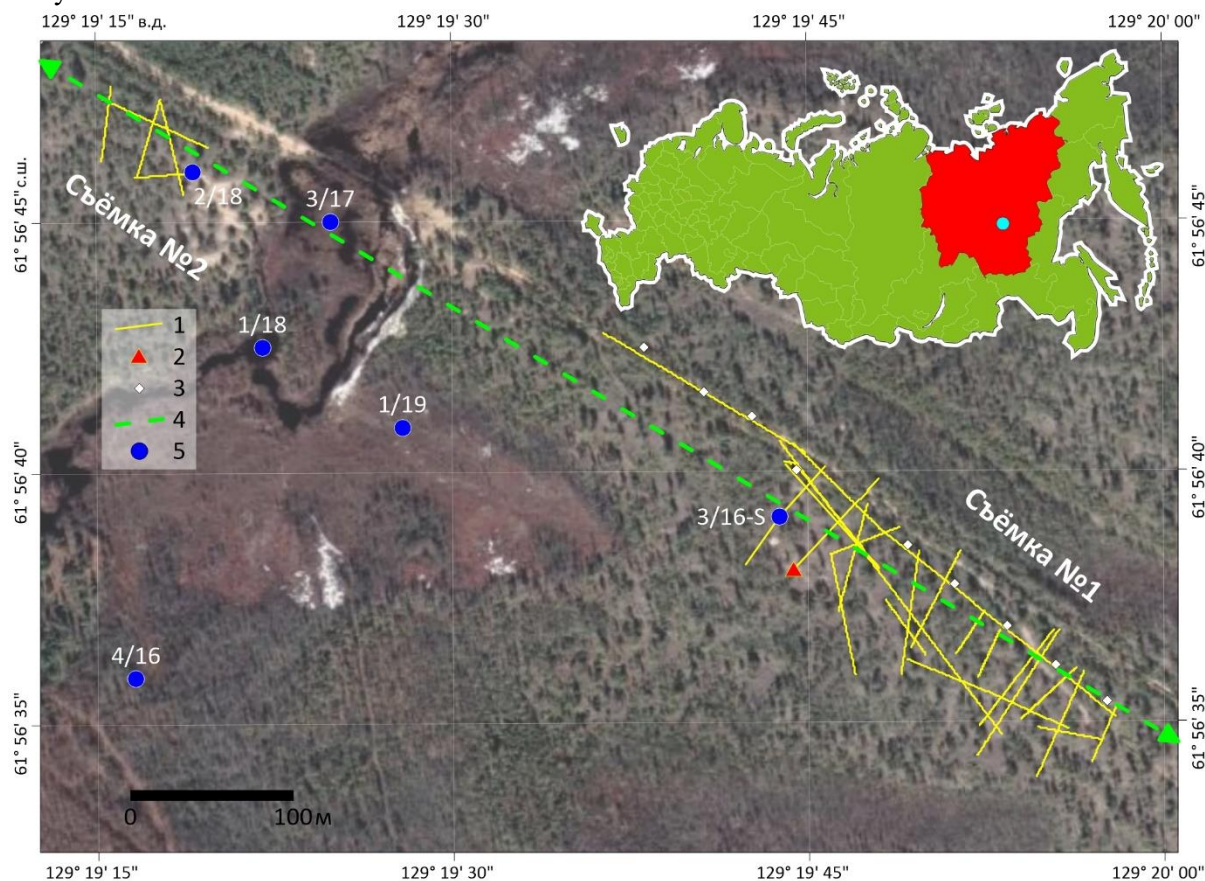


Рисунок 1 – Схема расположения района работ на участке «Левая Шестаковка».

1- георадарные маршруты; 2- пункт зондирования ОГТ; 3- пункты ВЭЗ; 4- фрагмент профиля электротомографии [3]; 5- положение термометрических скважин.

Георадарное профилирование предварялось зондированиями ОГТ для определения скоростных параметров среды. Они выполнялись георадаром ОКО-2 (ООО «ЛогиС», Россия) с раздвижными антеннами АБ-150 (частота зондирующих импульсов 150 МГц). По опыту аналогичных работ, хорошие результаты на используемой аппаратуре могут быть получены при шаге разноса 20 см. К сожалению, ввиду наличия рельефных целевых границ в районе скважины 3/16-S, работы ОГТ выполнялись на удалении 35 м от неё (Рисунок 1), на участке субгоризонтального залегания слоёв. Обработка данных осуществлялась в рамках модели слоисто-наклонной среды [5]. Полученным годографам соответствуют эффективные диэлектрические проницаемости 10 и 63 единиц сред, в интервале глубин 0 – 2.2 м, и 2.2 – 4.7 м.

После завершения работ ОГТ выполнялось георадарное профилирование на участках, расположенных на обоих берегах реки Левая Шестаковка (Рисунок 1). В исследованиях

использовался тот же прибор, что и при зондированиях ОГТ. Были проанализированы временные георадарные разрезы, полученные в районе скважины 3/16-S, в которой на протяжении многих лет выполняется термометрический мониторинг [3,4]. Отражение, ассоциируемое с границей между таликом и многолетнемёрзлыми породами, выявляемое на разрезе, должно соответствовать температуре фазового перехода по температурным данным. На момент выполнения работ она располагалась на глубине 7.1 м, что соответствует средней величине диэлектрической проницаемости грунта 15.5 единиц. Оно и было принято для расчётов при обработке данных съёмки № 1. Аналогичное сопоставление георадарных данных и термометрии скважины 2/18 позволило определить диэлектрическую проницаемость грунта съёмки № 2 в 6.9 единиц.

Причину несоответствия диэлектрических проницаемостей, полученных по материалам ОГТ, и путём сравнения с данными термометрии авторы видят в значительных вариациях влажности по разрезу. Это обусловлено, в том числе, и рельефной конфигурацией талика.

По завершении георадарных работ выполнялся профиль ВЭЗ. Его протяжённость составила 396 метров. Он располагался вдоль одного из георадарных маршрутов (Рисунок 1), а также вдоль геоэлектрического профиля, выполненного в 2016 г. [3]. В работах применялся электроразведочный генератор тока SGD-EGC200 «SKAT IV» СГФП 420.00.00, а также электроразведочный измеритель SGD-EEM «MEDUSA-B2» СГФП 221.00.00-02 Версия V2.18 (НПК «СибГеофизПрибор», Россия). Исследования осуществлялись при симметричной установке Шлюмберже. На профиле было отработано десять пунктов наблюдений с шагом в 50 м. Максимальные разносы составили 100 м, что обеспечивало глубину зондирования примерно до 20 м. Данные ВЭЗ обрабатывались с использованием программы ZondIP 1D (Zond Software LTD, Cyprus). Обработка осуществлялась по стандартной методике. В результате путём подбора были получены эффективные значения удельного электрического сопротивления, а также глубины залегания верхних и нижних границ электрически однородных слоёв.

На Рисунке 2 показаны схемы глубин залегания кровли талика и его подошвы по двум выполненным съёмкам. Для их построения применялась картографическая программа Surfer 23.3 (Golden Software Inc., USA). Гридирование осуществлялось методом Inverse Distance с радиусом осреднения 18 м и размером ячейки 5×5 м. Ошибка гридов для первой съёмки кровли талика составила ± 0.13 м и ± 0.59 м для его подошвы; для второй съёмки кровли талика она составила ± 0.07 м и ± 0.11 м для его подошвы.

Как следует из представленных схем, глубина залегания сезонно-мёрзлого слоя на правом берегу реки составляет около 2.3 м и варьирует в пределах от 1.8 до 3.7 м. Заглубление слоя имеется в центральной и южной части, где имеются открытые участки местности. Талик полностью занимает всю территорию съёмки № 1. Его кровля маркируется подошвой сезонно-мёрзлого слоя, а подошва располагается в интервале глубин от 2 до 14 м, при среднем значении 6.1 м.

Выяснено, что глубина залегания сезонно-мёрзлого слоя на левом берегу реки (съёмка № 2) составляет около 3 м, и варьирует в пределах от 2 до 4 м. Заглубление этого слоя регистрируется в восточной присклоновой части. Талик полностью занимает только восточную часть съёмки, и некоторую часть западной. Его подошва располагается в интервале глубин от 3 до 7.1 м, при среднем значении 4.2 м. Наибольшие мощности талика и наиболее глубинные его участки располагаются в склоновой части, и также как на противоположном берегу реки Левая Шестаковка, приурочены к открытым участкам местности.

В целом, в районе работ наличие таликов и большая их мощность, по отношению к соседним участкам, соответствуют открытой местности. Это вполне соответствует результатам математического моделирования [6,7].

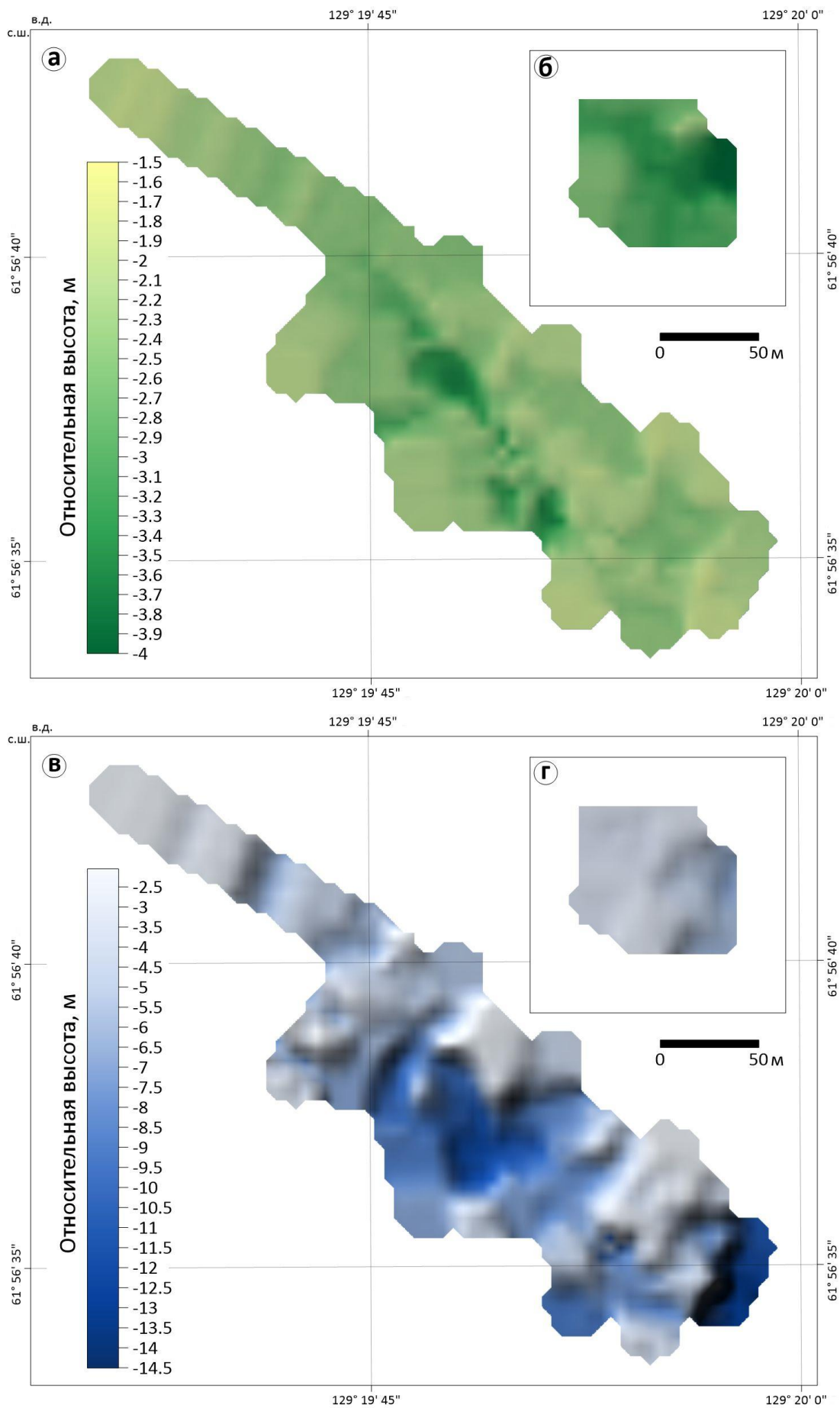


Рисунок 2 – Схемы относительной высоты положения кровли талика на правом (а) и левом (б) берегах реки Левая Шестаковка, а также его подошвы на правом (в) и левом (г) берегах.

Результаты, полученные в ходе электроразведки, дополняют и подтверждают георадарные. Они показывают, что участок, на котором расположен профиль ВЭЗ, неоднороден по электрическим свойствам. Он условно подразделяется на четыре слоя. Приповерхностный, мощностью до 2 м, ассоциируется с сезонно-мёрзлым. Для этого слоя характерна значительная анизотропия удельного сопротивления, которое нарастает вдоль по разрезу в пределах от 590 до 4459 Ом·м. Это подтверждает выводы, сделанные на основе анализа данных ОГТ. Ниже по разрезу следует слой низкоомных пород с удельным сопротивлением от 100 до 267 Ом·м. Он ассоциируется с водоносным горизонтом, т.е. таликом. Этот слой контрастно выделяется на протяжении всего профиля. Его мощность варьирует в пределах от 3 до 5.5 метров. Следующий слой определяется повышением удельного сопротивления до 2049 Ом·м, что характерно для многолетнемёрзлых пород. На разрезе его мощность составляет от 4 до 6 метров. Для последнего, самого нижнего слоя, характерно понижение удельных сопротивлений до значений около 221 Ом·м. Он, вероятно, связан либо с изменением литологического состава [3], либо с наличием грунтовых вод.

3. Выводы

Проведённые комплексные геофизические исследования выявили рельефность и неоднородность залегания подошвы сезонно-мёрзлого слоя, а также подошвы талика. Наибольшие его мощности приурочены к открытым участкам местности. Выполненная работа показала принципиальную возможность детальной съемки глубин залегания кровли и подошвы водоносных таликов на примере небольшого участка. Это важно для оценки запасов подземных вод и определения предпочтительных путей фильтрации в таликовых водоносных горизонтах, а также для решения вопроса о стабильности или изменчивости геометрии таликов при наблюдающихся изменениях климата. Результаты, полученные в ходе электроразведки, дополняют и подтверждают георадарные. Они показывают, что участок, на котором расположен профиль ВЭЗ, неоднороден по электрическим свойствам. Он условно подразделяется на четыре слоя. Приповерхностный, мощностью до 2 м, ассоциируется с сезонно-мёрзлым. Для этого слоя характерна значительная анизотропия удельного сопротивления, которое нарастает вдоль по разрезу в пределах от 590 до 4459 Ом·м. Это подтверждает выводы, сделанные на основе анализа данных ОГТ. Ниже по разрезу следует слой низкоомных пород с удельным сопротивлением от 100 до 267 Ом·м. Он ассоциируется с водоносным горизонтом, т.е. таликом. Этот слой контрастно выделяется на протяжении всего профиля. Его мощность варьирует в пределах от 3 до 5.5 метров. Следующий слой определяется повышением удельного сопротивления до 2049 Ом·м, что характерно для многолетнемёрзлых пород. На разрезе его мощность составляет от 4 до 6 метров. Для последнего, самого нижнего слоя, характерно понижение удельных сопротивлений до значений около 221 Ом·м. Он, вероятно, связан либо с изменением литологического состава [3], либо с наличием грунтовых вод.

4. Благодарности

Авторы благодарят своих коллег Павлову Н.А. и Огонерова В.В. (Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН) за помощь в организации полевых работ; Немчинову А.В. и Андрееву Д.О. (Санкт-Петербургский государственный университет) за помощь в проведении полевых работ. Настоящее исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда и Якутского научного фонда Проект № 22-17-20040 «Субаэральные и подозёрные талики в сплошной криолитозоне Восточной Сибири: происхождение, современное состояние и реакция на изменение климата».

5. Литература:

- [1] Biskaborn, B.K., Smith, S.L., Noetzli, J. et al. Permafrost is warming at a global scale // *Nat. Commun.*, 2019, vol. 10, pp. 264.
- [2] Sudakova, M.S., Brushkov, A.V., Velikin, S.A., Vladov, M.L., Zykov, Yu.D., Nekljudov, V.V., Olenchenko, V.V., Pushkarev, P.Yu., Sadurtdinov, M.R., Skvortsov, A.G. and Tsarev, A.M. Geophysical methods in permafrost monitoring // *Moscow University Geol. Bull.*, 2022, vol. 6, pp. 141-151.
- [3] Lebedeva, L.S., Bazhin, K.I., Khristoforov, I.I., Abramov, A.A., Pavlova, N.A., Efremov, V.S., Ogonerov, V.V., Tarbeeveva, A.M., Fedorov, M.P., Nesterova, N.V. and Makarieva O.M. Suprapermafrost subaerial taliks, Central Yakutia, Shestakovka river basin // *Earth's Cryosphere*, 2019, vol. 23, No 1, pp. 40-50.
- [4] Lebedeva, L., Pavlova, N., Khristoforov, I. Geology, structure, ground temperature and groundwater level in aquifer taliks in the Shestakovka River Basin, Eastern Siberia // *Land*, 2023, vol. 12, No 1, pp. 16.
- [5] Popov, S.V. Determination of dielectric permittivity from diffraction traveltime curves within a dipping-layer model // *Earth's Cryosphere*, 2017, vol. 21, No 3, pp. 75-79.
- [6] Popov S.V., Boronina A.S., Lebedeva L.S. The main factors in the formation of subaerial taliks on the example of the Shestakovka River basin (Central Yakutia), using a one-dimensional mathematical model // *Ice and Snow*, 2023, vol. 63, No 4, pp. 597-611.
- [7] Popov S.V., Boronina A.S., Lebedeva L.S. "Program for modeling heat and mass transfer processes in permafrost" (FrozenSoil) // Certificate of the registration RUS No. 2023669994. Application No. 2023669430, 09.25.2023. Publ. 09.25.2023. Bull. No. 10.

**ЭКСПЕРИМЕНТ ЦИКЛИЧЕСКОГО ПРОМЕРЗАНИЯ-ПРОТАИВАНИЯ
ПОЧВ И ПОРОД: ИСТОРИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ И МЕТОДИКА**

Татьяна Романис, Анна Куть, Андрей Мельников, Владимир Тумской
ФГБУН «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН»,
677010, Россия, г. Якутск, Мерзлотная, 36

**FREEZE-THAW CYCLES EXPERIMENT OF SOILS: HISTORICAL BACKGROUND
AND METHOD**

Tatiana Romanis, Anna Kut, Andrey Melnikov, Vladimir Tumskoy
Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36, Permafrost str., Yakutsk, 677010, Russia

Abstract. To reconstruct the conditions of sedimentation and freezing of sediments, the results of granulometric analysis, micromorphological study of buried soils and morphoscopic analysis of sand-sized grains are widely used. However, the currently used diagnostic criteria for this type of reconstruction do not have reliable experimental or empirical confirmation, and therefore it is necessary to conduct experiments at a new level. To achieve this, the conditions that must be observed when conducting experiments were formulated and the development of new equipment and methodological approaches for their implementation began.

1. Введение

Микроморфологический метод изучения погребенных почв и метод морфоскопии поверхности песчаных зерен отложений, вмещающих эти почвы, активно применяются в настоящее время, в том числе для диагностики интенсивности криогенного воздействия. Причиной активного использования методов становится желание исследователей повысить точность реконструкций условий среды прошлого с помощью новых данных. Актуальность этим работам придает интенсивное современное изменение климата и потребность прогнозировать изменения природной среды, адаптироваться к ним. Но масштабное использование результатов микроморфологического анализа и морфоскопии зерен как неоспоримого доказательства криогенных процессов в отложениях – вопрос неоднозначный, так как экспериментальное подтверждение диагностических критериев криогенного воздействия весьма ограничено. Развитие экспериментального изучения криогенеза на уровне отдельных зерен и микростроения в криолитологии и смежных науках началось в 50-е годы XX века с публикации А.И. Попова [1] об участии морозного выветривания в процессе накопления пылеватого материала в пределах Русской равнины. Выдвинутые исследователями гипотезы о том, что причиной накопления пылеватого материала на обширных территориях России является криогенное выветривание, необходимо было проверять. Для этого требовалось в лабораторных условиях воспроизводить циклы промерзания-протаивания, аналогичные природным условиям. За прошедшие 70 лет естественным образом сложились следующие направления изучения изменения пород при многократном промерзании-протаивании:

1. изучение изменения гранулометрического состава отложений;
2. изучение изменения химического и минералогического состава отложений;
3. изучение факторов, влияющих на процессы криогенного выветривания и сопутствующие ему;
4. диагностика признаков криогенного выветривания в отложениях в естественных условиях.

Характеру изменения гранулометрического состава рыхлых песчаных отложений и оценке поверхности кварцевых зерен посвящено немало экспериментальных работ в России. Важнейшие из них следующие. Работа Э.Д. Ершова [2] свидетельствует о формировании разной криогенной текстуры при одинаково повторяющемся преобразовании гранулометрического, химического и минерального исходного состава пород под действием циклического промерзания-протаивания. Г.П. Мазурова и Е.С. Тихонова [3] показали изменения общего характера частиц песка при многократном замораживании и оттаивании: после эксперимента грани зерен приобрели более сглаженные и неровные очертания (с зазубринами), поверхность стала матовой и покрыта более тонким материалом, увеличилось количество мелких трещин.

Цикл работ Конищева В.Н. и Рогова В.В. [4, 5] был посвящен изучению механизмов дробления кварцевых зерен, агрегации тонкодисперсных продуктов выветривания, вымораживания частиц. В.В. Рогов [6, 7] диагностировал специфические черты поверхности зерен кварца, приобретаемые ею при многократном промерзании-протаивании (чередование ровных и свежих участков скола с характерными углублениями (кавернами) и наличие следов травления и осаждения), установил диагностические признаки криогенного элювия.

С 2010 года интерес к экспериментальным работам по криогенному выветриванию возрастает и появляются новые работы. Это связано с активным использованием анализа поверхности песчаных зерен для реконструкции природной обстановки в прошлом.

Несмотря на возросший интерес к методу, опубликованные материалы не полны. В литературе редко встречается детальное описание условий эксперимента, что затрудняет корректное использование полученных результатов. Исследователи редко указывают размеры промораживаемого образца, было ли промерзание со всех сторон или направленное с поверхности. К примеру, в работах В.Н. Конищева и В.В. Рогова при одностороннем промораживании образца удалось получить кольцевую сортировку песка. Спустя 40 лет кольцевые структуры были получены в работе К.А. Романенко с соавторами [8], ход фронта промерзания в статье не указан. При этом до К.А. Романенко исследователи не могли получить подобные структуры. Из-за указанных недостатков полученные данные не представляют единой системы знаний о воздействии различных режимов промерзания-протаивания на гранулометрический и минералогический состав отложений, особенно в совокупности с параметрами микростроения. Единственный вариант компенсировать пробелы в имеющихся данных – возобновить эксперименты по циклическому промерзанию-протаиванию модельных образцов смесей и почв.

2. Результаты исследований

Для получения необходимых и кондиционных результатов были сформулированы несколько принципов, которым должны соответствовать проводимые эксперименты:

1. образец должен промерзнуть/протаивать либо сверху, либо сверху и снизу, как в природе, и мы должны четко знать, с какой скоростью и при какой температуре происходит движение фронта или фронтов промерзания/протаивания;
2. образец должен иметь достаточный размер, позволяющий не только проводить гранулометрический анализ, но и делать шлифы для последующего изучения особенностей микростроения, изучать криогенное строение и т.д.; кроме того, его размер должен позволять использовать только его центральную часть для перечисленных выше анализов, чтобы еще больше минимизировать влияние боковых стенок;
3. для изучения изменений характеристик образца в зависимости от количества циклов промерзания/протаивания, в рамках одного эксперимента (с одним набором краевых условий) необходимо сразу запускать несколько образцов, которые изучаются последовательно через определенное число циклов.

Для реализации поставленных условий была создана экспериментальная установка для отработки методики проведения экспериментов большой длительности. Было принято, что размер образцов в горизонтальном срезе составляет не менее 7×7 см, высота образцов – не менее 20 см. Для создания и контроля конфигурации и положения фронтов промерзания/протаивания разрабатывается специальная термоплита на основе элементов Пельтье (рис. 1а), набор которых позволит нагревать или охлаждать образцы сверху и/или снизу. На стадии экспериментов пока использовалась обычная морозильная камера.

Для ликвидации бокового промерзания/протаивания и обеспечения последовательности изучения образцов по мере проведения эксперимента были использованы группы образцов квадратной формы. Это позволяет составлять из них модели единого грунтового массива фактически произвольного размера, ограниченного только размерами климакамеры. Плотное прилегание стенок отдельных образцов друг к другу позволяет свести к минимуму температурное влияние каждого образца сбоку. После исследования каждого последовательного образца он заполняется обратно тем же материалом, возвращается в массив и в дальнейшем участвует только как элемент сохранения сплошности изучаемого массива. Для блокирования тепловых потоков с внешних сторон наборного грунтового массива рассматривались два способа – использование толстого слоя теплоизоляции или установка вместо внешнего ряда образцов аналогичных емкостей, заполненных водой (рис. 1б). При промерзании их сбоку на

протяжении какого-то времени температура в них со стороны образцов соответствует температуре фазового перехода (эффект «нулевой завесы»). Для проведения эксперимента важно, чтобы скорость промерзания/протаивания образцов сбоку не превышала скорость движения фронта сверху и снизу, чтобы для изучения оставалась «правильно промерзшая» центральная часть образца.

Для контроля распределения температуры использовались температурные датчики (лабораторные термометры ЛТ-300), которые в непрерывном режиме записывали температуру на внешних гранях грунтового массива: сверху, снизу и по четырем боковым граням. Для контроля градиента температуры и положения фронта промерзания/протаивания по вертикали разрабатывается и будет внедрена в ближайшее время тонкая жесткая коса из датчиков, расположенных через каждые 1-2 см, которая будет подключена к компьютеру и позволит оперативно контролировать распределение температуры по глубине, а также автоматизировать смену режимов охлаждения и нагревания грунтового массива.

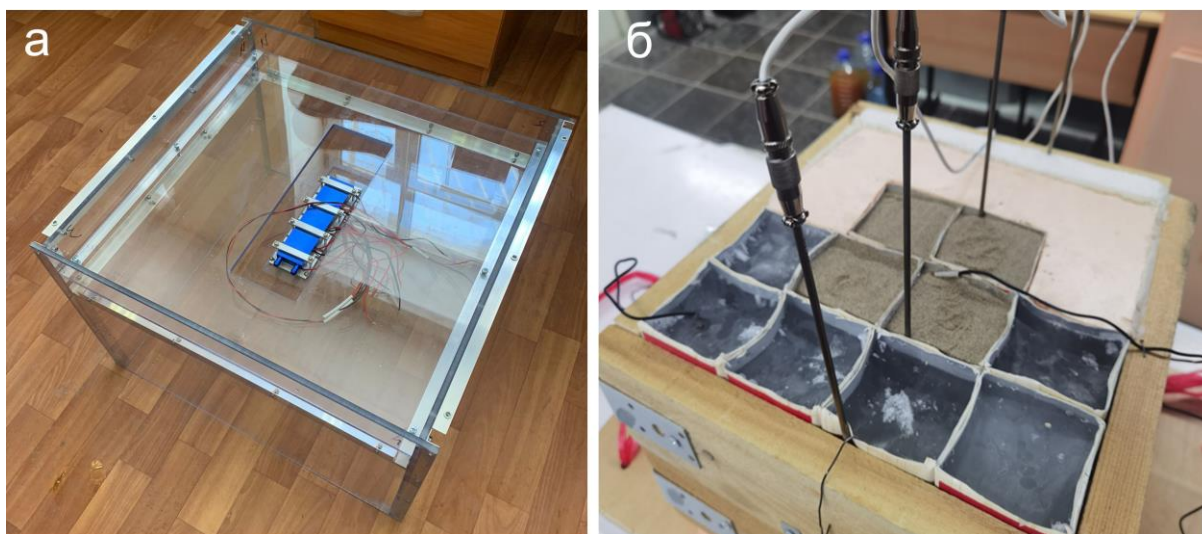


Рисунок 1 – Особенности экспериментальной установки: а - экспериментальный модуль из элементов Пельтье; б - экспериментальная установка для циклического промораживания образцов с двумя типами боковой термоизоляции: с помощью воды и теплоизолятора

3. Выводы

В результате мы планируем создать автоматизированную установку по контролируемому одно- или двухстороннему промораживанию и протаиванию грунтового массива, чтобы получить сопоставимые данные об изменениях гранулометрического состава отложений и их макро- и микростроения в различных условиях промерзания и протаивания.

4. Благодарности

Работа выполнена в рамках НИОКТР 122011800064-9 (сбор опубликованных материалов) и гранта РФФИ №23-77-10046 (аналитическая обработка информации и создание экспериментальной установки).

5. Литература:

- [1] Popov A.I. On the origin of cover loams of the Russian Plain // *Izvestiya AN SSSR, ser. geogr.*, 1953, №5, pp. 30-41 (in Russian).
- [2] Ershov E.D. Transformation of dispersed deposits during repeated freezing - thawing // *Inzhenernaya geologiya*, 1984, iss. 3, pp. 59-66 (in Russian).
- [3] Mazurov G.P., Tikhonova E.S. Transformation of the composition and properties of soils during repeated freezing // *Vestnik Leningradskogo Universiteta, ser. geol. and geogr.*, 1964, iss. 3, № 18, pp. 35-44 (in Russian).
- [4] Konishchev V.N., Rogov V.V., Shurina G.N. Influence of cryogenic factors on primary minerals (results of experimental studies) // *Problemy kriolitologii*. M., Publishing house Mosk. Univ., 1976, issue. 5, p. 50-60 (in Russian).

- [5] Konishchev V.N., Rogov V.V. Micromorphology of cryogenic soils and grounds // Pochvovedenie, 1977, No. 2, p. 119-125 (in Russian).
- [6] Rogov V.V. The role of gas-liquid inclusions in the mechanism of cryogenic destruction of quartz // Vestn. Moscow Univ. Ser. geogr., 1987, vol. 3., p. 81-85 (in Russian).
- [7] Rogov V.V. Features of the morphology of particles of the skeleton of cryogenic eluvium // Kriosfera Zemli, 2000, vol. IV, No. 3, p. 67-73 (in Russian).
- [8] Romanenko K.A., Abrosimov K.N., Kurchatova A.N., Rogov V.V. The experience of applying X-ray computer tomography to the study of microstructure of frozen ground and soils // Earth's Cryosphere, 2017, vol. XXI, No. 4, pp. 63–68.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ОЗЕРНЫХ КОТЛОВИН В УСЛОВИЯХ ГОРОДА

Алена Руфова

ГБУ «Академия наук РС (Я)», 677007, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 33

SPATIO-TEMPORAL TRANSFORMATION OF LAKE BATTLES IN CITY CONDITIONS

Alena Rufova

Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), 33, Lenin av., Yakutsk, 677007, Russia

Abstract. Lake ecosystems are an integral part of biogeocenosis. Recently, urban lakes, which are among the main rapidly degrading systems in the nature-human complex, have been considered particularly relevant in relation to environmental protection.

Yakutia is known for numerous lakes of different types of origin and basins. Lake Beloe is one of the oldest lakes in Yakutsk. Among the city's residents, it is one of the most recognizable recreational and natural ecosystems. Based on comprehensive monitoring studies, the spatiotemporal transformation of lakes under conditions of constant anthropogenic impact was determined. Morphometric materials and satellite maps and images were subjected to comparative analysis. As a result, a reduction in the total surface area of the lake was established, which led to changes in hydrological (water balance, external water exchange), hydrochemical (pH level, general hardness, mineralization) and biological (change in trophic status) indicators. Consequently, there is a degradation of the general state of the lake ecosystem. An analysis of the types of anthropogenic impact and their consequences was carried out. In total, all types of anthropogenic impact are observed, except for fishing. All these processes led to changes in the lake basin as a whole.

1. Введение

Формирование озер теснейшим образом связано с историей развития рельефа. Принято считать, что наличие большого количества озер говорит о том, что в геологическом прошлом рельеф претерпел большие изменения. В геологических масштабах времени развитие озер протекает очень быстро. Реки и ручьи, вытекающие из озер, постепенно углубляя свои русла, вызывают падение их уровня. Озерные котловины заполняются насосами и продуктами жизнедеятельности растений и животных, хемогенными осадками. В результате всего этого озера мелеют и постепенно исчезают [1-2]. Только самые крупные из них могут существовать миллионы лет, но у подавляющего большинства срок жизни гораздо меньше - всего лишь не более нескольких десятков тысяч лет.

Озера могут быть сформированы различными путями и вопросы формирования и развития озерной системы всегда привлекали внимание исследователей. Например, старейшие и крупнейшие системы являются результатом тектонической деятельности. Щелевые озера, находящиеся в Африке, результат сейсмической активности вдоль линии разделения двух тектонических плит [8]. Сформированные льдом озера создавались, когда ледники отступали, оставляя позади провалы в формах ландшафта, заполненные водой [9]. И наконец, озера-старички являются речными, появляясь, когда блуждающий речной изгиб отсекается от главного канала [7, 10].

Особое место в озераведении занимают городские озера, где усиливается хозяйственная и рекреационная деятельность. Более ста лет изучаются озера, но в последние десятилетия наиболее остро ставится вопросы охраны, рационального использования озер селитебных территорий [3-6]. В настоящее время накопилось достаточное количество материалов для

детального описания озера с помощью пространства и эмпирических данных или наиболее характерных признаков.

Целью работы является изучение пространственно-временной трансформации озёрной котловины в условиях урбанизированной территории криолиозоны на примере одного из крупных водоемов города Якутска – озера Белое.

2. Материалы и методика

Комплексные мониторинговые исследования озерных экосистем проводятся с 2009 г. Ведутся исследования поверхностных вод и донных отложений, снежного и почвенного покрова. Ведется мониторинг общих морфометрических параметров озера и приозерной территории.

Объектом исследования послужило озеро Белое, расположенное в пределах селитебной территории одного из крупных городов Северо-Востока России – Якутска. Озеро имеет природное старичное происхождение (Рисунок 1). В таблице 1 приведена общая морфометрическая характеристика [7].

Таблица 1 – Морфометрическая характеристика

Характеристика		Озеро Белое
Площадь зеркала воды, км ²		0,67
Объем воды, м ³		1,94
Глубина, м	максимальная	6,5
	средняя	2,9
Длина, км	озера	1,3
	береговой линии	6,7
Ширина, км	максимальная	1,28
	средняя	0,28

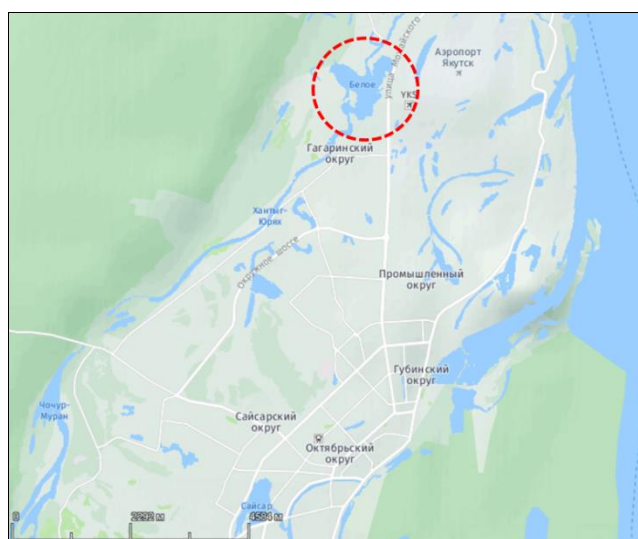


Рисунок 1 – Карта-схема расположения озера Белое г. Якутск

Карта-схема района исследования построена с помощью программы SAS. Планета 201212.10106 Stable. Используются цифровые базовые карты города Google maps – физическая, экономическая, транспортная. Дополнительные символы отмечены с помощью программы MS Paint 3D. Спутниковые карты и снимки построены в программе Google Earth Pro.

3. Результаты исследования

Якутск находится в левобережной части долины р. Лена, в местности Туймаада. Последняя представляет собой широкую и протяженную слабовсхолмленную аллювиальную поверхность, расположенную на высоте около 100 м над уровнем моря.

Озера г. Якутск в основном возникли в плейстоцене, оказавшее большое влияние на расположение, строение и очертание озер и другие особенности. Выделяется несколько, нередко объединяемых, вложенных друг в друга террас: низкая пойма, высокая пойма (голоцен), две голоценовые надпойменные террасы (якутская и сергеляхская), а вблизи склона долины – вторая надпойменная терраса (поздний неоплейстоцен) (Рисунок 2) [11]. Основная особенность территории, принадлежащей к днищу долины р. Лены – резкое расширение русла, сопровождаемое появлением на поверхности террас большого количества рукавов, проток, старых русел и озер. Это свидетельствует о том, что русловые процессы прекратились на поверхности террас совсем недавно [12].

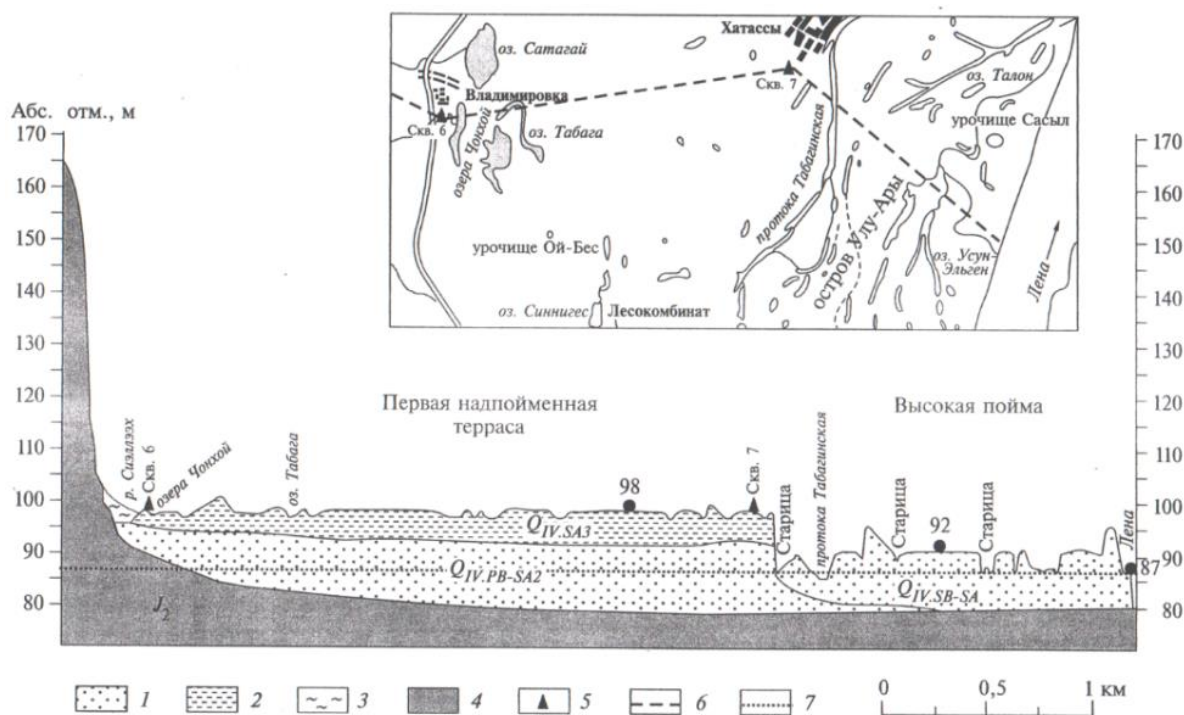


Рисунок 2 – Геолого-геоморфологический разрез долины Туймаада, р. Лена [12].

Обозначения: 1 – пески, 2 – алевриты, 3 – склоновые отложения, 4 – юрские песчаники и алевролиты, 5 – скважины, 6 – линия разреза на схеме врезке, 7 – меженный уровень р. Лена. Индексы: $Q_{IV.SA3}$ – голоцен, поздняя субатлантика, $Q_{IV.PB-SA2}$ – голоцен, предбореал – средняя субатлантика, $Q_{IV.SB-SA}$ – голоцен, суббореал – субатлантика, J_2 – юрские отложения

Большую роль в эволюции котловины сыграл также и климат прошлого времени. Якутск, располагаясь самом центре Лено-Вилуйской равнины, окаймленной с запада Среднесибирским плоскогорьем, а с востока и юга – горными хребтами, лишен поступления теплых масс воздуха со стороны Тихого океана, в то же время открыт с севера, доступен для вторжения охлажденных арктических потоков воздуха. Это и обуславливает экстраконтинентальный климат Якутска, не имеющий аналогов на всей равнинной части Северного полушария [13].

Таким образом, благодаря постоянному притоку в озера воды с р. Лена в течении достаточно длительного времени происходила переработка котловин. Озера Якутска являются речными озерами-старицами, относятся к современным озерам.

Озеро Белое расположено в северо-западной части города, в районе аэропорта. Как и многие городские озера является проточным. Котловина старичная (речная), преобразованная антропогенными воздействиями. По классификации величина площади зеркала относится к очень малым (Таблица 1). По средней и максимальной глубине малым и средним, соответственно. Берега озера относительно слаборасчлененные.

До 90-х гг. XX в. по районированию города озеро относилась к периферийному дачному району. В юго-восточной части находилась автомагистраль, ведущая к пригороду города.

Северо-западная часть полностью была занята дачными домами и их огородами. То есть озеро обеспечивало летним водопроводом 1/6 часть населения города.

90-е гг. характеризуется чрезвычайно интенсивным развитием процесса урбанизации, в частности миграция из сельской местности в городские поселения. Увеличение города и рост населения вызывает сильное изменение условий существования озера.

В 2000 гг. в городе начинается строительный бум на многоэтажные жилые и административные здания. Утверждается программа социально-экономического развития города до 2020 года. Продолжается расширение города дачные территории становятся жилыми, вследствие этого меняется границы города (Рисунок 3).

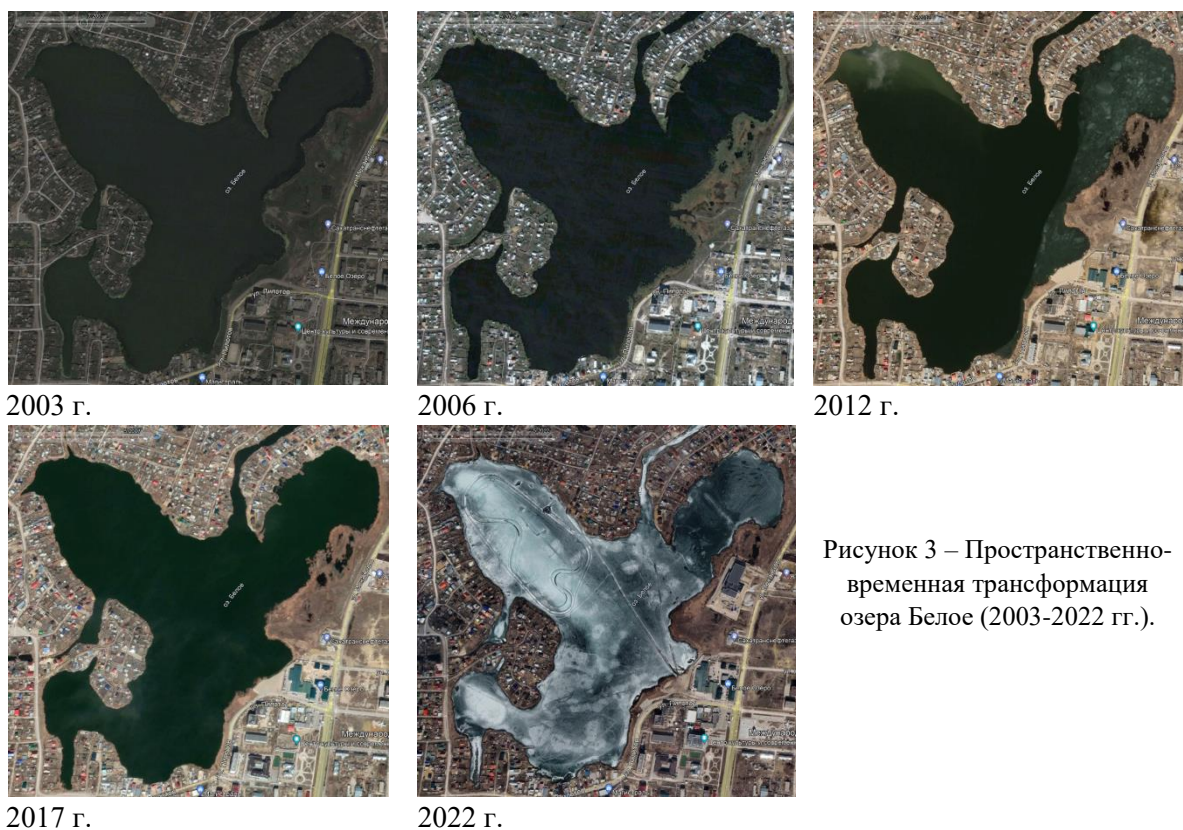


Рисунок 3 – Пространственно-временная трансформация озера Белое (2003-2022 гг.).

В 2019 г. начали отсыпку юго-восточной части территории озера, развернулось строительство огромной базы и склада. В 2020 г. началась масштабная отсыпка заболоченной восточной части, где планировалась строительство физкультурно-оздоровительного комплекса. В 2022 г. строительство завершилось, объект сдан в эксплуатацию. Кроме этого, в 2021 г. в южной части озера открыли услугу аренды лодок и sup-досок, для этого водоем отсыпали горным и кильдямским песком затем щебенкой – организовали пристань. Также с 2021 г. идет реконструкция улицы Можайского, проходящая вдоль озера, протяженность ремонтируемого участка составляет 2,1 км. Проводились работы по подготовке земляного полотна, выносу инженерных сетей, проложены водопропускные сооружения.

Интенсивный процесс урбанизации привело к изменению поверхности водосборных бассейнов озера, особенно его восточной части. Наблюдается сокращение объема воды, озеро стало мелким, менее глубоким. Также установлено усиленное заболачивание восточной части. В результате идет уменьшение площади зеркала, что приводит к изменению озерной котловины.

Проведенный анализ с помощью спутниковых карт и снимков подтверждает, что наиболее распространенным видом воздействия на озеро, особенно в последние годы, является засыпка приозерной территории и строительство в береговой зоне. Последствиями его является шумовое загрязнение, замусоривание и антропогенное эвтрофирование, загрязнение поверхностных вод и нарушение гидрологического режима, что привело к общему упадку

состояния озерной системы. Нужно отметить, что неорганизованная рекреация, которая запрещена, в большей степени отмечена на западной части (таблица 2).

Таким образом, современные реалии большого города создают угнетенные условия для природных городских экосистем, где на постоянной основе подвергаются антропогенному прессу. Одна из главных проблем – это засыпание озера. Длительное существование в условиях города приводит к пространственной неоднородности и ухудшению состояния озера по основным гидрологическим, гидробиологическим и гидрохимическим показателям, что в совокупности приводит к изменению котловины озера.

Таблица 2 – Виды антропогенного воздействия на озеро Белое

Вид воздействия	Рекреация	+
	Рыболовство	-
	Водозабор	+
	Выпас скота и птицы	+
	Строительство в береговой зоне	+
	Сброс технических или хозяйственных вод	+
	Засыпка акватории	+
	Последствие воздействия	Шумовое загрязнение
	Замусоривание и антропогенное эвтрофирование	+
	Загрязнение поверхностных вод	+
	Нарушение гидрологического режима	+

4. Заключение

Последние десятилетия озеро Белое находится под постоянным антропогенным прессом, что привело к сокращению площади зеркала, изменению береговой линии и в целом приозерной территории. Озеро является пограничной территорией, разделяющей центр от периферийной части города. Вследствие этого водоём усваивает с одной стороны активное антропогенное воздействие крупного города (строительство, автомагистрали и др.), с другой – результат деятельности жилых частных построек (сточные хозяйственные выбросы, замусоривание и др.).

5. Литература:

- [1] Cohen A.S. The Geological Evolution of Lake Basins // *Paleolimnology: The History and Evolution of Lake Systems*. New York: Oxford Academic, 2003. 155 p.
- [2] Hoffmann N., Reicherter K., Fernández-Steeger T. et al. Evolution of ancient Lake Ohrid: a tectonic perspective // *Biogeosciences*. Vol.7. P. 3377–3386. <https://doi.org/10.5194/bg-7-3377-2010>, 2010.
- [3] Makarov V.N., Sedelnikova A.L. *Ecogeochemistry of the urban lake of Yakutsk*. Yakutsk: IMZ, 2016. 207 p.
- [4] Legostaeva Ya.B., Rufova A.A. Analysis of the hydrochemical regime of the largest lake in Yakutsk // *Natural resources of the Arctic and Subarctic*. 2022. T.27(4). pp. 523-543.
- [5] Uddin M., Kormoker T., Siddique A.B. et al. An overview on water quality, pollution sources, and associated ecological and human health concerns of the lake water of megacity: a case study on Dhaka city lakes in Bangladesh // *Urban Water Journal*. 2023. Vol.3(20). pp. 261-277. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2023.2169171>.
- [6] Manikandan R., Bhuvaneshvari S. A study on causes and consequences of urban lakes pollution in Coimbatore city // *International journal of creative research thoughts*. 2022. Vol.6(10). P. 184-190.
- [7] *Rivers and lakes of Yakutia*. Rep. ed. IN AND. Ageev. Yakutsk: Bichik 2007. 136 p.
- [8] Hafsa Y.A., Sid A.S. Lakes of Africa Microbial Diversity and Sustainability. 2023. Vol.1. P. 501-525. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95527-0.00009-9>.
- [9] David G.B., Flowers G.E., Schoof C.G. et al. *The Role of Englacial Hydrology in the Filling and Drainage of an Ice-Dammed Lake. Yukon, Canada: First published, 03. 2020. Vol.125.* <http://doi.org/10.1029/2019JF005110>.

- [10] Wayana D., Tamlin M.P., Xiao Y. Functional Lake-to-Channel Connectivity Impacts Lake Ice in the Colville Delta, Alaska // *JGR Earth Surface*. 2021. Vol.126(12), <https://doi.org/10.1029/2021JF006362>.
- [11] Soloviev P.A. Permafrost zone of the northern part of the Lena-Amga interfluvium. -M.: USSR Academy of Sciences, 1959. -44 p.
- [12] Spektor V.B., Spektor V.V. Relief and geological structure of the territory of Greater Yakutsk // *Applied environmental problems of Yakutsk*. -N.: Nauka, 2017. pp. 7-15.
- [13] Skachkov Yu.B., Savvinov D.D. Climate of Yakutsk // *Applied environmental problems of Yakutsk*. -N.: Nauka, 2017. pp. 71-84.

**ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ
УСЛОВИЙ ТЕРРИТОРИЙ С СИЛЬНО ЛЬДИСТЫМИ ОТЛОЖЕНИЯМИ
ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ**

Максим Сивцев, Александр Жирков

ФГБУН «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН»,
677010, Россия, г. Якутск, Мерзлотная, 36

**ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF RESTORING GEOCRYOLOGICAL
CONDITIONS OF TERRITORIES WITH HIGHLY ICEY SEDIMENTS OF
CENTRAL YAKUTIA**

Maxim Sivtsev, Zhirkov Alexander

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36, Permafrost str., Yakutsk, 677010, Russia

Abstract. Rising air temperatures in northern latitudes cause rapid transformation of permafrost, leading to environmental and socio-economic problems. Thermokarst processes leading to surface subsidence are more intense in open landscapes with thin protective layers. The research in Central Yakutia is aimed at restoring disturbed areas by recreating a protective layer using the author's methodology. Preliminary results show that water-saturated protective layers and snow compaction can effectively restore and preserve geocryological conditions. The authors achieved stable temperatures and reduced thaw depths, and will try to get a restored protective layer this year. The results obtained can contribute to the improvement of living comfort, preservation of agricultural land and development of permafrost conservation technologies.

1. Введение

Наблюдаемое повышение температуры воздуха в северных широтах значительно выше, чем в южных областях, что влечет за собой быструю трансформацию природной среды, в том числе многолетнемерзлых пород (ММП) [1]. Частота и величина разрушений ландшафтов, связанных с деградацией ММП, в этих регионах возрастают [2, 3, 4]. Изменение состояния ММП представляет собой существенный риск в виде ускорения в развитии криогенных процессов, потери несущей способности оснований, повреждения инженерных сооружений, а также усилению парникового эффекта. Поэтому, изучение процессов и механизмов при деградации ММП в современных условиях и прогноз их изменений, имеет большое значение для обеспечения жизнедеятельности: повреждения зданий, линейных сооружений, разрушение сельхозугодий, пашен и др. Это приводит к огромным экологическим и социально-экономическим проблемам.

Последние исследования, проводимые в регионах распространения ММП, отмечают высокую интенсивность развития процесса термокарста, а темпы просадок поверхности достигают до 10 см/год [3]. В современных условиях термокарст наиболее активен в открытых природных и антропогенных ландшафтах. Такие ландшафты характеризуются тонким (0-0,2 м) защитным слоем. А на участках, покрытых бореальным лесом, его толщина достигает 0,7-1 м [5]. В результате современного потепления климата происходит процесс разрушения защитного слоя, который выступает буферной зоной многолетнемерзлых пород, от более глубокого протаивания [6], что приводит к быстрому развитию термокарстовых процессов.

Такое положение указывает на необходимость проведения исследований, для оценки возможности восстановления нарушенных территорий с сильнольдистыми отложениями путем воссоздания защитного (переходного) слоя.

2. Суть эксперимента

Первые попытки восстановления нарушенных термопросадками сельхозугодий [7, 8], сводились к грубой планировке мерзлотных разрушений пашни, засыпкой песком термопросадок, толщиной 0,3 метра. В результате этого, была восстановлена пашня Рожа (70 га), ранее подвергнутая мерзлотно-эрозионным разрушениям, и вследствие этого, заброшенная. Однако, в последующие года, эта пашня, была подвергнута повторным термопросадкам, что свидетельствует о неэффективности проведения вышеуказанных мер.

На современном этапе изучения формирования мерзлотных условий, в зависимости от основных природных факторов, проводились исследования по оценке влияния инфильтрации летних (жидких) атмосферных осадков на формирование температурного режима ММП [9]. В рамках этого, на основе экспериментальных наблюдений, было установлено, что значительное увеличение летних атмосферных осадков продолжительное время, особенно на локальных (ограниченных) участках, оказывает охлаждающее влияние на формирование температурного режима ММП. Это связано с формированием повышенной влажности, а в последующем льдистости грунтов в результате насыщения их влагой, изменением теплофизических свойств и теплоты фазовых переходов.

Учитывая вышеописанные мероприятия восстановления пашен [7, 8] и методы мелиорации [9] был начат натурный эксперимент по восстановлению защитного слоя нарушенных термокарстовыми процессами территорий в Центральной Якутии.

Даже при наблюдаемом потеплении климата, в бореальных лесах температурный режим ММП сохраняет устойчивость [10], это подтверждает утверждение, что лесная растительность выступают теплоизоляционным слоем для ММП. При этом, известно, что в лесных массивах наблюдается мощный защитный слой. Из этого следует, что для достижения устойчивости геокриологических условий, необходимо обеспечить комбинацию теплозащитного (лес) и теплоемкого защитного (переходного) слоя в системе атмосфера-грунт.

Впервые на существование такого слоя обратил внимание В.К. Яновский [11]: «Переходный слой – слой рассеивания глубины сезонноталого слоя». В 1940 г. [5] возникло представление о защитном слое, который залегает ниже слоя сезонного оттаивания и над толщей погребенного льда. Было установлено, что под густым лесом на межлесных поверхностях в Центральной Якутии этот слой не тает, он находится в многолетнемерзлом состоянии, но стоит уничтожить лес, как толщина слоя сезонного оттаивания увеличивается, и защитный слой начинает таять. Этот исключительно важный вывод полностью подтвердился в последующих наблюдениях. В верхней части криолитозоны Восточной Сибири Ю.Л. Шур [12] выделил переходную зону между ежегодно оттаивающим СТС и ММП, в которую были включены переходный и промежуточный слои.

Район исследований:

Район исследований расположен в юго-восточной части Центральной Якутии, на левобережье р. Амга. Она сложена суглинисто-супесчаной толщей с крупными повторно-жильными льдами мощностью до 15-20 м. Согласно Мерзлотно-ландшафтной карте Якутии [13] территория участка находится в пределах Амгино-Алданской полого-увалистой среднетаежной провинции сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Мощность криогенной толщи здесь составляет 200-300 м. Температура пород на подошве годовых теплооборотов варьирует в пределах -2...-3°C. На участке исследований развит склоновый делювиально-солифлюкционный тип местности с температурой грунтов от -1,5°C до -1°C. ММП «сливающегося» типа, верхняя граница которых совпадает с нижней границей сезонноталого слоя. Мощность деятельного слоя на различных участках изменяется от 2,2 до 2,8 м.

Климат района исследований резко континентальный. Среднегодовая температура воздуха для метеостанции «Амга» составляет -8,3°C. Средние январские значения достигают -40,8°C, а июльские - +17,6°C. Годовое количество осадков в регионе составляет в среднем 270 мм.

Участок исследования разделен на три площадки (Рисунок 1): 1 – экспериментальный участок на нарушенной территории; 2 – экспериментальный участок на пашне; 3 – фоновый участок.

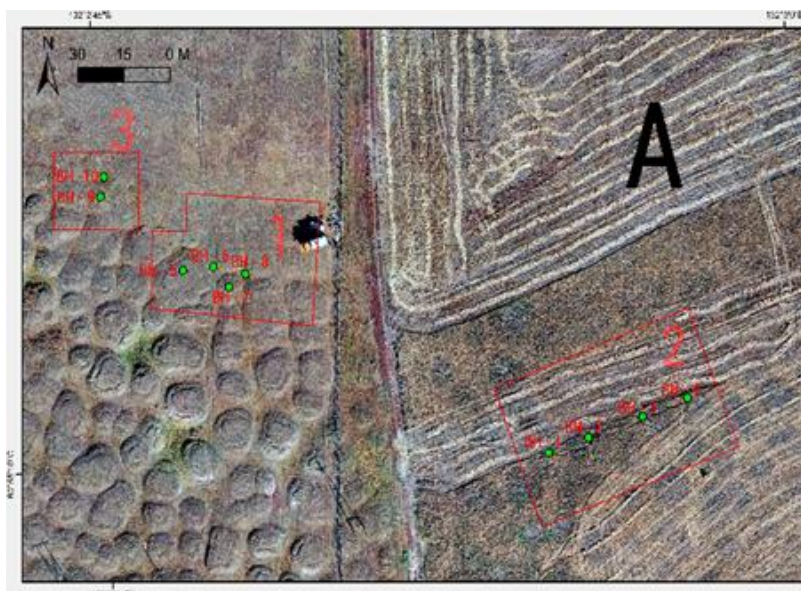


Рисунок 1 – Карта-схема исследуемого участка: №1 – экспериментальный участок на нарушенной территории; №2 – экспериментальный участок на пашне; №3 – фоновый участок.

Суть эксперимента:

I этап. В конце летнего периода механически разровняли просевшую дневную поверхность. Далее установили температурные и влажностные логгеры для мониторинга термовлажностного режима грунтов.

II этап. Поздней осенью этого же года, перед началом заморозков, провели оросительные работы, для увлажнения ранее разровненной территории до оптимальных значений, при которых вся влага в деятельном слое промерзает.

III этап. Зимой (декабрь, январь) выполнили снегоуплотнительные работы, для получения более глубокого промерзания увлажненных грунтов.

IV этап. Весной, для увеличения биомассы в почве и дальнейшего сохранения восстановленного защитного слоя высадили растительность («Донник Белый»).

На основе выше предложенных мероприятий разработана математическая модель тепло-влажнообмена для воссоздания условий, при которых возможно оптимальное восстановление защитного слоя.

Численный расчет:

С целью оценки воссоздания условий, при которых возможно оптимальное восстановление защитного слоя нами был использован пакет программ Frost 3D.

Были взяты разные варианты увлажнения грунтов:

- 1 При полной влагоемкости - влажность грунтов в пределах деятельного слоя за теплый период года задается значениями равными полной влагоемкости грунтов;
- 2 При естественной влажности - влажность грунтов в пределах деятельного слоя берется как среднее значение влажности грунтов за теплый период года;
- 3 При меняющейся влажности - влажность грунтов в пределах деятельного слоя в предзимний период задается значениями равными полной влагоемкости грунтов, совпадая с снегоуплотнением (с периодичностью 3 и 5 лет).

Для каждого варианта было применено по 5 сценариев разного снегонакопления.

Сценарии снегонакопления:

- I В первый год отсутствие снега, остальные года снег равен среднему за последние 10 лет значению;
- II Отсутствие снега - за весь расчетный период снег отсутствует;
- III Уплотнение снега - за весь расчетный период снег уплотнен;
- IV Уплотнение снега с периодом в 3 года - через каждые 3 года снег уплотняется;

V Первые 3 года снег отсутствует, остальные года снег равен среднему за последние 10 лет значению.

Во всех сценариях температура воздуха бралась с наблюдаемым трендом в настоящее время, для метеостанции Амга $0,05^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ($0,5^{\circ}\text{C}/10$ лет) [14].

В результате анализа установлено, что условия, при которых возможно лучшее восстановление защитного слоя достигаются при варианте 1 (полная влагоемкость). В этом случае возникает максимально льдонасыщенный мощный защитный слой и лучшие результаты получаются при сценариях II и III. Оптимальное же восстановление при этом варианте, с учетом финансовых и трудовых затрат, наблюдается при сценарии IV (уплотнение снега через каждые 3 года).

В случае естественной влажности грунтов (вариант 2) образуется защитный слой меньше, чем в первом варианте на 40 см. Безусловно, это влияние меньшего влагосодержания грунтов, чем меньше льдистость, тем меньше эффективная теплоемкость защитного слоя, и соответственно на большую глубину протаивает СТС.

Вариант 3 задумывался нами, чтобы подобрать экономически эффективные комбинации для оптимального восстановления защитного слоя. Таким образом, в результате анализа подбора разных комбинаций оптимальное восстановление наблюдается при сценарии IV. При этом случае наблюдается эффективная защита и сохранение геокриологических условий, что подтверждается и динамикой температурного режима грунтов.

При всех трех вариантах, максимальный и устойчивый защитный слой достигается на третий год. В первый год он варьирует от 0,6 до 0,98 м, а на третий год достигает значений от 0,92 до 1,27 м в зависимости от варианта увлажнения СТС. Объясняется это высокотемпературным режимом ММП в этих природных условиях, от $-0,9$ до $-0,4^{\circ}\text{C}$, что характеризует деградацию мерзлотных ландшафтов. При задаваемых изменениях поверхностных условий, с учетом начального распределения температуры ММП достижение стационарности теплового баланса требует по нашим расчетам от 3 до 4 лет. Что также подтверждается динамикой температурного режима грунтов.

Результаты натурного эксперимента:

На экспериментальных участках, на глубинах ниже 3 м., наблюдается понижение температур в среднем на $0,3^{\circ}\text{C}$. Это указывает на то, что результаты проведенных работ были положительными, что позволило добиться устойчивых температур.

Глубина протаивания измерялась с помощью мерзлотомеров, представляющих собой пропаянные крышкой снизу пластиковые трубы, оборудованные до глубины 3,5 м. Частота измерений составляла раз в декаду (через каждые 10 дней).

Наименьшая глубина протаивания в первый год наблюдается на участке № 2 (Таблица 1), но на второй год она увеличилась на 16 см, это скорее всего связано с уплотнением снега, так как в первый год снег был полностью расчищен. На участке №1 хоть и так же в первый год снежный покров расчищали, а затем уплотняли, произошли изменения в растительности. Она увеличилась и набрала массу, тем самым коррелируя другие факторы максимальная глубина протаивания, не изменилась.

Таблица 1 – Максимальная глубина протаивания

Участок\год	2021 год	2022 год	2023 год
Участок №1	2,30 м	2,20 м	2,20 м
Участок №2	2,49 м	2,07 м	2,23 м
Участок №3	2,41 м	2,42 м	2,40 м

3. Выводы

Из этого анализа следует, что для воссоздания мощного льдонасыщенного слоя необходимо обязательное предпринятое увлажнение почво-грунтов, которое обеспечит увеличение эффективной теплоемкости СТС. Это будет способствовать уменьшению деятельного слоя, в следствии затрачивания большего количества поступающего тепла на фазовые переходы.

Только, уплотнения или очистки снега не недостаточно для стабилизации грунтов условий на охваченных термокарстом территориях.

Доказана возможность восстановления разрушенных термокарстом территорий с помощью комбинированного способа тепловой защиты, включающего создание теплоизоляционного (восстановление растительного покрова) и теплоемкого (увеличение льдистости грунта) слоев.

4. Благодарности

Работа проводится в рамках бюджетного проекта ИМЗ СО РАН НИОКТР 122011800062-5 «Тепловое поле и криогенная толща Северо-Востока России. Особенности формирования и динамика».

5. Литература:

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2019. Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. <https://www.ipcc.ch/srccl/download/>
- [2] Osterkamp, T. E. (2005). The Recent Warming of Permafrost in Alaska. *Global Planet Change*, 49, 187-202. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2005.09.001>
- [3] Fedorov A.N., Gavriliev P.P., Konstantinov P.Y., Hiyama T., Iijima Y., Iwahana G., 2014. Estimating the water balance of a thermokarst lake in the middle of the Lena River basin, eastern Siberia. *Ecohydrology*, Vol. 7, Issue 2, pp. 188-196, <https://doi.org/10.1002/eco.1378>.
- [4] Biskaborn, B.K., Smith, S.L., Noetzli, J. et al. Permafrost is warming at a global scale. *Nat Commun* 10, 264 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4>
- [5] Efimov G.F., Grave N.A. Buried ice in the area of Lake Abalakh // *Sots. construction*. - 1940. - №10-11. - P. 67-78.
- [6] Shur, Y., Hinkel, K.M. and Nelson, F.E. (2005), The transient layer: implications for geocryology and climate-change science. *Permafrost Periglac. Process.*, 16: 5-17. <https://doi.org/10.1002/ppp.518>
- [7] Gavriliev P.P., Ugarov I.S., Efremov P.V. Permafrost-ecological features of taiga agricultural landscapes of Central Yakutia. Yakutsk: IMZ SB RAS, 2001. 196 p.
- [8] Ugarov I.S. Experience in restoring disturbed agricultural land // *Advances in modern science*. - 2012. - № 11. - P. 137-139. - EDN PKSVUF.
- [9] Zhirkov A. F. Numerical simulation of the subsoil condensation process and its impact on the heat and moisture regime of the frozen soils / A. F. Zhirkov, Zh. Wen, P. P. Permyakov [et al.] // *International Journal of Advanced Biotechnology and Research*. - 2019. - Vol. 10, No. 1. - P. 372-386. - EDN OKJNXB.
- [10] Varlamov, S.P.; Skachkov, Y.B.; Skryabin, P.N. Influence of climate change on the thermal condition of Yakutia's permafrost landscapes (Chabyda Station). *Land* 2020, 9, 132.
- [11] Yanovsky V.K. Expedition to the river. Pechora on determining the southern border of permafrost // *Proceedings of the commission for the study of permafrost*. L.: , 1933. P. 65–149.
- [12] Shur Yu.L. Upper horizon of frozen rocks and thermokarst // *Novosibirsk, Nauka*, 1988, 211 p.
- [13] Permafrost-landscape map of the Republic of Sakha (Yakutia). Scale 1:1,500,000 // Ed. M.N. Zheleznyak. - Yakutsk: IMZ SB RAS, 2018.
- [14] Skachkov Yu.B. Trends in climate change in Central Yakutia at the turn of the XX-XXI centuries. // *Proceedings of the International Scientific Conference “Regional Environmental Response to Global Changes in North-East and Central Asia”*. Irkutsk, 2012, pp. 236-238.

РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА В ЗОНЕ УРАНОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЭЛЬКОНСКОЕ ПЛАТО В ЮЖНОЙ ЯКУТИИ

Петр Собакин, Александр Чевычелов, Алексей Горохов
ФГБУН ФИЦ «ЯНЦ СО РАН» «Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН»,
677980, Россия, г.Якутск, пр. Ленина, 41

RADIOECOLOGICAL SITUATION IN THE ZONE OF THE ELKONSKOYE PLATEAU URANIUM DEPOSIT IN SOUTH YAKUTIA

Peter Sobakin, Alexander Chevychelov, Alexey Gorokhov
Institute of Biological Problems of the Cryolithozone SB RAS,
41, Lenin ave., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. An assessment of the radioecological situation of the preserved geological exploration site at the Elkon Plateau field in the Aldan Highlands was carried out using field radiometry. It was found that the removal of a huge mass of radioactive rocks to the surface from underground mine workings (tunnels, mines) significantly increased the area with an increased radiation background – 1,0-12,0 mSv/h or more. Studies have shown that in conditions of man-made pollution, the determining factors of migration, distribution and accumulation of natural radionuclides in soils, in addition to their chemical properties, are: a humid climate, genetic features of radioactive ore, the presence of permafrost rocks, soil formation processes and the content of organic matter. Under the prevailing conditions of mountain-taiga landscapes, the intensity of wind scattering of waste from dumps is significantly lower than that of hydrogenic. The active leaching of uranium from the rocks of the dumps led to a sharp disturbance in the soils of the Akin Creek valley of the radioactive equilibrium between radium and the parent radionuclide towards its excess. Prolonged uncontrolled exposure of radioactive dumps to the environment contributed to the accumulation of uranium and radium activities in soils to levels of low (14252-66836 Bq/kg) and medium-active (102294-601987 Bq/kg) solid radioactive waste.

1. Введение

На рубеже 50-60-х годов 20 века на территории Южной Якутии в северной части Алданского нагорья (Эльконский горст) были открыты гидротермальные месторождения урана [1]. В 1960-1980 гг. на этих урановых месторождениях были проведены широкомасштабные геологические и геологоразведочные работы путем бурения, проходки канав и подземных горных выработок. Здесь запасы урана по 22 месторождениям были впервые утверждены ГКЗ СССР в 1968 г. [2]. Позднее, еще в течение 16 лет продолжалась разведка основных участков главной рудоносной структуры этого района – зоны Южной и крупного месторождения зоны Северной, разведанные запасы которых были переутверждены ГКЗ в 1981 г. Главная рудовмещающая зона Южная представляет собой подновленный в мезозое древний тектонический шов протяженностью более трёх десятков км. В пределах данной зоны выделяются участки, рассматриваемые как отдельные месторождения: Элькон, Эльконское плато, Курунг, Непроходимое, Дружное и Минеевское. В процессе проведения детальных геологоразведочных работ на этих месторождениях из штолен и шахт были извлечены значительные массы радиоактивных пород на дневную поверхность и складированы в отвалы без соблюдения норм радиационной безопасности. В результате отвалы пород сразу же стали постоянно действующими источниками радиоактивного загрязнения природной среды [3, 4]. Сложившаяся радиоэкологическая обстановка в данном регионе давно беспокоит местных жителей, в последние годы это беспокойство только усиливается, в связи с добычей из руд месторождений Лунное и Северное золота методом кучного выщелачивания, способствующего образованию огромных количеств новых радиоактивных

отходов. Вместе с тем в законсервированных разведочных участках урановых месторождений Эльконского урановорудного района до сих пор слабо изучены физико-химические свойства почв и современные уровни их радиоактивного загрязнения как главных компонентов наземных экосистем, аккумулирующих поллютанты. Целью настоящей работы является оценка радиозоологической обстановки территории складирования в отвалы радиоактивных пород полевыми радиометрическими методами и анализ современных уровней загрязнения почв естественными радионуклидами и их особенностей вертикального распределения по профилю.

2. Результаты и обсуждение

Радиозоологические исследования в районе расположения месторождения Эльконское плато были выполнены в августе-сентябре 2022 г. (Рисунок 1). К данному месторождению относят отрезок центральной части зоны Южной протяжённостью 3,3 км, расположенный между месторождениями Курунг на юго-востоке и Элькон на северо-западе [2]. Разведочные работы на месторождении выполнялись в 1963-1966 и 1968-1980 гг. Возможно значительные по объёму отвалы радиоактивных пород и руд в основном появились в процессе детальных геологоразведочных работ 32-54 года назад. В долине руч. Акин общая площадь, занимаемая радиоактивными отвалами, составляет примерно 16956 м². Участок Эльконское плато располагается в сложнодислоцированной толще архейских, преимущественно гранитизированных диопсидовых, пироксен-амфиболовых и амфибол-биотитовых гнейсов и раннепротерозойских гранитоидов. В начале радиозоологических работ была выполнена площадная радиометрическая съёмка территории, охватывающая место складирования отвалов радиоактивных пород и руд с помощью радиометра СРП-68-01 (НТП «Промприбор», Россия). Закладку почвенных разрезов проводили с учётом возможных преобладающих путей поступления (гидрогенное и аэротехногенное) радионуклидов из источников (отвалы) на почвенный покров. Удельные активности ⁴⁰K, ²²⁶Ra и ²³²Th в почвенных образцах измеряли с помощью сцинтилляционного гамма-спектрометра ПрогрессГамма (НПП «Доза», Россия) при ошибке счёта не более 30 %, а ²³⁸U – рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре S8 Tiger (AXS Bruker, Германия) с ошибкой 10-20 %.

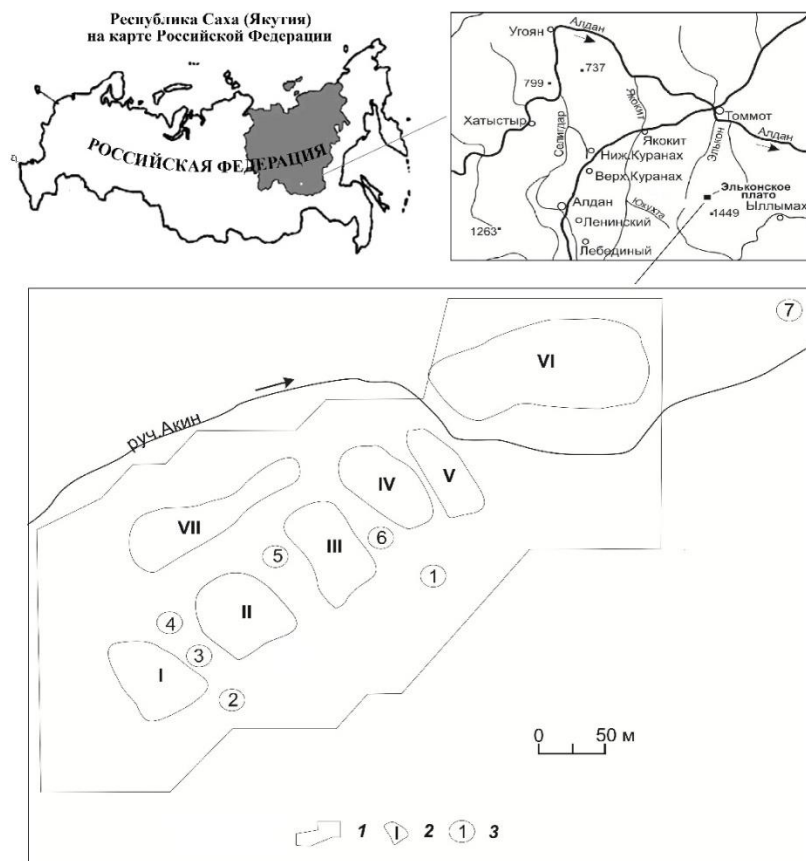


Рисунок 1 – Карта-схема района исследования: 1- площадь радиометрической съемки; 2 – номера отвалов; 3 – номера почвенных разрезов.

Для почв исследуемого района характерны небольшие мощности профилей, значительная каменистость и промывной водный режим. При этом величина pH водной вытяжки в почвах изменяется от кислой (4,3) до слабощелочной (7,2). Количественный состав обменных оснований в почвах значительно варьирует. Например, в подбурах сухоторфянистых, имеющих кислую реакцию pH (4,3-4,8) водной вытяжки, в составе обменных катионов преобладает H^+ , составляя 38,7-108,7 смоль(экв)/кг почвы, а в лугово-болотной оторфованной почве со слабощелочной реакцией среды (7,1-7,2) в составе поглощенных оснований – Ca^{+2} и Mg^{+2} , количество которых равно 40,1-86,4 смоль(экв)/кг почвы. На обследованной территории в почвах водораздела и долине ручья Акин в силу наличия значительной массы слаборазложившегося органического вещества и оторфованности, в почвенных горизонтах значение потери при прокаливании и гумуса достигают 93,5 и 16,4 % соответственно. Для изученных почв обнаруженные минеральные горизонты обычно имеют легко- и среднесуглинистый гранулометрический состав. На территории законсервированного геологоразведочного участка месторождения Эльконское плато результаты проведенной наземной площадной радиометрической съемки показали, что мощность эквивалентной дозы гамма-излучения изменяется от 0,13 до 12,0 мкЗв/ч. При этом наиболее высокие значения мощности дозы фиксируются в основном в пределах контуров отвалов, составляя 1,0-12,0 мкЗв/ч и более. Обнаруженные за пределами площади отвалов участки с повышенным радиационным фоном связаны с загрязнением почв естественными радионуклидами (ЕРН), отсыпкой местности радиоактивными породами и развалинами гранитоидных пород. Так, на карте гамма-поля в южной части площади съемки, на левой стороне, выделяются небольшие по интенсивности гамма-излучения или аномальные участки, ограниченные изолиниями мощности дозы выше 0,3 мкЗв/ч, которые приурочены к глыбам гранитов водораздельного склона. В настоящее время на данных участках ветровое рассеяние ЕРН из отвалов не вносит существенный вклад в формирование мощности дозы гамма-излучения из-за слабого уровня поверхностного загрязнения пород. В радиоактивных породах отвалов удельная активность ^{40}K

составляет 878-3486, ^{238}U – 41-18204 и ^{232}Th – 15-322 Бк/кг [5]. По данным геологов-поисковиков в рудах месторождения Эльконское плато между ураном и радием существует радиоактивное равновесие [2]. Это означает, что активность радия в этих рудах должна быть равной активности его материнского радионуклида – урана. Наибольшие значения активностей калия, урана и тория были зафиксированы в первом отвале. Отметим, что на обследуемой территории фоновые уровни удельных активностей ^{40}K в почвах и горных породах (кристаллические сланцы, гнейсы, гранитоиды) изменяется от 355 до 1510 Бк/кг, ^{238}U – от 15 до 105 Бк/кг и ^{232}Th – от 5 до 316 Бк/кг. Из этих данных следует, что удельная активность тория в отвалах варьирует в пределах местного геохимического фона, а калия и урана превышают таковые в среднем в 5 и 463 раза соответственно. В целом отвалы по составу представляют отбитые массы руд и околорудных вмещающих горных пород разной крупности, вынесенные на поверхность из штольни после некоторой радиометрической сортировки для складирования на промышленной площадке. Радиационный фон и активности ЕРН в отвалах соответственно изменяются от фоновых до аномально высоких значений. На месте закладки почвенных разрезов мощность дозы гамма-излучения на поверхности изменяется от 0,16 до 5,0 мкЗв/ч. При этом удельная активность ^{40}K в почвах варьирует в пределах 57-1148 Бк/кг, ^{238}U – 11-565367 Бк/кг, ^{226}Ra – 16-36680 Бк/кг и ^{232}Th – 4-269 Бк/кг (табл.). Среди изученных почв наибольшие значения удельных активностей ЕРН обнаружены в лугово-болотной оторфованной почве (Таблица 1, разр. 3) формирующейся на лугу вблизи первого отвала. В данной почве калий, радий и торий по глубине распределяются одинаково. Максимумы удельных активностей этих радионуклидов обнаруживаются в верхней части почвы с постепенными уменьшениями их значений по глубине. Для урана такой закономерности не обнаруживается. На общем повышенном фоне удельной активности урана по всему профилю лугово-болотной оторфованной почвы, максимумы значений обнаруживаются в верхней и нижней части профиля на глубинах 4-11 и 29-39 см, соответственно составляя 567367 и 371460 Бк/кг. Обнаруженный максимальный уровень активности урана в данной почве превышает таковой в рудной массе отвала в 31 раз, а местный повышенный геохимический фон – в 5384 раза. Возможно, из отвала уран мигрирует преимущественно в составе жидкого, а калий, радий и торий твердого стоков. Значительную обогащенность ураном лугово-болотной оторфованной почвы можно объяснить: во-первых, высокой выщелачиваемостью его из рудной массы отвала, а во-вторых, застойностью воды на луге в период затяжных дождей из-за наличия островной мерзлоты,

Таблица 1 – Удельная активность и распределение ЕРН в почвах

Горизонт	Глубина, см	^{40}K	^{238}U	^{226}Ra	^{232}Th	$\frac{^{226}\text{Ra}}{^{238}\text{U}}$
		Бк/кг				
Подбур сухоторфянистый, разрез 1						
О	0-2	н.о*	34	45	н.о	1,32
А0А	2-5	н.о	25	30	н.о	1,20
А	5-10	177	34	32	4	0,94
АВ	10-17	132	22	26	4	1,18
В	17-24	158	30	36	5	1,20
ВС	24-31	197	33	30	5	0,91
	Среднее	166	29	33	5	1,13
Подбур типичный, разрез 2						
О	0-2	н.о	11	16	н.о	1,45
А0А	2-4	178	13	12	9	0,92
АВ	4-6	207	23	25	9	1,08
В	6-12	444	14	19	13	1,37
ВС	12-31	503	19	16	13	0,84
	Среднее	333	16	18	11	1,13
Лугово-болотная оторфованная, разрез 3						
Аv	0-4	1717	227575	19237	165	0,08
Ат	4-11	2088	565367	36620	269	0,06
Ат	11-24	1025	318388	11820	267	0,04

Вт	24-29	1407	334421	4431	258	0,01
Вт	29-39	580	371460	3149	140	0,008
BC	39-56	599	154980	2151	83	0,01
	Среднее	1236	328698	12901	197	0,03
Аллювиальная, разрез 4						
О	0-1	н.о	1754	113	н.о	0,064
Ат	1-3	338	123000	175	58	0,001
А	3-5	1148	101758	536	112	0,005
АВ	5-12	1038	66617	219	87	0,003
В	12-17	788	15055	90	30	0,006
BC	17-23	103	6335	28	11	0,004
С	23-30	585	3702	37	16	0,010
	Среднее	667	46329	171	52	0,006
Подбур сухоторфянистый, разрез 5						
А0Ат	0-7	1332	12817	1435	150	0,11
Ат	7-16	868	1156	213	75	0,18
АтВ	16-30	1136	2312	374	131	0,16
	Среднее	1112	5428	674	117	0,15
Подбур сухоторфянистый, разрез 6						
О	0-2	н.о	314	29	8	0,09
А0Ат	2-5	57	1347	43	14	0,03
Ат	5-8	156	2812	38	25	0,01
Ат	8-13	136	2011	59	44	0,03
Ат	13-18	123	601	23	81	0,04
АтВ	18-23	197	389	24	88	0,06
В	23-28	104	311	37	71	0,12
BC	28-40	134	298	40	64	0,13
	Среднее	130	1010	35	49	0,06
Аллювиальная темногумусовая, разрез 7						
О	0-3	90	57	18	4	0,31
А0А	3-8	165	74	25	12	0,34
АВ	8-16	446	98	31	16	0,31
BC	16-32	769	98	25	16	0,26
	Среднее	368	82	25	12	0,31

*н.о – не обнаружено.

а также её испарениями в жаркие дни. На обследованной площади островная мерзлота, создающая водоупор в основном распространена на месте расположения первого отвала. Поэтому здесь после длительных летне-осенних дождей из-под отвала появляется временный водный сток, направленный в сторону небольшого луга, расположенного посреди леса. Просочившаяся по толще пород отвала дождевая вода значительно обогащается ураном до 0,04 Бк/л, что на 4 порядка выше местного геохимического фона [6]. В тоже время в этой же воде объёмная активность радия не превышает его фонового уровня. Активной водной миграции радия здесь препятствует пирит-карбонат-калиевошпатовый состав метасоматической радиоактивной руды с высокими содержаниями K_2O , CO_2 карбонатов и S сульфидов, формирующий сульфатно-натриево-кальциевый состав водного стока [2]. В аллювиальной темногумусовой почве (табл., разр. 4) формирующейся вне площади луга в условиях отсутствия многолетней мерзлоты, вертикальное распределение урана с калием, радием и торием становится схожим. В данной почве максимальные значения удельных активностей ЕРН фиксируются в верхней части почвы, а минимальные – в нижней. При фильтрации воды в этой почве наибольшее количество ЕРН задерживается верхними горизонтами почв. При этом ежегодные поступления на поверхность почв слаборадиоактивной хвои, листьев и надземной части отмиравших трав немного объединяют верхние слои радионуклидами. Поэтому во многих случаях максимумы удельных активностей ЕРН оказываются в погребенном состоянии. Это очевидно по вертикальному распределению ЕРН, которое присутствует в почвенных разрезах 3, 4 и 6. В долинной части обследованной площади интенсивная гидрогенная

миграция урана из отвалов хорошо отражается в отношении активностей радия к урану в почвах (разр. 3-7), которая изменяется от 0,001 до 0,34 (табл.). В целом уровень гидрогенного техногенного радиоактивного загрязнения почв в зоне воздействия отвалов несравнимо больший, по сравнению с аэральным. В почвах, формирующихся на водораздельном склоне выше отвалов (разр. 1, 2), подвергающихся только аэротехногенному воздействию за счёт выдувания ветром с поверхности отвалов мелкодисперсной пылевой фракции руды, в их верхней части отмечаются уровни загрязнения ураном и радием на два-пять порядков величин ниже, чем таковые в почвах долины. Резкое уменьшение удельных активностей урана и радия в аллювиальной темногумусовой почве (табл., разр. 7), развивающейся на высокой пойме ручья Акин на расстоянии 120 м от промышленной площадки, по сравнению с почвами, формирующимися вблизи отвалов, указывает на значительную роль почвенного покрова как естественного геохимического фильтра на пути миграции ЕРН. В настоящее время опубликованные в открытой печати данные показывают, что в некоторых странах СНГ и Российской Федерации в районах размещения предприятий по добыче и переработке урановых руд обнаруженные значения техногенных загрязнений урана в грунтах и почвах составляют 2044-219600 Бк/кг [7,8]. Эти величины вполне сопоставимы с уровнями загрязнения почв ураном (1347-565367 Бк/кг) на территории законсервированного месторождения Эльконское плато. На обследованном участке данного месторождения удельные активности радионуклидов в некоторых почвах чрезвычайно высокие, поэтому целесообразно оценить их соответствия по данному радиационному показателю к радиоактивным отходам. Так, согласно ОСПОРБ 99/2010 к твердым радиоактивным отходам относятся не предназначенные для дальнейшего использования материалы, изделия, оборудование, биологические объекты, грунты удельные активности техногенных радионуклидов в которых превышают минимально значимые удельные активности радионуклидов (МЗУА) (сумма отношений удельных активностей техногенных радионуклидов к их МЗУА превышает 1) [9]. Установленные в НРБ-99/2009 МЗУА для ^{238}U составляет 10000 Бк/кг, ^{226}Ra – 10000 Бк/кг и ^{232}Th – 1000 Бк/кг [10]. В почвенных разрезах 3, 4 и 5 обнаруженные активности ^{238}U и ^{226}Ra превышают их МЗУА 1,2-57,0 и 1,2-3,7 раза соответственно. В целом по суммарной активности ЕРН данные почвы относятся к низко- (14252-66836 Бк/кг) и среднеактивным (102294-601987 Бк/кг) твердым радиоактивным отходам [9].

3. Выводы

В настоящее время радиоэкологическая обстановка на территории законсервированного геологоразведочного участка на месторождении Эльконское плато в Южной Якутии чрезвычайно сложная. Площадная радиометрическая съёмка показала, что вынос на поверхность огромной массы радиоактивных пород и складирования их в долине ручья Акин существенно изменили исходный радиационный фон территории. Наибольшие значения мощности эквивалентной дозы гамма-излучения на поверхности отвалов достигают до 1,0-12,0 мкЗв/ч и более. Радиоактивные отвалы бесконтрольно загрязняют природную среду ЕРН за счёт их водного и ветрового рассеяния. При этом в силу гумидного климата горно-таежных ландшафтов Алданского нагорья водная миграция ЕРН из отвалов в составе жидкого и твердого стоков играет исключительно важную роль в их загрязнении. В почвах долины радиоактивное равновесие между ураном и радием нарушено в сторону избытка материнского радионуклида. В сложившейся радиоэкологической ситуации почвы долины ручья Акин выполняют роль естественного геохимического барьера на пути миграции ЕРН. В настоящее время в этих почвах уровни загрязнения ураном и радием настолько высокие, что соответствуют низко- и среднеактивным радиоактивным отходам. В целом законсервированный геологоразведочный участок месторождения Эльконское плато требует проведения неотложных природоохранных мероприятий по рекультивации данной территории для перевода её в безопасное состояние.

4. Благодарности

Работа выполнена за счёт средств Государственной программы «Обеспечение экологической безопасности, рационального природопользования и развития лесного хозяйства РС (Я) на 2018-2022 годы» и в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по проекту: № 0297-2021-0027, ЕГИСУ НИОКТР № АААА-А21-121012190033-5.

5. Литература:

- [1] 50 years of the Geological Service of the Republic of Sakha (Yakutia) / State. com. The Republic of Sakha (Yakutia) on Geology and subsoil use, Russian Geological Society; [comp.: M.S. Argunov, G.V. Denisov]. Moscow: Russian Geological Society: State. com. Republic of Sakha (Yakutia) on geology and subsoil use, 2007. 381 pp.
- [2] Mashkovtsev G.A., Konstantinov A.K., Miguta A.K., Shumilin M.V., Shchetochkin V.N. Uranium of the Russian subsoil. Moscow: VIMS, 2010. 850 pp.
- [3] Sobakin P.I., Molchanova I.V. Radioecological studies of technogenically disturbed areas of the landscape in the zone of the uranium deposit of the Republic of Sakha (Yakutia) // Flaw detection. 1994. No. 9. pp. 70-74.
- [4] Sobakin P. I., Molchanova I. V. Migration natural heavy radionuclides in the soil and pland cover under conditions of technogenic pollution // Russian Journal of Ecology. 1998. vol. 29. no. 2. pp. 81-84.
- [5] Sobakin P.I., Ushnitsky V.E., Gerasimov Ya.R. Assessment of the radioecological situation of the Elkon uranium ore region (Aldan shield) by field radiometry methods // Geology of ore deposits. 2022. Vol. 64. No. 2. pp. 191-204.
- [6] Sobakin P.I. Natural and artificial radionuclides in permafrost soils of Yakutia. Author's abstract. dis.... doct. Biol. sciences. Ulan-Ude: Institute of General and Experimental Biology SB RAS, 2015. 39 pp.
- [7] Babaev B.D. Physical and chemical bases of uranium migraine in the drainage valley-soil system using the example of a storage tank No. 1-2 in Tajikistan. The autorefer. cand. of chemical sciences. Dushanbe: S.N. Nikitin Institute of Chemical Engineering, Academy of Sciences, Republic of Tajikistan, 2010. 23 pp.
- [8] Karpenko E.I., Sanzharova N.I., Spiridonov S.I., Serebryakov I.S. Radioecological situation in the area of the former uranium mining enterprise NPO Almaz // Radiation and risk. 2009. Vol. 18. No. 4. pp.73-81.
- [9] Basic sanitary rules for radiation safety (OSPORB-99/2009). SP 2.6.1.799-99. Moscow: Federal center for hygiene and epidemiology of Rospotrebnadzor, 2009. 83 pp.
- [10] Radiation safety standards (NRB-99/2010): Hygiene standards. Moscow.: Center for sanitary and epidemiological regulation, hygienic certification and expertise of the Ministry of health of Russia, 2010. 72 pp.

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ С УЧЕТОМ КОЛИЧЕСТВА НЕЗАМЕРЗШЕЙ ВОДЫ

Надежда Таппырова, Ольга Кравцова, Надежда Протождяконова
ФГБУН ФИЦ «ЯНЦ СО РАН» «Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН», 677980, Россия, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1

THERMAL CONDUCTIVITY OF FINE SOILS TAKING INTO ACCOUNT THE AMOUNT OF UNFROZEN WATER

Nadezhda Tappyrova, Olga Kravtsova, Nadezhda Protodyakonova
Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS,
1, Oktyabrskaya str., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. At present, a large amount of experimental data has been accumulated on the thermo physical characteristics of soils at positive and negative temperatures. To generalize these data and to reduce the amount of experimental work carried out, it is necessary to systematize and expand the work on the calculation of thermal conductivity of soils. In this paper, a method for calculating thermal conductivity for fine soils in frozen and thawed states is proposed. The calculation models used include a shell model in combination with a model with interpenetrating components. An approximation of the dependence of volumetric heat capacity on temperature was experimentally obtained and the amount of unfrozen water was calculated to account for the temperature dependence of the thermal conductivity of fine soil.

1. Введение

В настоящее время широкое распространение для определения теплофизических свойств дисперсных грунтов получили расчетные методы. При этом теплопроводность грунтов рассчитывается двумя способами:

- эмпирическими формулами, полученными на основе экспериментальных данных [1];
- при помощи различных моделей, полученных на основе теории обобщенной проводимости [2, 3].

Например, в работе [4] на основе полученного экспериментального материала авторы разработали и протестировали 3 модели для определения теплопроводности 3 видов грунтов (песок, супесь, илистый суглинок) только при положительных температурах, а также влияния на нее засоленности и влажности. Авторы работы [5] разработали модель, позволяющую рассчитать теплопроводность мерзлых песчаных грунтов в зависимости от влажности и температуры замерзания в узком диапазоне изменения теплопроводности: $0,9355 \div 0,9853$ Вт/(м·К).

В настоящий момент, актуальной является разработка моделей расчета эффективной теплопроводности для мелкодисперсных грунтов, основанных на теории обобщенной проводимости. Для расчета теплопроводности мелкодисперсных грунтов Р.И. Гаврильевым предложена оболочечная модель [3]. Автор применил данную модель для расчета теплопроводности мелкодисперсных грунтов при полной влагонасыщенности.

В данной работе предложена модель, позволяющая рассчитать теплопроводность для мерзлых и талых мелкодисперсных грунтов с учетом количества незамерзшей воды для не полностью влагонасыщенных грунтов, т.е. часть пор заполнена воздухом.

2. Методика и результаты исследований

Для исследования был взят мелкодисперсный грунт с Амгинского месторождения Республики Саха (Якутия). Пределы пластичности: нижний предел - 20,2%, верхний предел - 38,8% и число пластичности $I_p=18,6\%$ [6]. Плотность скелета грунта – $1,4$ г/см³. Плотность частицы грунта,

определенная пикнометрическим методом, равна $2,63 \text{ г/см}^3$. Согласно ГОСТ-у 25100-2011, данный грунт относится к глинистым грунтам, а именно к суглинкам. Теплопроводность частицы мелкодисперсного грунта берется равной $2,37 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, а значение теплопроводности незамерзшей воды - $0,58 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ [7].

Для расчета теплопроводности мелкодисперсных грунтов в талом и мерзлом состояниях нами применяется модель многокомпонентной оболочечной системы, предложенная в работе [3], но с измененными компонентами (Рисунок 1).

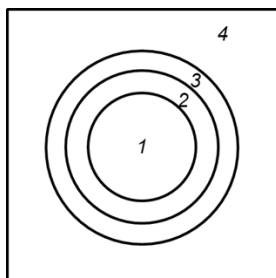


Рисунок 1 – Схема модели четырехкомпонентной оболочечной системы:

1 - минеральный скелет грунта; 2 – пленка незамерзшей воды; 3- оболочка льда; 4 – воздух.

Формулы для расчета теплопроводности четырехкомпонентной оболочечной системы можно представить в виде:

$$(1) \lambda_0 = \lambda_{л-вз} \frac{N + 2M}{N - M},$$

где $\lambda_{л-вз}$ – теплопроводность бинарной смеси лед-воздух, $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$, а переменные N и M определяются выражениями:

$$(2) N = (1 + w_n d_{ск}) \left[2\lambda_{л-вз} + \lambda_{нв} + \frac{2}{1 + w_{нв} d_{ск}} \cdot \frac{(\lambda_{нв} - \lambda_{ск})(\lambda_{л-вз} - \lambda_{нв})}{2\lambda_{нв} + \lambda_{ск}} \right],$$

$$(3) M = (1 + w_{нв} d_{ск}) (\lambda_{нв} - \lambda_{л-вз}) - \frac{(\lambda_{нв} - \lambda_{ск})(2\lambda_{нв} + \lambda_{л-вз})}{2\lambda_{нв} + \lambda_{ск}},$$

где w_n , $d_{ск}$, $\lambda_{нв}$, $\lambda_{ск}$, $\lambda_{л-вз}$, $w_{нв}$ – полное влагонасыщение, дол. ед.; плотность частиц грунта, г/см^3 ; теплопроводности незамерзшей воды, скелета грунта, бинарной смеси лед-воздух, $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$; количество незамерзшей воды, дол. ед. соответственно.

Для проведения расчетов требуется дополнительная информация по значениям теплопроводности компонент (лед, минеральная частица, незамерзшая вода), а также по плотности скелета грунта и его частицы, значениям влажности грунта и количества незамерзшей воды. Данные по температурной зависимости теплопроводности льда приводятся в работе [8].

В данной работе для расчета теплопроводности приведены значения количества незамерзшей воды, взятые из работы [9] (Таблица 1).

Таблица 1 – Температурная зависимость количества незамерзшей воды в глинистом грунте

$W_{нв}$, дол. ед.	0,136	0,105	0,078	0,047	0,036	0,035	0,035
t , °С	-0,75	-1,95	-3,65	-9,0	-17,0	-25,0	-35,0

Теплопроводность бинарной смеси лед-воздух $\lambda_{л-вз}$ вычисляется по модели с взаимопроникающими компонентами, описанной Дульневым Г.Н., Заричняком Ю.П. в работе [2].

Расчет теплопроводности в талом состоянии, проводится уже по модели трехкомпонентной оболочечной системы, схема которой показана на рисунке 2.

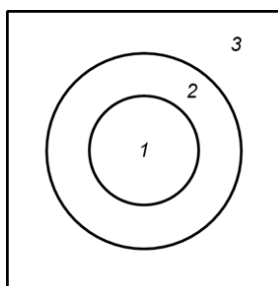


Рисунок 2 – Схема модели трехкомпонентной оболочечной системы:
1 - минеральный скелет грунта; 2 – оболочка воды; 3 – воздух.

В этом случае вместо $\lambda_{т-вз}$ в формуле (1) подставляется значение теплопроводности влажного воздуха $\lambda_{вз}$, а количество незамерзшей воды принимается равным нулю $w_{не}=0$.

Тогда формулы (2) - (3) принимают следующий вид [3]:

$$(4) \quad N = (1 + m_{вз}) \left[2\lambda_{вз} + \lambda_{вд} + 2 \cdot \frac{(\lambda_{вд} - \lambda_{ск})(\lambda_{вз} - \lambda_{вд})}{2\lambda_{вд} + \lambda_{ск}} \right],$$

$$(5) \quad M = (\lambda_{вд} - \lambda_{вз}) - \frac{(\lambda_{вд} - \lambda_{ск})(2\lambda_{вд} + \lambda_{вз})}{2\lambda_{вд} + \lambda_{ск}},$$

где $\lambda_{вд}$ - теплопроводность воды, Вт/(м·К).

Теплопроводность влажного воздуха представляются, как сумма теплопроводности сухого воздуха $\lambda_с$ и диффузионной составляющей $\lambda_д$

$$(6) \quad \lambda_{вз} = \lambda_с + \lambda_д,$$

где $\lambda_д$ составляет 0,03 Вт/(м·К) [3].

На рисунке 3 показано сравнение экспериментальных и расчетных данных зависимости теплопроводности от влажности для талого и мерзлого глинистого грунта. Экспериментальные данные взяты из работ [3] и [10], поскольку значения плотности грунтов, температуры и влажности совпадают. Полученные значения теплопроводности, рассчитанные по формуле (1), хорошо согласуются с экспериментальными данными, как для мерзлого, так и для талого состояния. Экспериментальные данные получены для температуры +10°C и -10°C соответственно, для этих же температур проводились расчеты. Наибольшее расхождение результатов наблюдается при влажностях 5% и 30%.

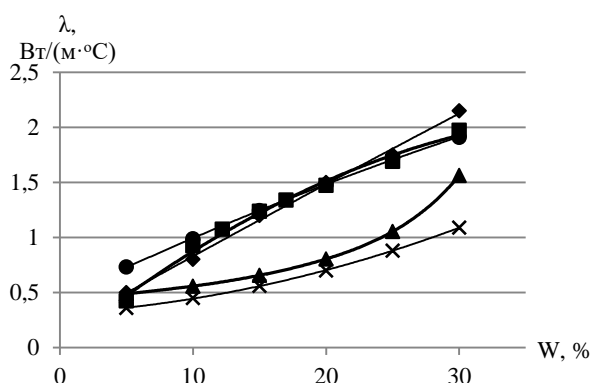


Рисунок 3 – Теплопроводность мелкодисперсного грунта в мерзлом и талом состояниях
Мерзлый: ■ – расчет по формулам (1)-(3), ♦ - данные Гаврильева Р.И., ● -данные Павлова А.В. Талый: ▲ – расчет по формулам (4) – (5), х – данные Гаврильева Р.И.

В мерзлом состоянии максимальное расхождение с данными, взятыми из работы [3] составляет 8%, а с данными работы [10] - 43%. Такое большое расхождение можно объяснить тем, что экспериментальные данные из работы [10] получены путем осреднения большого числа определений и, по словам самого автора, расхождение может составлять 30-40%.

В талом состоянии расхождение результатов лежит в пределах 15-17%, за исключением значения при влажности грунта 30%, где расхождение составляет 40%. Для талого состояния не приводятся данные из работы [10], так как они определены при другой температуре (+4°C).

Для мелкодисперсных грунтов в мерзлом состоянии при малых влажностях происходит резкое увеличение значений теплопроводности, а в талом состоянии происходит медленное увеличение. Эти особенности вытекают из механизма связывания воды минеральными частицами, исходя из которого, обычно выбираются структурные модели грунтов и на его основе выводятся формулы расчета теплопроводности грунтов. В талых мелкодисперсных грунтах вследствие того, что частицы обладают большой поверхностной энергией при увлажнении в первую очередь, образуется пленка связанной влаги вокруг частиц, только затем (перед полным влагонасыщением) возникают сплошные тепловые мостики между последними. Основная влага уходит на образование слоев связанной воды, а теплопроводность в мерзлом состоянии повышается при образовании льда за счет замерзания пленочной воды.

3. Выводы

На основе полиструктурной модели Дульнева Г.Н., Заричняка Ю.П. и модели многокомпонентной оболочечной системы Гаврильева Р.И., нами была разработана многокомпонентная модель ненасыщенного мелкодисперсного грунта, которая учитывает в качестве взаимопроникающих компонентов влажный воздух и лед, а также незамерзшую воду. В талом состоянии для глинистых грунтов рассматривается трехкомпонентная оболочечная система (минеральная частица, вода и воздух), а в мерзлом – четырехкомпонентная, которая учитывает количество незамерзшей воды. Для расчета теплопроводности используются значения количества незамерзшей воды, найденные экспериментальным путем для того же вида грунта и при той же температуре. Сравнение экспериментальных и расчетных значений теплопроводности позволяет сделать вывод о том, что предложенная методика хорошо работает как для талых, так и для мерзлых грунтов в широком диапазоне изменения влажности.

4. Благодарности

Работа выполнена в рамках бюджетного проекта ИФТПС СО РАН FWRS-2024-0032 «Исследование тепломассообменных процессов в многокомпонентных дисперсных средах для повышения надежности и безопасности природно-технических систем в условиях глобальных изменений криолитозоны».

5. Литература:

- [1] Stepanov A.V. Heat and mass transfer properties of technogenic soils of the cryolithozone. Novosibirsk: Nauka, 2011, 150 pp.
- [2] Dulnev G.N., Zarichnyak Yu.P. Thermal conductivity of mixtures and composite materials. Leningrad: Energia, 1974, 269 pp.
- [3] Gavrilyev R.I. Thermophysical properties of the components of the natural environment in the cryolithozone: A reference guide. Novosibirsk: Nauka, 2004, 146 pp.
- [4] Malek K. M. K., Khanmohammadi F. International Communications in Heat and Mass Transfer 127, 105516 (2021), DOI:10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105516.
- [5] Firat M. E. O. Measurement 181, 109586 (2021), DOI:10.1016/j.measurement.2021.109586.
- [6] Timofeev A.M., Kravtsova O.N., Tappyrova N.I., Ivanov V.A., Protodiakonova N.A. calculating and experimental method for determining the specific heat capacity of dispersed soil and bound water // Vestnik Mezhdunarodnoj akademii xoloda, 2019, № 4, pp. 92-97. DOI: 10.17586/1606-4313-2019-18-4-92-97.
- [7] Stepanov A.V., Timofeev A.M. Thermophysical properties of dispersed materials. Yakutsk: YaSC SB RAS, 1994, 124 pp.
- [8] Groisman A.G. Thermophysical properties of gas hydrates. Novosibirsk: Nauka, 1985, 95 pp.

- [9] Starostin E.G., Timofeev A.M. Temperature regime of dispersed media at negative temperatures taking into account the phase equilibrium of the pore solution // *Nauka i obrazovanie*, 2006, № 1(41), pp. 36 – 40.
- [10] Pavlov A.V. *Thermal physics of landscapes*. Novosibirsk: Nauka, 1979, 284 pp.

ПРОБЛЕМА ПРОИСХОЖДЕНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ ЛЕДОВОГО КОМПЛЕКСА

Владимир Тумской, Татьяна Романис

ФГБУН «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН»,
677010, Россия, г. Якутск, Мерзлотная, 36

THE PROBLEM OF ICE COMPLEX DEPOSITS ORIGIN

Vladimir Tumskoy, Tatyana Romanis

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36, Permafrost str., Yakutsk, 677010, Russia

Abstract. Ice Complex is a widespread type of syncryogenic frozen deposits in the permafrost zone, represented mainly by silty deposits with ice wedges. There are three main groups of hypothesis about its origin - fluvial, aeolian (loessoids) and polygenetic. This abstract substantiates a new view on the Ice Complex, within which it is shown that the Ice Complex is a strata identified according to cryogenetic criteria, and not geological-genetic ones. Therefore, it makes no sense to talk about a single genesis of the sediments that make up the Ice Complex. Cryolithological and geomorphological features indicate that the main geological processes of sedimentation were lacustrine-alluvial and deluvial-solifluction, and also, probably, aeolian. However, the specifics of syncryogenesis largely neutralized the genetic characteristics of sediments (composition, lamination), and partially changed the conditions of their occurrence in intrapolygonal lakes, including due to heaving during segregated ice release and cryopedogenesis. As a result, the sedimentological features of the genesis of sediments were largely destroyed and now a search for new criteria for establishing the geological genesis of sediments is required.

1. Введение

Ледовый комплекс (ЛК) – «особый горизонт, насыщенный жилами льда, более или менее единый и плащевидно залегающий на обширных участках, но неоднородный по возрасту, составу, генезису и мощности». Такое определение дал этому понятию, вводя его в научный обиход, П.А. Соловьев [1] на основании исследований льдистых отложений в Центральной Якутии. Однако под ним все же подразумевалось не столько геологическое тело с определенными условиями залегания («особый горизонт, ..., плащевидно залегающий...»), сколько сами отложения, содержащие ПЖЛ и текстурный лед. Сходные по составу и криогенному строению отложения с сингенетическими ПЖЛ были описаны задолго до этого, еще в конце XIX-начале XX вв., на территории приморских низменностей северной Якутии и по долинам ее крупных рек (Яны, Индигирки, Колымы и др.) [2]. Здесь эти отложения вскрывались в обрывах рек и на морском берегу в пределах обособленных возвышенностей – едом, разделенных аласными котловинами, поэтому со временем их стали называть едомными отложениями и выделили в самостоятельную едомную свиту [3]. В результате дальнейших исследований в центральной и северной Якутии разные исследователи показали, что строение, состав, условия залегания и возраст едомных отложений и ледового комплекса во многом сходны, в результате чего в 70-80-е годы XX столетия эти понятия стали использоваться как синонимы [4]. Не вдаваясь здесь в проблемы с терминологией отмечу, что одной из самых обсуждаемых проблем в геологии Северо-Востока России стала и остается до сих пор проблема происхождения отложений ЛК.

Проблема генезиса отложений ЛК связана с несколькими вопросами:

1. почему толща отложений ЛК имеет покровный характер залегания и распространена на разных высотах (от 0 до 200-300 м) и гипсометрических уровнях (формирует разные террасовые уровни в речных долинах, распространены на склонах и т.д.)?

2. почему ЛК имеет относительно однородный гранулометрический состав с резким преобладанием частиц пылеватой фракции (до 70-90%)?
3. в каких тектонических, геологических и климатических условиях формировались такие отложения с мощностью до 50-60 м, возможно, и более?
4. почему ЛК имеет столь высокую льдистость, достигающую 60-95%?
5. почему именно с отложениями ЛК связаны практически все находки остатков представителей мамонтовой фауны?

2. Проблема понимания происхождения ледового комплекса

В начале 50-х годов XX столетия было окончательно доказано П.А. Шумским, Б.И. Втюриным, А.И. Поповым и другими, что основная масса подземных залежеобразующих льдов в толще ЛК представляет собой ПЖЛ, а не ледниковый лед. Одновременно были сформулированы представления о сингенетическом росте таких ПЖЛ одновременно с осадконакоплением [5]. Свою теорию сингенеза А.И. Попов обосновывал наблюдениями за формированием ПЖЛ в долинах рек, поэтому аллювиальное происхождение отложений, вмещающих ПЖЛ, во многом было априорным. Широкому распространению аллювиальной (озерно-аллювиальной) концепции происхождения ЛК способствовало также то, что основные изучавшиеся тогда обнажения располагались в долинах рек. Через некоторое время было показано, что сходные льдистые толщи с ПЖЛ, обладая некоторой спецификой, залегают и на склонах горных массивов [6,7]. Со временем генезис отложений ЛК дополнялся и другими возможными условиями осадконакопления – озерными, болотными, нивальными, делювиально-солифлюкционными и делювиальными, пролювиальными и др. Одновременно появилась и активно развивалась другая точка зрения – отложения ЛК представляют собой эоловые, лессовые, образования [8], накапливавшиеся в условиях, принципиально отличных от тех, которые реконструировали сторонники «флювиальной» гипотезы. Эта точка зрения во многом совпадала с представлениями, которые закрепились в Северной Америке [9]. Из-за значительного содержания льда, обычно существенно преобладающего в толще ЛК, последнюю часто рассматривают как криогенно-эоловые отложения [8], а присутствие почвенных горизонтов позволяет рассматривать их как криопедолиты [10].

Особо бурные дискуссии развернулись в 70-80-е годы прошлого столетия между представителями флювиальной (озерно-аллювиальные) и эоловой (криогенно-эоловой, лессовой) гипотез. С каждой стороны приводились доводы геолого-тектонического, палеогеографического, биолого-палеонтологического и мерзлотного характеров, однако к общему мнению исследователи так и не пришли. Этому способствовали как неодинаковая изученность разрезов, расположенных в разных географических и геолого-геоморфологических условиях, так и то, что каждая гипотеза рассматривалась как всеобъемлющая, универсальная для всех типов и разрезов ЛК. Однако по мере того, как накапливались результаты детальных аналитических исследований, выяснилось, что состав отложений ЛК не так уж однороден, отличается и льдистость, увеличиваясь в целом к северу, есть отличия и в составе палеонтологических находок. Сторонники флювиальной гипотезы, анализируя новые данные, постепенно пришли к концепции полигенетического происхождения ЛК, полагая, что в различных районах области его распространения присутствуют отложения аллювиального, озерного, болотного и склонового (преимущественно делювиально-склонового) генезиса. Сторонники же криогенно-эолового происхождения северных лессов остались при своем мнении.

В настоящее время, в результате развития четвертичной геологии как науки и подходов к картографированию четвертичных отложений, реализуется новая концепция, в рамках которой выделяется новый тип отложений – лессоиды [11]. Под ними понимаются все алевритистые отложения субэзральной формации. Отложения ЛК при этом разделяются на два подтипа – арктический и субарктический – и картируются как лессоиды криогенно-эолового происхождения.

В результате складывается странная ситуация: несмотря на многочисленные данные о неоднородном составе отложений ЛК, их далеко не всегда покровном залегании, просадочности совершенно иного типа (для типичных лессов характерна просадочность при замачивании, но она никак не связана с протаиванием), многочисленных следах эрозионных перестроек и т.д., ЛК рассматривается как лессоид. Под этим подразумевается, что ЛК имеет криогенно-эоловый генезис и как самостоятельное картируемое тело выделяется по доминирующему составу отложений. С точки зрения геологического картирования такой подход, безусловно, является удобным, т.к. позволяет отражать на картах толщу с характерным обликом, легко идентифицируемую на местности. Однако такой подход идет вразрез с основным принципом разделения четвертичных отложений по генезису, а не по составу: все остальные четвертичные образования на картах выделяются по их генезису, а не по составу. Логика геологов-четвертичников, занимающихся картированием, понятна. Но для реконструкции процессов и обстановок на территории распространения отложений ЛК такой подход, по мнению автора, все же неприемлем, т.к. имеющиеся сведения о мерзлых четвертичных образованиях не позволяют считать, что, кроме эолового осадконакопления, на обширных территориях криолитозоны больше никаких геологических процессов не развивалось. Что же делать?

По мнению автора, проблема определения генезиса ЛК заключается в том, что само изучаемое геологическое тело рассматривается исследователями неверно. ЛК воспринимается всеми как единая толща потому, что она имеет ярко выраженный физиономичный облик – в обнажениях ЛК выражен в виде столбов или решетки льда ледяных жил и грунтовых столбов со значительным объемом текстурных льдов. Именно высокая степень льдистости за счет ПЖЛ и заставила рассматривать эту толщу как единое целое. Но такой подход к ее обособлению от других образований подразумевает, что толща ЛК выделяется не по составу и генезису отложений, и даже не по условиям залегания, а по криогенному строению и степени льдистости, т.е. на основании криогенных признаков, а не седиментологических. Это позволяет рассматривать ее как единое криогенетическое образование, т.е. мерзлые породы, имеющие одно – синкриогенное – происхождение с точки зрения образования подземных льдов. Установление же геологического (седиментологического) генезиса собственно отложений, т.е. определение геологических процессов или их совокупности, приведших к накоплению отложений с определенными структурно-текстурными особенностями, типом слоистости и т.д. – задача иная и существенно более сложная. Тем не менее, только ее решение позволит нам решить вопрос генезиса отложений ЛК в том же смысле, что и для всех остальных типов четвертичных отложений. Так почему же она до сих пор не решена?

Как отмечают практически все исследователи, и это прекрасно видно во всех разрезах ЛК, доминирующий элемент строения ЛК – решетка ПЖЛ. ПЖЛ формируются на протяжении тысяч и десятков тысяч лет, имея в своей основе развитие процесса морозобойного (криогенного) растрескивания. Как показали многочисленные исследования [12], морозобойному растрескиванию могут быть подвержены все типы субэрадных и континентальные типы некоторых субаквальных отложений независимо от их гранулометрического состава, т.е. весьма широкий спектр генетических типов континентальных отложений. Таким образом, почти любой генетический тип континентальных отложений в условиях криолитозоны в эпохи климатических похолоданий (криохроны) мог подвергаться этому процессу. Однако рост ледяных жил, тем более в условиях продолжающегося осадконакопления, ведет к появлению полигональных форм микрорельефа. Образующиеся при этом многочисленные полигональные озера не позволяют формироваться тонкой слоистости, типичной для того или иного процесса переноса осадка, т.к. они преобразуют любой механизм осадконакопления в «озерно-прудиновый» за счет того, что конечная седиментация происходит через водную толщу, хоть и небольшую по глубине (не более 1 м). Кроме того, полигональные озера и болотца способствуют усилению криогенной дезинтеграции любых осадков в условиях полного обводнения при циклическом промерзании/протаивания в пределах сезонно-талого слоя (СТС) и льдовыделения. Независимо

от соотношения ширины ледяных жил и поперечника грунтовых столбов между ними, чередующиеся в грунтовых столбах ледяные прослои, формирующие наиболее типичную поясковую криогенную текстуру (КТ), и минеральные прослои с органическими включениями, почти всегда деформированы в результате роста ледяных жил и образования текстурного льда. Последний приводит к распучиванию отложений. Дополнительно происходит и почвенное преобразование осадочного материала, что периодически в условиях замедления осадконакопления приводит к формированию выраженных в разной степени почвенных горизонтов в толще ЛК.

В результате, процесс морозобойного растрескивания, приводящий к росту ПЖЛ, изменяет микрорельеф поверхности и условия осадконакопления при почти любом типе осадконакопления, т.е. генезисе собственно осадка. Их генетические признаки не формируются или маскируются/уничтожаются спустя короткое время после осадконакопления. В разрезах ЛК остается доступной для изучения только макрослоистость, обусловленная периодическими изменениями темпов осадконакопления и почвообразования, увлажнения и льдовыделения, однако и она проявляется только через решетку ПЖЛ. Благодаря ей, а также развитию различных типов криогенных контактов, часто можно видеть следы неполного протаивания или частичного размыва толщи ЛК, что, как минимум, свидетельствует о развитии не только процессов эоловой седиментации. Протекание процессов седиментации и льдообразования геологически синхронно приводит к тому, что лед сразу занимает определенный объем образующейся толщи, а некоторый его «избыток» за счет проникновения ПЖЛ на глубину до 5-10 км компенсируется выжиманием льда ПЖЛ наверх. Это снимает один из первых вопросов исследователей (куда девался грунт, замещенный льдом?) – его место изначально было занято льдом.

Таким образом, широкое развитие процесса морозобойного растрескивания в криохроны и рост ПЖЛ предопределили нивелирование типичных признаков осадконакопления для различных процессов первичной транспортировки материала. Участие в формировании толщ не только осадков, но и льда, предопределило резкое увеличение их мощности при относительно неизменных или даже потенциально более низких скоростях собственно осадконакопления. В результате изменение рельефа и высот террас происходило в криолитозоне в разы быстрее, чем вне нее, что обычно не учитывается при реконструкции условий и темпов осадконакопления. Во время потеплений климата обратные процессы (термокарст, термоэрозия и т.д.) также способствовали значительно более интенсивному преобразованию рельефа, что в меньших масштабах происходит и в настоящее время. В целом можно утверждать, что в криолитозоне все геологические изменения происходят интенсивнее и с большей амплитудой.

Не вдаваясь в многочисленные детали, на основании вышесказанного, можно утверждать, что ледовый комплекс – это высокольдистые дисперсные отложения неоплейстоценового возраста с сингенетическими повторно-жильными льдами (ПЖЛ), формировавшиеся в эпохи похолоданий. По сути ЛК – это именно криолитологический тип отложений, потому что, например, голоценовые собственно-аласные отложения (озерно-болотные), мелководно-озерные, пойменные, многие толщи склоновых отложений имеют такое же криогенное строение, как и ЛК, отличаясь немного составом и параметрами льдистости. При этом ширина ледяных жил, например, в голоценовых собственно-аласных отложениях, вполне сопоставима и даже может превышать поперечник ледяных жил в ЛК. Поэтому неотнесение к ЛК голоценовых отложений с ПЖЛ и сходным криогенным строением связано только с историей развития геокриологии и, вполне возможно, временно.

Только в силу гораздо более широкого и длительного развития морозобойного растрескивания в криохроны, подвергавшиеся ему различные типы отложений воспринимаются ныне как единая толща. «Покровный» характер ее залегания обусловлен этой же причиной – морозобойное растрескивание всегда развивается с поверхности. Однако давно и достоверно известны разновысотные террасовидные уровни (например, уровень едомной поверхности с относительной высотой 35-40 м и вложенной в нее второй надпойменной террасы высотой 15-18 м в низовьях р. Яны), сложенные разновозрастными отложениями ЛК. Известно, что

мощность отложений ЛК увеличивается вниз по долинам рек, вниз по склонам в пределах межгорных котловин и т.д. Все эти факты сложно объяснить с точки зрения их эолового происхождения.

3. Выводы

Ледовый комплекс – специфический тип криолитогенных образований, который, в отличие от других типов четвертичных образований, характеризуется в равной степени двумя генезисами – криогенным и геологическим. При этом криогенный генезис для них единый – это синкриогенные отложения, а первичный геологический может изменяться от места к месту. Говорить, что ЛК полигенетический – можно, но это ничего нам не дает. Единой толщей отложения ЛК являются только с криолитологической точки зрения, представляя собой синкриогенное образование. С точки зрения геологического происхождения самих отложений, они имеют отличающийся генезис в каждом конкретном месте, как и любые другие типы четвертичных образований. Толщу ЛК можно картировать как единое целое, но только на криолитологических картах. Для дальнейшего развития геологии четвертичных отложений необходимо искать и разрабатывать новые критерии или комплексы признаков, по которым возможно реконструировать условия и процессы переноса осадков, маскируемые последующим криогенным диагенезом за счет роста ПЖЛ и текстурного льдообразования. Только это позволит продвинуться в понимании плейстоценового процесса во многих районах криолитозоны.

4. Благодарности

Работа выполнена в рамках НИОКТР 122011800064-9 (сбор мерзлотно-геологических данных) и при финансовой поддержке грантов РФФИ № 22-17-00176 и № 23-77-10046 (анализ данных о микростроении).

5. Литература:

- [1] Soloviev P.A. Permafrost of the northern part of Lena-Amga watershed. – Moscow, AN SSSR Publ., 1959. - 142 p. (in Russian).
- [2] Shumsky P.A. Essay on the history of ground ice research. – Yakutsk, Yakutsk book Publ., 1959. – 53 p. (in Russian).
- [3] Vas`kovsky A.P. Essay on the stratigraphy of Anthropogenic (Quaternary) deposits of the North-East of Asia. In: *Geologiya Koryakskogo nagorya*. Moscow, 1963. - Pp. 143-168 (in Russian).
- [4] Kaplina T.N., Lozhkin A.V. Age of “ice complex” on the coastal lowlands of the Yakutia // *Izvestiya AN SSSR, ser. geogr.* – 1982. - №2. - Pp. 84-95 (in Russian).
- [5] Popov A.I. Peculiarities of lithogenesis of alluvial plains in severe climate // *Izvestiya AN SSSR, ser. geogr.* - 1953. - №2. – Pp. 29-43 (in Russian).
- [6] Gravis G.F. Slope deposits of Yakutia (accumulation conditions and freezing, cryogenic structure). – Moscow, Nauka Publ. - 1969 (in Russian).
- [7] Konishchev V.N. Formation of the composition of dispersed deposits in the cryolithosphere. – Novosibirsk, Nauka Publ., 1981. - 197 p. (in Russian).
- [8] Tomirdiaro S.V. Less-ice formation of the Eastern Siberia in the Late Pleistocene and Holocene. – Moscow, Nauka Publ., 1980. - 184 p. (in Russian).
- [9] Péwé T., Journaux A. Origin and character of loess-like silt in unglaciated south-central Yakutia, Siberia // *Geological Survey. Professional paper 1262.* – Washington: United States Government Printing Office. – 1983. – 46 p.
- [10] Gubin S.V. Soil formation at the Late Pleistocene on the territory of the Eurasian North-East // *Doklady RAN.* – 1996. – Vol. 351, № 4. – Pp. 544–546. (in Russian).
- [11] Astakhov V.I., Pestova L.E., Shkatova V.K. Loessoids of the Russian Federation: distribution and age // *Regional'naya geologiya i metallogeniya.* – 2021. – № 87. – Pp. 42–60. DOI: 10.52349/0869-7892_2021_87_42-60. (in Russian).
- [12] Romanovsky N.N. Polygonal ice-wedge structures formation. – Novosibirsk, Nauka Publ., 1977. – 213 p. (in Russian).

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В ЭЛКОНСКОМ УРАНОВО-РУДНОМ РАЙОНЕ (ЮЖНАЯ ЯКУТИЯ)

Александр Чевычелов, Пётр Собакин, Алексей Горохов
ФГБУН ФИЦ «ЯИЦ СО РАН» «Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр. Ленина, 41

GEOECOLOGICAL AND GEOCHEMICAL BASES OF FORMATION OF RADIOACTIVE CONTAMINATIONS IN THE ELKONSKY URANIUM ORE DISTRICT (SOUTH YAKUTIA)

Alexander Chevychelov, Pyotr Sobakin, Alexey Gorokhov
Institute of Biological Problems of the Cryolithozone SB RAS,
41, Lenin ave., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. The radiation indicators of rock dumps, ground and surface water, atmospheric air and residential air, as well as alluvial soils of technogenic landscapes of the South Elkon uranium-ore region in the territory of South Yakutia were studied. It has been shown that the most active dumps in their radiation parameters are close to radioactive ores, while the exposure dose rate here is 1600-2150 $\mu\text{R/h}$, the effective specific activity of natural radionuclides is 20441-23640 Bq/kg, and the uranium content is 1637-1888 mg/kg. Ranking of the studied dumps according to the degree of radiation hazard showed that only 2 dumps out of 31 (6,4 %) belong to the category of safe, 13 (41,9 %) – to the category of potentially hazardous, and 7 and 9 (22,6 % and 29,0 %) – respectively categories of dangerous and especially dangerous. In the mountainous terrain, cold and humid climate of the study area, these rock dumps, unevenly distributed over an area of about 500 km² of mountain-taiga landscapes, are the main source of radioactive contamination of air, ground and surface water, and soil cover. At the same time, the maximum values of uranium and radon content in the studied surface and groundwater, respectively, were 8,0 and $32,2 \cdot 10^{-5}$ g/l, as well as 112 and 3090 Bq/l. In the studied technogenic zones, there is a direct relationship between the intensity of pollution of surface waters and alluvial soils drained by them, formed in the floodplains of these watercourses.

Key words: rocks, soils, surface and underground waters, air, radiation parameters, technogenic pollution.

1. Введение

Во второй половине 20 века на территории Южной Якутии были развернуты широкомасштабные геологоразведочные работы на радиоактивное сырье. По данным Госатомнадзора Дальневосточного округа РФ в ходе почти 25-летнего периода проведения данных работ в процессе детальной геологической разведки было извлечено из недр и складировано на дневную поверхность в отвалы более 1 млн. т рудной массы. Общее количество урана, содержащегося в данной рудной массе, составляет около 2000 т [3]. Это исходно предполагает значительные масштабы радионуклидного загрязнения территории. Учитывая то, что данные радиоактивные отвалы горных пород находятся в области гипергенеза, уже почти 50 лет, также необходимо полагать то, что зоны техногенного загрязнения, фиксируемые по аномальным значениям содержаний естественных радионуклидов в составе почвенного покрова, поверхностных и подземных вод, а также воздуха занимают здесь значительные площади. При этом наиболее загрязненной оказалась территория зоны Южной. Целью проведенных исследований являлась геоэкологическая и геохимическая оценка формирования радиоактивных загрязнений почвенного покрова, поверхностных и подземных вод в данном районе и оценка их опасности на основе радиационных критериев. В ходе выполнения работ использовался комплексный методологический подход, представляющий сочетание

геоэкологических, геохимических и радиоэкологических методов исследования с точными и экспрессными методиками полевых и лабораторных работ [2].

2. Результаты и их обсуждение

Горст образовался на месте крупной синклинали структуры северо-западного направления. Это складчато-глыбовое ступенчатое сооружение, максимальная высота которого 1498 м (голец Медвежий), ограничено со всех сторон разломами. На исследуемой территории в основном можно выделить два главных типа рельефа – эрозионно-тектонический среднегорный рельеф и эрозионно-аккумулятивный рельеф речных долин и террас. Климат исследуемого района может быть охарактеризован как очень континентальный, холодный и супергумидный. При этом коэффициенты континентальности и увлажнения по Н.Н. Иванову соответственно равны 224 и 1,9. Годовое количество осадков на изучаемой территории составляет 635 мм, а испаряемость – 336 мм, при этом 299 мм выпадающих атмосферных осадков удаляется в виде поверхностного и внутригрунтового стока. Согласно флористическому районированию, исследуемая территория входит в состав Алданского района. Здесь в горах выражена биогеоценотическая поясность, начиная с высоты 650-800 м над ур. м. появляются горные леса, высокогорные редины и редколесья, а выше, в подгольцовом поясе, преобладают кедровостланиковые сообщества и курумники [2].

Основным источником радиоактивного загрязнения изучаемых мерзлотно-таёжных ландшафтов в Эльконском ураново-рудном районе (ЭУУР) является 31 отвал горных пород, неравномерно размещенный на общей площади около 500 км² (Рисунок 1).

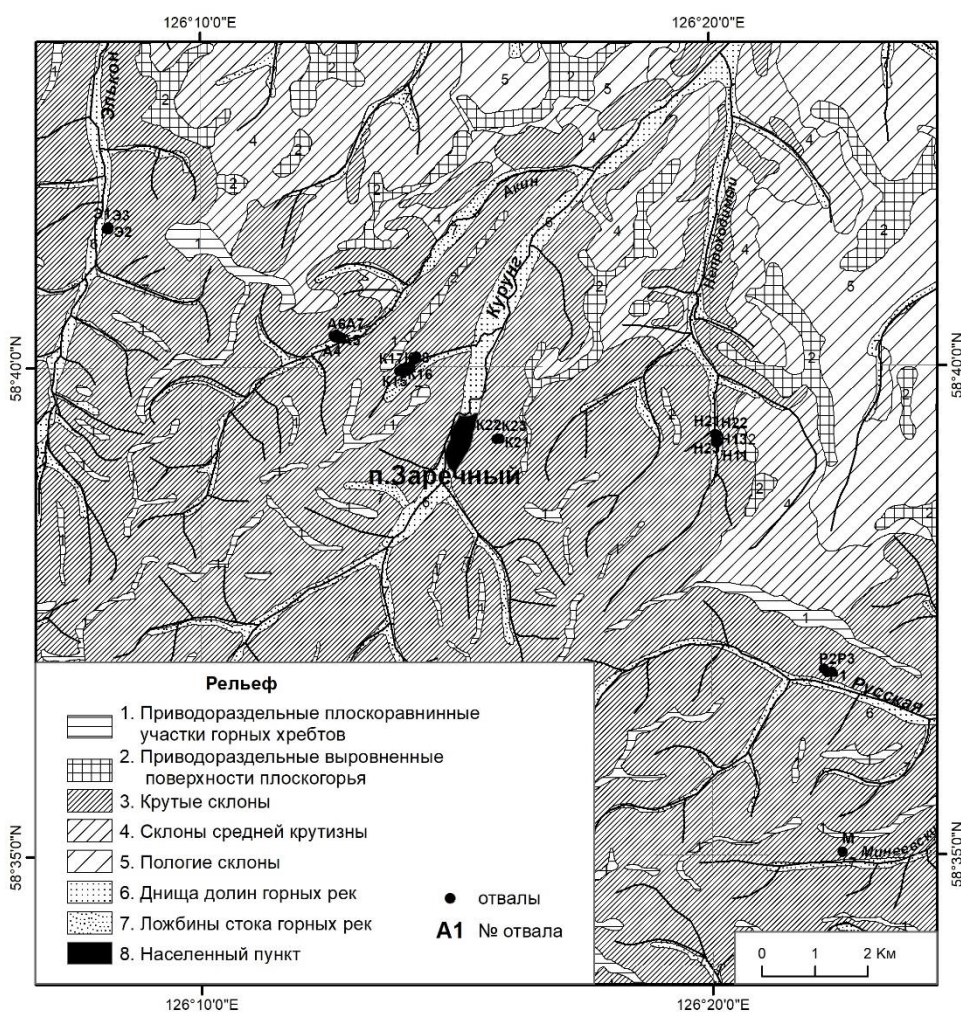


Рисунок 1 – Расположение радиоактивных отвалов горных пород зоны Южная в Эльконском ураново-рудном районе

Гамма-фон на поверхности отвалов изменяется от 11 до 2150 мкР/ч. Наиболее активные отвалы расположены в бассейне реки Курунг, на участках с условными названиями Акин и Курунг 1. На территории этих участков в отдельных точках гамма-фон может достигать до 3000 мкР/ч. Учитывая то, что средние значения гамма-фона на поверхности радиоактивных отвалов зоны Южная изменяются в пределах 11-896 мкР/ч, а на территории Алданского щита – соответственно 5-50 мкР/ч, необходимо констатировать, что значения мощности экспозиционной дозы (МЭД) на отвалах в среднем в 2-18 раз выше таковых, чем в условиях регионального фона. Результаты лабораторного гамма-спектрального анализа показали, что содержание радионуклидов в мелкоземле отвалов горных пород изменяется в широких пределах: урана (по радио) от 2 до 1888 мг/кг, тория – 2-80 мг/кг, а калия от 0,8 до 4,5 мг/кг. При этом особенно вариабельно изменение концентраций урана, почти в пределах трех порядков величин (в 1000 раз). Максимальные фиксируемые концентрации урана в породах отвалов зоны Южная (1900 мг/кг) соответствуют верхнему пределу средних содержаний данного элемента в рудах ЭУРР (1200-1800 мг/кг) [6]. Кроме измерений гамма-фона и определения концентраций радиоактивных элементов в отвалах, также оценивали эффективную удельную активность радионуклидов (Аэфф) по формуле, принятой в нормах радиационной безопасности (НРБ-99) [9]:

$$A_{эфф} = A_{Ra} + 1,3A_{Th} + 0,09A_K,$$

где A_{Ra} и A_{Th} – удельные активности ^{226}Ra и ^{232}Th , находящихся в равновесии с остальными членами уранового и ториевого рядов, A_K – удельная активность ^{40}K (Бк/кг). Эффективная удельная активность в мелкоземле обследованных отвалов изменяется от 68 до 23640 Бк/кг. В последнее время, используя рекомендации ОСПОРБ-99 [1], И.М. Хайкович с соавторами [7] разработали по величине $A_{эфф}$ классификацию для всех промышленных типов месторождений твердых полезных ископаемых по степени радиационной опасности. Согласно этой классификации, все месторождения подразделяются на четыре категории (класса): особо опасные (1), опасные (2), потенциально опасные (3) и безопасные (4). В нашем случае по этой классификации 29,0 % всех обследованных отвалов зоны Южная попадают в категорию 1, 22,6 % и 41,9 % соответственно в категории 2 и 3, а остальные 6,4 % – в категорию 4. При этом из 31 отвала более половины, то есть 16 (или 51,6 %) попадают на основе средних значений эффективной удельной активности естественных радионуклидов в категории опасных и особо опасных.

Концентрация радона в исследованных поверхностных водах водотоков изменяется от 1,4 до 112,0 Бк/л [4]. Наиболее высокие концентрации ^{222}Rn , а также ^{238}U отмечены в воде ручья Пропадающего, дренирующего радиоактивные отвалы месторождения "Курунг" (Таблица 1). Так, если за фоновые значения концентрации данных элементов принять количества ^{238}U и ^{222}Rn , соответственно равные $3,4 \cdot 10^{-7}$ г/л и 1,4 Бк/л, то в воде руч. Пропадающего максимальные значения данных радионуклидов в 235 и 80 раз превышают фоновые значения. Содержание радона в подземных водах на обследованной территории урановых месторождений изменяется в интервале 29-3090 Бк/л. Самая высокая концентрация радона (3090 Бк/л) обнаружена в воде скважины, пробуренной в 2010 г. в пойме р. Элькон до глубины 200 м, в которой содержание ^{222}Rn почти в 52 раза превышала санитарно-гигиенический норматив равный 60 Бк/л (Таблица 2). Измерения концентрации радона в атмосферном воздухе на участках законсервированных месторождений Эльконское плато и Курунг показали, что она изменяется от 42 до 389 Бк/м³, а плотность его потока варьирует от 14 до 2928 мБк/с·м² (Таблица 3).

Таблица 1 – Концентрация урана и радона в поверхностных водах

№	Река (ручей)	Место отбора проб, км от устья	^{238}U , $n \cdot 10^{-7}$ г/л	^{222}Rn , Бк/л
1	Река Элькон	~ 3 км	3,5	1,4
2	Река Курунг	~ 9,5 км	4,0	3,5

3	Ручей Акин	устье	3,5	3,4
4	— // —	~ 5,5 км	24,0	12,5
5	— // —	~ 6 км	3,9	10,2
6	Ручей Пропадающий	~ 0,3 км	34,0	8,4
7	Ручей Пропадающий	~ 1,4 км	800,0	112,0
8	Ручей Пропадающий	~ 2,0 км	3,8	11,8
9	Река Курунг	~ 22 км	3,4	11,7

Таблица 2 – Содержание радионуклидов в подземных водах

Месторождение	Место отбора проб	^{238}U	^{222}Rn
		$n \cdot 10^{-5}$ г/л	Бк/л
Северное	Подножие водораздельного склона р. Курунг, скважина	0,1	29
	Надпойменная терраса р. Курунг, скважина	0,2	59
Элькон	Пойма р. Элькон, скважина 1	19,5	640
	Пойма р. Элькон, скважина 2	32,2	3090
Эльконское плато	Надпойменная терраса р. Акин, подножие отвалов, родник	8,6	280
Курунг	Подножие левого водораздела р. Курунг, штольня	2,4	198
Непроходимое	Подножие правого водораздельного склона руч. Непроходимый, родник	0,1	2164
Дружное	Долины р. Русская, скважина	1,9	70
	Подножие водораздела р. Русская, штольня	1,8	249

Полученные величины существенно превышают фоновые концентрации радона в открытом воздухе, которые обычно изменяются от 2 до 6 Бк/м³, а средняя плотность его потока с поверхности земли составляет примерно 16 мБк/с·м² [8]. Из данных таблицы 3 видно, что концентрация радона в воздухе над отвалами практически не зависит от концентрации радия в породах отвалов, что, видимо, связано с циркуляцией атмосферного воздуха и эманулирующей способностью пород отвалов, которая зависит от их дисперсности, выветрелости и трещиноватости. Установлено также, что при разных концентрациях радия в почве и мелкозем отвалов интенсивность эманации ^{222}Rn отличается. В ходе радиоэкологических работ, проведенных в заброшенном геологическом пос. Заречный, расположенном в зоне уранового месторождения "Курунг", также было исследовано содержание радона в воздухе некоторых жилых домов, оставшихся после ликвидации поселка.

Таблица 3 – Концентрация ^{222}Rn в воздухе (Бк/м³) и плотность его потока (мБк/с·м²)

№	Место измерения, субстрат	Гамма-фон,	^{226}Ra ,	^{222}Rn	
		мкР/ч	$n \cdot 10^{-11}$ %	Бк/м ³	мБк/с·м ²
Месторождение «Эльконское плато»					
1	Отвал I, мелкозем	1000	3233	103	2928
2	Отвал II, мелкозем	550	1587	114	386
3	Отвал III, мелкозем	300	833	82	314
4	Луг возле отвала I, почва	107	259	389	335
5	Берег р. Акин возле отвала, песок-галька	50	108	42	14
Месторождение "Курунг"					
6	Отвал I, мелкозем	1010	3148	150	2545
7	Отвал II, мелкозем	620	1077	232	295
8	Отвал III (1)*, мелкозем	150	316	64	56
9	Отвал III (2), мелкозем	70	125	28	31
10	Отвал III (3), мелкозем	240	496	52	141

* В скобках указаны номера точек измерений в пределах площади отвала III, расположенных на

расстоянии 50–70 м друг от друга.

Результаты показали, что в жилой части обследованных помещений концентрация радона обычно изменяется от 34 до 293 Бк/м³ при мощности экспозиционной дозы гамма-излучения 10–13 мкР/ч (Таблица 4). Данные измерения были проведены в летнее время, в условиях хорошей проветриваемости помещений (неутепленные окна, частично открытые форточки и двери), поэтому полученные значения могут быть несколько заниженными по сравнению с зимними, когда квартиры хорошо утепляются и закрываются. Действительно, в воздушной среде подпольных помещений внутри квартир, находящихся в закрытом состоянии, содержание радона изменялось от 432 до 11852 Бк/м³, что в 2–50 раз превышало санитарно-гигиеническую норму, установленную для жилых помещений [1]. Высокие концентрации радона в подпольях, вероятно, связаны с его поступлением через трещины и поры (скважины) почвогрунтов и подземными водами. Обнаруженные значительные концентрации радона в воздухе помещений заброшенного геологического поселка указывают на высокую радоноопасность обследуемой территории [10].

Таблица 4 – Концентрация радона в воздухе жилых помещений заброшенного пос. Заречный

N	Место измерения	Гамма-фон, мкР/ч	²²² Rn, Бк/м ³
5	Жилое помещение	<u>10–13</u> 11	<u>34–293</u> 104
5	Подполье	<u>14–23</u> 19	<u>432–11852</u> 3005

Примечание. N – число точек измерения; над чертой приведены пределы изменения значений, под чертой – их средние величины.

Интенсивность накопления урана в почвах оценивалась на основе его средневзвешенного значения, отнесенного к мощности отдельных почвенных горизонтов (слоев) и содержания в них данного радионуклида [5]. В качестве фонового значения для данных почв принято содержание урана равное 3 мг/кг. Внутрипрофильное распределение урана во всех трех почвенных разрезах неравномерное, что связано со слоистостью состава и свойств, которая является генетическим признаком пойменных (аллювиальных) почв (Таблица 5).

Таблица 5 – Содержание ²³⁸U в аллювиальных почвах Южной Якутии в техногенных зонах на различном удалении от источников радиоактивного загрязнения

Координаты и местоположение, № разреза и название почвы	Глубина, см	Гориз онт	Содержание ²³⁸ U, мг/кг	Kпр
58°40'08,3" N, 126°14'35,6" E, H= 662,0 м. Пойма руч. Пропадающего, дренирующего отвалы участка Курунг 1, в 500 м от начала отвалов. Разрез 2Г-06, почва: аллювиальная темногумусовая	0-3	A0A1	524	175
	4-14	A1	1000	333
	18-28	BC	161	54
	32-42	BC	282	94
	42-52	[AB]	1120	373
	Среднее *			633
58°42'11,8" N, 126°15'29,9" E, H= 627,9 м. То же, в 1350 м от начала отвалов на участке сухого русла данного ручья. Разрез 1Г-06, почва: аллювиальная слоистая	0-1	A0	425	142
	1-4	A1	467	156
	4-9	BC1	27	9
	9-11	[AB]	121	40
	15-25	C1	11	3,7
	35-45	C1	23	7,7
58°42'46,0" N, 126°18'16,4" E, H= 542,8 м. Пойма в долине среднего течения р. Курунг, остров в 8 км от отвалов участка Курунг 1 вниз по течению. Разрез 6ЭГ-03, почва:	55-65	C2	89	30
	Среднее		88	29
	0-2	A0	2	0,7
	2-8	A1	3	1
	8-11	B	9	3
11-14	[AB]	6	2	
14-19	BC	2	0,7	

аллювиальная темногумусовая	19-29	CD	3	1
	Среднее		3,7	1,2

*Средневзвешенное значение для почвенного профиля.

Причем, в почве разр. 2Г-06 отмечается два почти равнозначных по содержанию максимума в распределении ^{238}U на глубине 4-14 и 42-52 см. В почве разр. 1Г-06 распределение данного радионуклида имеет еще более сложный характер – выделяется основной максимум (467 мг/кг) на глубине 1-4 см, затем меньший по значению пик содержания (121 мг/кг) на глубине 9-11 см и, наконец, еще меньший по содержанию пик (89 мг/кг) на глубине 55-65 см. В почвенном профиле разр. 6ЭГ-03 зафиксирован всего один пик содержания урана на глубине 8-11 см в горизонте В над погребенным горизонтом АВ. Интенсивность накопления данного радионуклида в исследуемых аллювиальных почвах падает по мере удаления от радиоактивных отвалов, что полностью подтверждается значениями коэффициента превышения над фоновым содержанием (Кпр). Так, если на расстоянии 500 м от отвалов (разр. 2Г-06) Кпр равен 211, то в 1350 м (разр. 1Г-06) Кпр равен 29, а в почве разр. 6ЭГ-03 на расстоянии 8 км от источника загрязнения отмечается уже только фоновое содержание ^{238}U (Кпр=1.2).

3. Выводы

1. Основным источником радиоактивного загрязнения воздуха, почвенного покрова, поверхностных и подземных вод зоны Южная в Эльконском ураново-рудном районе на территории Южной Якутии является 31 отвал горных пород, неравномерно размещенный на общей площади около 500 км² горно-таежных мерзлотных ландшафтов.
2. Отдельные наиболее активные отвалы по своим радиационным параметрам приближаются к радиоактивным рудам. Так максимальные значения МЭД здесь составляют 1600-2150 мкР/ч, Аэфф – 20441-23640 Бк/кг, а содержание урана – 1637-1888 мг/кг. Ранжирование отвалов по степени их радиационной опасности в соответствии с известными критериями МЭД и Аэфф показало, что только 2 отвала (6,4 %) относятся к категории безопасных, 13 (41,9 %) – к категории потенциально-опасных, а 7 и 9 (22,6 % и 29,0 %) – соответственно к категориям опасных и особо опасных.
3. Максимальные значения содержания урана и радона в изученных поверхностных и подземных водах соответственно составляли 8,0 и 32,2·10⁻⁵ г/л, а также 112 и 3090 Бк/л, что значительно превышает их фоновые концентрации в водах естественных ландшафтов. При этом техногенное загрязнение в поверхностных водах фиксируется, как правило, на расстоянии до 2 км от радиоактивных отвалов горных пород.
4. Интенсивность накопления урана в аллювиальных почвах данного района падает по мере удаления от отвалов, что полностью подтверждается значениями коэффициента относительного превышения над фоновым уровнем (Кпр). Так, если на расстоянии 500 м от отвалов Кпр почвы для ^{238}U был равен 211, то в 1350 м Кпр – 29, а в 8 км ниже – только 1,2.

4. Литература:

- [1] Basic sanitary rules for ensuring radiation safety (OSPORB-99). Ionizing radiation, radiation safety SP 2.6.1.799-99. M.: Ministry of Health of Russia, 2000, 98 pp.
- [2] Chevychelov A.P., Sobakin P.I. Migration of natural radionuclides in technogenic taiga-permafrost landscapes of Southern Yakutia. Novosibirsk: Publishing house SB RAS, 2008, 138 pp.
- [3] Chevychelov A.P., Sobakin P.I., Gorokhov A.N. Radiation-ecological assessment of rock dumps of the Yuzhnaya zone in the Elkon uranium-ore region (Southern Yakutia) // Geocology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology, 2019, No. 6, pp. 65-78.
- [4] Chevychelov A.P., Sobakin P.I., Kuznetsova L.I. Natural radionuclides ^{238}U , ^{226}Ra and ^{222}Rn in surface waters of the Elkon uranium-ore region (Southern Yakutia) // Water Resources, 2019, vol. 46, No. 6, pp. 952-958.
- [5] Chevychelov A.P., Sobakin P.I. Radioactive contamination of alluvial soils of taiga landscapes of Yakutia with ^{137}Cs , ^{226}Ra and ^{238}U // Eurasian Soil Science, 2017, No. 12, pp. 1535-1544.

- [6] Geological and industrial types of uranium deposits in the CIS countries / G.A. Mashkovtsev (ed.). M.: VIMS, 2008, 72 pp.
- [7] Khaikovich I.M., Mats N.A., Kharlamov M.G. Classification of mineral deposits according to radiation hazard // *Regional Geology and Metallogeny*, 1999, No. 8, pp. 131-140.
- [8] Moiseev A.A., Ivanov V.I. Handbook of dosimetry and radiation hygiene. M.: Energoatomizdat, 1984, 295 pp.
- [9] Radiation safety standards (NRB-99): Hygienic standards. M.: Center for sanitary and epidemiological regulation, hygienic certification and examination of the Ministry of Health of Russia, 1999, 116 pp.
- [10] Sobakin P.I., Chevychelov A.P., Dyachkovsky A.P. Migration of radon in the landscapes of the Elkon uranium-ore region (Southern Yakutia) // *Russian Journal of Ecology*, 2011, No. 3, pp. 229-232.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ПРОВЕТРИВАЕМОГО ПОДПОЛЬЯ ЗДАНИЯ БОЛЬШОЙ ПЛОЩАДИ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В Г. ЯКУТСКЕ

Андрей Чжан¹, Павел Заболотник¹, Рудольф Чжан¹, Татьяна Чжан², Александр Гаврильев²

¹ ФГБУН «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН»,
677010, Россия, г. Якутск, Мерзлотная, 36

² ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова»,
677000, Россия, г. Якутск, ул. Белинского, 58

THE ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF THE VENTILATED CRAWL SPACE OF A LARGE BUILDING IN THE CONTEXT OF CLIMATE IN YAKUTSK

Andrei Zhang¹, Pavel Zabolotnik¹, Rudolf Zhang¹, Tatyana Zhang², Aleksander Gavriliev²

¹ Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36, Permafrost str., Yakutsk, 677010, Russia

² North-Eastern Federal University, 58, Belinsky str., Yakutsk, 677000, Russia

Abstract. Renewed thermometric studies have shown that the soils of the foundation of the building of the Republican Hospital No. 1 are in stable condition and even continue to cool. The lowest ground temperature was found in the central and northeastern parts of the building. Research shows that due to the shading effect and the operation of the ventilated crawl space, the temperature of the soil decreases, which has a beneficial effect on the stability of buildings, despite the upward change in air temperature. The data will make it possible to adjust the boundary conditions for the thermal engineering forecast of the thermal interaction of the building with permafrost soils of the base.

1. Введение

При эксплуатации социально значимых объектов, расположенных в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов, необходим регулярный контроль за состоянием грунтов основания и фундамента зданий и сооружений. Одним из таких объектов является комплекс зданий Республиканской больницы №1 – Национального центра медицины («РБ№1-НЦМ») г. Якутска, эксплуатируемый с 1993 года по I принципу (Рисунок 1). Температурная мониторинговая сеть насчитывает 93 скважины глубиной от 6 до 12 м (большинство скважин имеет глубину от 9 до 10 м). В 2023 сотрудники Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (ИМЗ СО РАН) при участии студентов кафедры «Прикладная геология» геологоразведочного факультета Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова (СВФУ) проводили обследования температуры грунтов основания здания центра охраны материнства и детства для оценки эффективности работы проветриваемого подполья под зданием большой площади в условиях изменения климата.

В геоморфологическом отношении территория «РБ№1-НЦМ» расположена в пределах второй Сергеляхской левобережной надпойменной террасы р. Лены в долине Туймаада в пределах южной части Большого Якутска. В геологическом отношении основание зданий представлено современными аллювиальными отложениями: верхняя часть до глубины 3,0 м – супесь и суглинков, нижняя часть до глубины 15 м – песок различной зернистости. Мерзлотные условия участка характеризуются сплошным распространением многолетнемерзлых грунтов со сливающимся слоем сезонного оттаивания [1]. Криогенная текстура песчаных мерзлых грунтов массивная, глинистых – преимущественно слоистая.

Здание центра охраны и материнства «РБ№1-НЦМ» имеет осевую часть, 10 выступающих блоков и 2 эстакады. На сегодняшний день в рабочем состоянии находятся 66 скважин глубиной 9,5–10,0 м (Рисунок 2). Замеры проводились ежеквартально с помощью термогирлянд производства ИМЗ СО РАН согласно ГОСТ 25358-2020.



Рисунок 1 – Общий вид и план на комплекс зданий «РБ№1-НЦМ»: 1 – консультативно-диагностический центр; 2 – центр охраны материнства и детства; 3 – сервисный центр; 4 – кардио-сосудистый центр; 5 – отделение медицинской реабилитации.



Рисунок 2 – Схема расположения термометрических скважин под зданием центра охраны материнства и детства «РБ№1-НЦМ»

2. Результаты исследований

Для анализа эффективности работы проветриваемого подполья были выбраны данные термометрических замеров, выполненных в конце мая и в конце ноября этого года. Также для сравнения имеются частичная информация по замерам проведенных сотрудниками «ЯкутТИСИЗ» в октябре-ноябре 2000 г. Таким образом, имеется возможность оценить динамику температурного поля в основании здания за более чем 20 лет эксплуатации. По результатам замеров было построено распределение температуры грунтов основания на глубине 10 м (Рисунки 3, 4). Анализ показал, что наиболее низкая температура грунта в основании здания приурочена к центральной части здания (блоки П4 и П5), а также эстакады между этими блоками. Высота проветриваемого подполья под центральной частью составляет 1,6 м, а под блоками и эстакадой от 1,7 до 2,5 м. Эта же область характеризуется постоянным затенением территории и северно-западной экспозицией. Юго-восточная часть здания, наоборот, имеет проветриваемое подполье меньшей высоты от 1,2 до 1,4 м и большую часть времени подвержена прогреву солнечной энергией. Также хочется отметить тот факт, что центральная часть здания имеет наименьшее проветривание, что укрепляет предположение о превышении фактора затенения над проветриванием в подполье в формировании температурного режима грунтов основания.

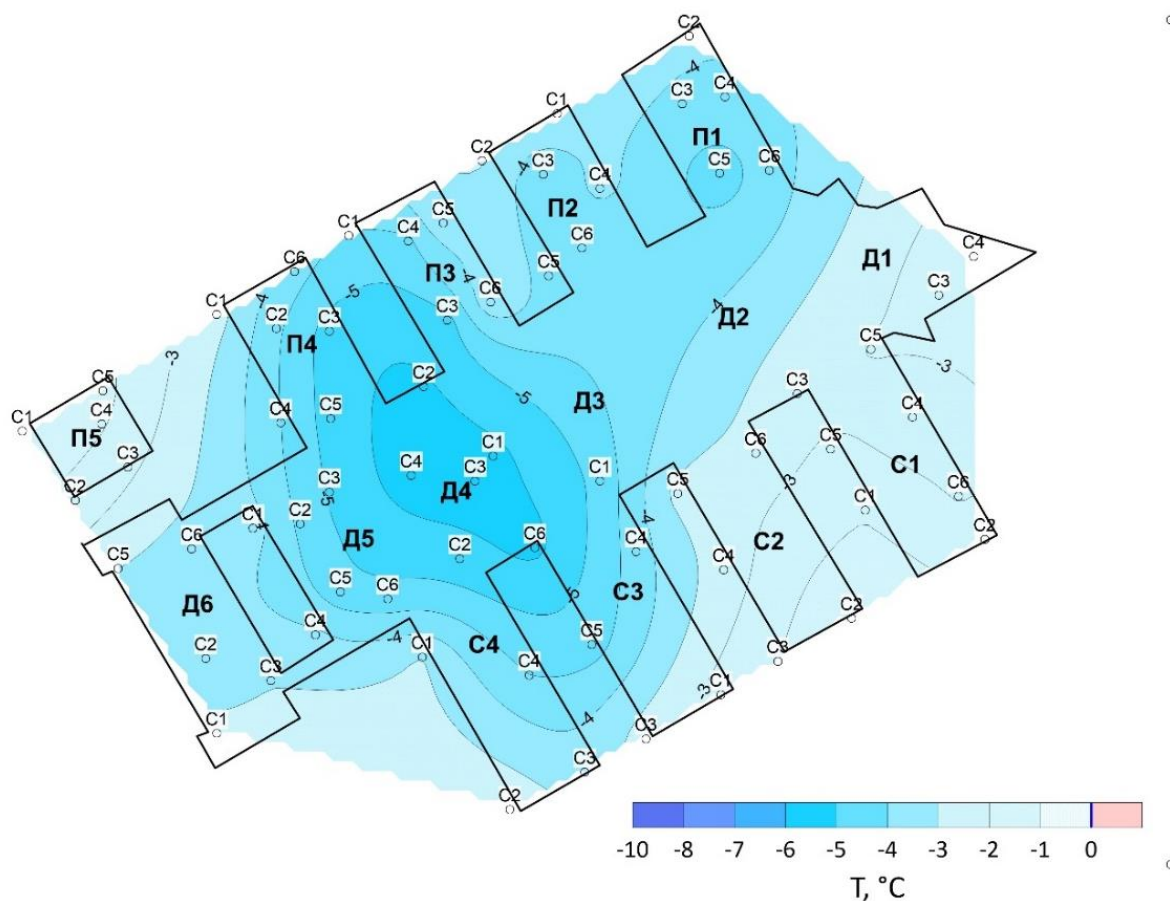


Рисунок 3 – Распределение температуры грунта в основании здания центра охраны материнства и детства «РБ№1-НЦМ» на глубине 10 м на май 2023 г.

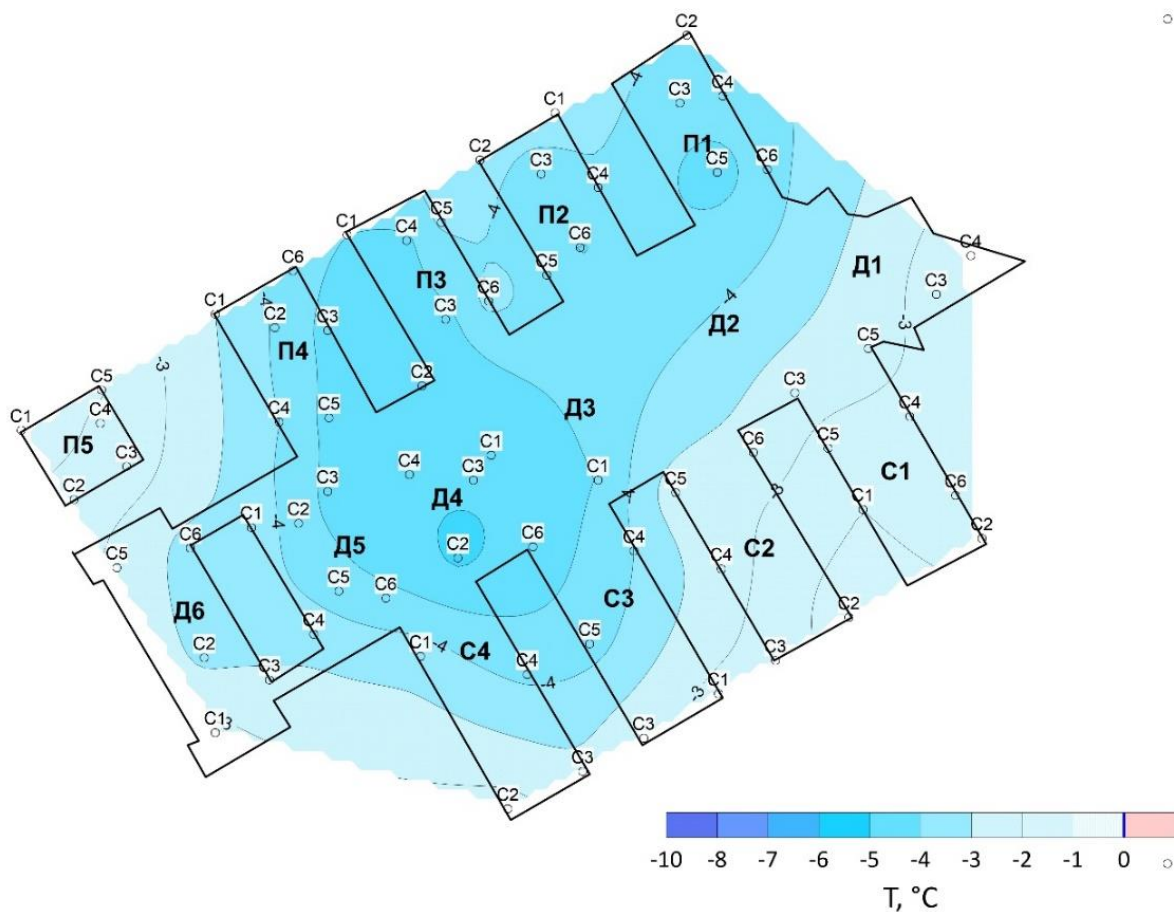


Рисунок 4 – Распределение температуры грунта в основании здания центра охраны материнства и детства «РБ№1-НЦД» на глубине 10 м на ноябрь 2023 г.

Из имеющихся данных «ЯкутГИСИЗ» по блокам П1, П2 и П3 следует, что температура грунтов основания на глубине 10,0 м понизилась. Так, температура грунтов под блоком П1 изменялась от -1,5 до -3,0 °С в ноябре 2000 г., а на сегодняшний момент – от -4,16 до -4,8 °С. Аналогичная ситуация прослеживается под блоком П2: было – -1,9-2,7 °С, стало – -3,6-4,5 °С. Ранее понижение температуры грунтов было зафиксировано под зданием консультативно-диагностического центра. Эти изменения происходят в период, когда температура воздуха, наоборот, повысилась.

3. Выводы

Многолетний мониторинг температуры грунтов в основании зданий показал, что проветриваемое подполье под зданием снижает температуру мерзлоты несмотря на изменение климата в сторону потепления. Однако следует отметить, что такая динамика температурного режима грунта в основании происходит не на всех объектах города и зависит от инженерно-геокриологических, гидрогеологических, техногенных и других условий.

Полученные натурные данные граничных условий, дадут возможность заложить в вычислительные комплексы более надежные характеристики, которые позволят дать адекватную оценку влияния на тепловое состояние грунтов основания здания изменения климата.

Немаловажный момент – доброкачественная эксплуатация сооружения, при которой утечки из водопроводных систем были минимальны или отсутствовали вовсе.

4. Благодарности

Работа выполнена в рамках бюджетного финансирования по теме «Устойчивость природно-технических систем в криолитозоне и разработка технологий использования криогенных ресурсов» Института мерзлотоведения им. П.И. Сибирского отделения Российской академии наук.

5. Литература:

- [1] Melnikov, P.I. The results of geocryological, hydrogeological and engineering–geological studies in Central and Southern Yakutia. – Moscow: P.H. of the USSR Academy of Science, 1963. – 84 p.

ФАКТОРЫ И ПРЕДПОСЫЛКИ РАЗВИТИЯ ТЕХНОГЕННОГО ЗАСОЛЕНИЯ ПОЧВ В СЕВЕРОТАЕЖНЫХ ЛАНДШАФТАХ ЯКУТИИ

Олеся Шадринова

ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

FACTORS AND PREREQUISITES FOR THE DEVELOPMENT OF TECHNOGENIC SOIL SALINIZATION IN THE NORTH TAIGA LANDSCAPES OF YAKUTIA

Olesya Shadrinova

Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

Abstract. Soil salinization is one of the main factors of land degradation. This paper presents the results of studying the development of the processes of technogenic salinization of soils of the North taiga landscapes on the example of the territory of the development of indigenous diamond deposits. As a result of the analysis, it was revealed that in the series "soils of natural landscapes – unsalted soils of an industrial site – saline soils of an industrial site" the following toxic salts are formed: Na_2SO_4 – Na_2SO_4 and MgSO_4 – MgSO_4 , NaCl and CaCl_2 . The main factor of soil salinization is the anthropogenic factor.

1. Введение

Засоление почв является одним из основных видов деградации земель [1]. В настоящее время достаточно обширно изучено и изучаются вопросы техногенного засоления почв в результате нефтедобычи [2-3], месторождений калийных солей [4] и применения антигололедных реагентов [5-6]. На сегодняшний день для территории Якутии становится весьма актуальной проблема развития процессов техногенного засоления почв, которое приобретает довольно масштабный характер, в результате интенсивной разработки и эксплуатации месторождений полезных ископаемых.

2. Объекты и методы исследований

Исследования проводились на территории Айхальского горно-обогатительного комбината (АГОК АК АЛРОСА ПАО), расположенного на северо-западе Якутии в северотаежной ландшафтной зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Для характеристики климата использовался массив данных по метеостанции Шелагонцы, внесенной в Список станций Росгидромета [7], за период с 1985 по 2022 гг. Для оценки аридности климата рассчитаны суммарная испаряемость и коэффициент увлажнения (КУ) путем соотношения осадков к испаряемости по Иванову и коэффициент аридности [8].

Объектом исследования являются почвы и грунты промышленной площадки АГОКа. Опробование произведено в 2019-2023 гг. путем закладки разрезов на всю глубину оттайки с погоризонтным отбором проб, всего отобрано 279 почвенных образца. Образцы высушены и просеяны через сито с ячейей диаметром в 1 мм. Анализировался состав основных ионов в водной вытяжке (1:5), pH почвы измеряли в суспензии почва:вода (1:2,5). Органическое вещество почвы определено фотоэлектрическим колориметрическим методом (КФК-2 УХЛ 4.2). Все анализы проведены в ИГАБМ СО РАН (аналитики Романова А.М. и Свинобоева Н.В.). Корреляционный анализ произведен в программе STATISTICA. Степень засоленности почв оценивалась по содержанию токсичных солей [9], путем соединения ионов в гипотетические соли. К токсичным относятся такие легкорастворимые соли, как Na_2CO_3 , MgCO_3 , NaHCO_3 , $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$, Na_2SO_4 , MgSO_4 , NaCl , MgCl и CaCl_2 .

На территории исследования наблюдается активное развитие процессов засоления в почвах промышленной площадки. При этом, засоление проявляется не при всяком виде воздействия: иной раз, при явных внешних признаках техногенеза на почвенном покрове, в водорастворимом комплексе могут не наблюдаться токсичные соли, и наоборот – зачастую при отсутствии на первый взгляд явных внешних признаков изменения почвенного профиля, почва бывает засолена. Очевидно, что причина кроется в характере и составе водорастворимого комплекса почв, что мы и постараемся раскрыть в данной работе.

3. Результаты

Засоление почв может быть обусловлено как естественными (природные условия, литология и климат), так и антропогенными факторами. Ниже рассмотрим природные условия данной территории.

В геологическом строении исследуемой площади архейский кристаллический фундамент покрыт осадочным чехлом мощностью до 3 км, который выполнен венд-нижнепалеозойскими терригенно-карбонатными и верхнепалеозойскими-нижнепалеозойскими терригенными породами, представленными в основном известняками и доломитами и их глинистыми, мергелистыми разностями. Гипсовые, ангидрит-гипсовые образования развиты в виде прослоев, жил, гнезд, часто образуя карбонат-глинисто-гипсовые слои, залежи каменной соли отсутствуют. На территории исследования выделяются подмерзлотные, межмерзлотные и надмерзлотные воды [10]: межмерзлотные воды залегают на глубине 260-410 м и характеризуются относительно высокими средними значениями коэффициентов эффективной пористости – 4,28-15,33%. По химическому составу относятся к хлоридным магний-натрий-кальциевым рассолам с минерализацией от 74,3 до 310 г/л и слабой щелочной реакцией. Подмерзлотные воды среднекембрийского водоносного комплекса вскрыты на глубине 520-650 м, коэффициент пористости пород составляет 0,16-20,98%, рассолы имеют хлоридно-натрий-магний-кальциевый состав с минерализацией от 126,2 до 153,3 г/л. Выходов на дневную поверхность межмерзлотных и подмерзлотных вод не наблюдается. Надмерзлотные подземные воды представлены водами сезонно-талого слоя, водами гидрогенных подрусловых таликов и водами гидрогенных подземных таликов, водоупором для которых служат многолетнемерзлые породы. Воды характеризуются сплошным распространением, существуют только в период положительного баланса температур, глубина залегания обусловлена мощностью сезонно-талого слоя и не превышает 1-2 м, состав их непостоянен, преимущественно гидрокарбонатно-кальциевый с минерализацией 0,03-0,5 г/л.

Климат территории резко континентальный с минимумами в январе и максимумами в июле. Среднегодовая температура равна -12 °С. Рассчитанный коэффициент увлажнения за 37-летний период в среднем равен 0,8 (что соответствует зоне умеренного увлажнения), а значения суммарной среднегодовой испаряемости за последние 25 лет превышают значения суммы выпадаемых осадков (349 мм/год на 288 мм/год соответственно). Значения индекса аридности за указанный период колеблется в пределах 0,17-0,21, что соответствует сильно аридным территориям.

На территории АГОКа разработаны 5 кимберлитовых трубок: Айхал, Сытыканская, Комсомольская, Заря и Юбилейная. В результате алмазодобывающей деятельности на земную поверхность складировались тонны горных пород из разных глубин. Минимальная глубина отработки каждой из трубок вскрывает толщи с высокоминерализованными межмерзлотными водами, поры пород которых пропитаны этими растворами. Кроме того, отвалы пустых пород имеют разнообразный вещественный состав. Породы, слагающие их, при воздействии внешних природных факторов претерпевают изменения, разрушаются, высвобождаются ионы, которые вместе с фильтрационными и нисходящими токами влаги мигрируют в подчиненные формы рельефа, где они впрягаются в водорастворимый комплекс почв и образуют новые соединения. В рамках данной работы почвенный покров промышленной площадки по результатам анализа водной вытяжки условно разделен на: почвы в зоне прямого воздействия с развитием процессов засоления и почвы, в которых засоление отсутствует. Анализ основных физико-

химических показателей почв позволил сделать вывод, что в почвах при техногенном воздействии увеличивается содержание практически всех ионов, кроме HCO_3^- , при этом значительных изменений водородного показателя с появлением процессов засоления может не наблюдаться (таблица 1). Так, содержание ионов Na^+K^+ , Mg^{2+} и Cl^- резко возрастает в засоленных почвах, оставаясь на одном уровне как в природных, так и в незасоленных почвах под техногенным воздействием. Содержание же сульфатов и кальция имеют тенденцию постепенного увеличения от природных почв к почвам засоленным.

Таблица 1 – Основные усредненные физико-химические показатели почв территории Айхальского ГОКа

Показатели	Почвы природных ландшафтов, n=31		Почвы промышленной площадки			
			Незасоленные, n=47		Засоленные, n=54	
	Среднее	Ст. откл.	Среднее	Ст. откл.	Среднее	Ст. откл.
pH	6,98	1,20	6,95	0,65	7,11	0,87
$C_{\text{орг}}$	8,49	6,23	8,99	6,95	7,71	6,53
HCO_3^-	0,51	0,25	0,42	0,23	0,61	0,32
Cl^-	0,51	0,13	0,51	0,12	1,06	1,60
SO_4^{2-}	0,30	0,39	0,81	2,18	2,78	1,97
Ca^{2+}	0,62	0,23	0,98	1,95	1,60	1,45
Mg^{2+}	0,40	0,18	0,45	0,24	1,00	0,96
Na^+K^+	0,30	0,24	0,32	0,28	1,86	1,27

При проведении корреляционного анализа в учет брались все ионы, а также отдельно высчитанные токсичные ионы кальция, магния, сульфатов и гидрокарбонатов, учитывалось, что все ионы натрия и хлоридов образуют токсичные соединения (рисунок 1). Анализ коррелятивной матрицы показал, что в почвах природных ландшафтов образуются сильные коррелятивные связи между токсичными сульфатами и натрием, которые и вносят существенный вклад в состав суммы токсичных солей (рисунок 1а). При этом стоит отметить, что почвы природных ландшафтов не засолены, а сумма токсичных солей в них ниже предела токсичности. Средние коррелятивные связи наблюдаются между гидрокарбонатами и ионами магния и кальция. Учитывая, что в почвах изучаемой территории по результатам расчетов токсичные ионы HCO_3^- отсутствуют, то можно констатировать, что эта связь обусловлена нетоксичными солями, в пользу чего также говорит и отсутствие корреляции с непосредственно токсичными ионами Na , $\text{Mg}^{2+}_{\text{T}}$ и $\text{Ca}^{2+}_{\text{T}}$. Немного иную картину можно наблюдать уже в почвах, находящихся под тем или иным техногенным воздействием, но в которых все еще отсутствуют процессы техногенного засоления (рисунок 1б). В них наблюдается сильная положительная связь между сульфатами и ионами кальция и магния ($r=0,98$ и $0,69$ соответственно). При этом далеко не все сульфаты токсичны, о чем можем судить по коэффициенту корреляции между SO_4^{2-} и $\text{SO}_4^{2-}_{\text{T}}$, равному $0,57$. Большая часть токсичного магния участвует в образовании токсичных солей с сульфатами ($r=0,57$). Основной

вклад в состав СТС вносят ионы SO_4^{2-} , Na^+ и Mg^{2+} ($r=0,96$ и $0,57$).

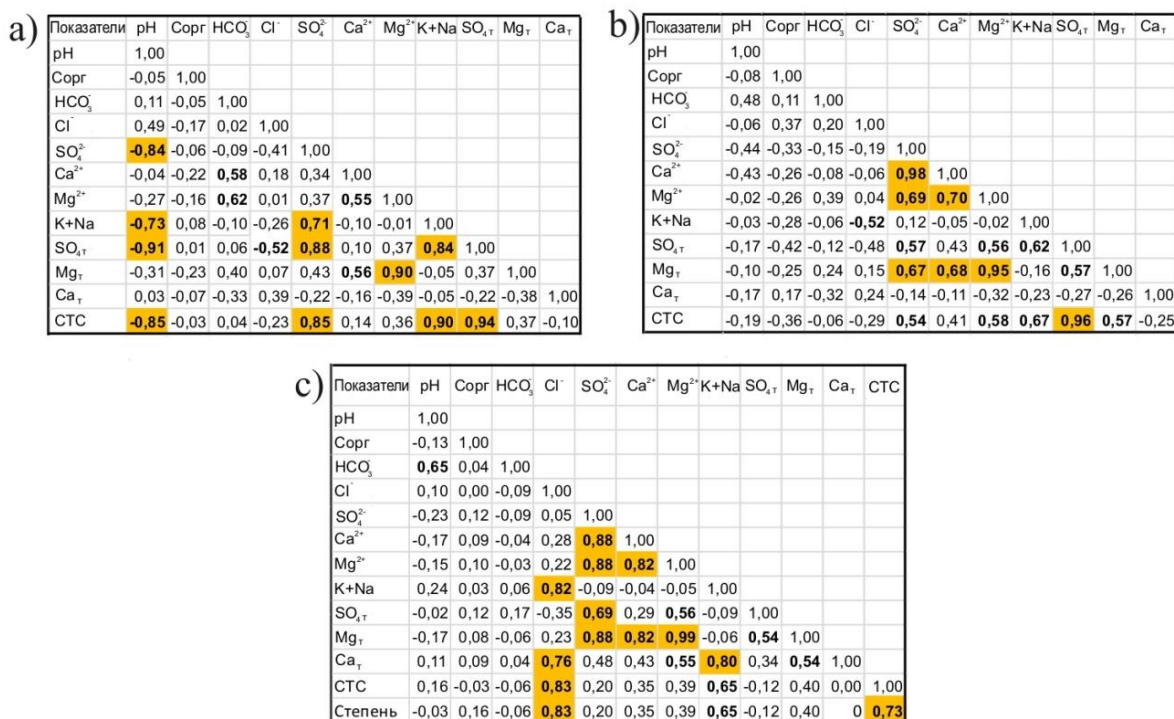


Рисунок 1 – Коррелятивная матрица физико-химических показателей почв: а – природных ландшафтов (n=31); и техногенных ландшафтов б – незасоленные (n=47), в – засоленные (n=54). Желтым цветом выделены значения с сильным коэффициентом корреляции ($r>0,7$).

Анализ водорастворимого комплекса почв с развитием процессов засоления (рисунок 1с) показал помимо тех же связей, которые мы наблюдаем в почвах без процессов засоления, сильную коррелятивную связь хлоридов с ионами кальция и натрия, которые и вносят основной вклад в сумму токсичных солей и степень засоленности.

4. Рассуждения

Таким образом, территория исследования характеризуется криоаридным климатом с умеренной увлажненностью, отрицательными среднегодовыми температурами, малым количеством осадков и высокой испаряемостью. В геологическом строении, почвообразующих породах, на которых образованы почвы территории, залежи каких-либо солей отсутствуют. В целом анализ природно-климатических факторов показал отсутствие предпосылок к развитию процессов засоления почв.

Тем не менее, мы наблюдаем активное развитие процессов засоления на промышленной площадке АГОКа. В засоленных почвах происходит резкое увеличение ионов Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- и постепенное увеличение Ca^{2+} и SO_4^{2-} . Источниками кальция, магния, сульфатов в почвах техногенной площадки служат отвалы пустых пород, в составе которых в том числе доломиты, ангидриты, гипс. Порог токсичности у сульфатного типа засоления выше хлоридного (0,15%), поэтому мы наблюдаем постепенное увеличение содержания сульфатов в почвах при одновременном отсутствии засоленности. Когда же в почвах появляются хлориды, порог токсичности которых 0,05%, это непременно отражается в составе водорастворимого комплекса и степень засоленности резко возрастает. Источниками более токсичных хлоридов и натрия также являются отвалы пустых пород, анализ геологического строения территории позволяет предположить, что одним из основных поставщиков этих ионов служат породы, пропитанные высокоминерализованными рассолами с хлоридным магний-натрий-кальциевым составом. Под действием внешних факторов они мигрируют в подчиненные формы рельефа и служат причиной засоления почв. В данном случае, наличие мерзлоты в профиле почв, которая

служит водоупором, препятствует вымыванию солей из профиля. Далее, они могут мигрировать как субгоризонтально вместе с надмерзлотными водами, так и по всему почвенному профилю, подтягиваясь с восходящими токами влаги к верхним горизонтам, так и устремляясь вниз с осадками. При этом высокая испаряемость и малое количество осадков могут быть причиной концентрации солей непосредственно в верхних горизонтах.

5. Выводы

По результатам анализа данных водорастворимого комплекса почв территории АГОКа мы пришли к выводу, что в почвах природных ландшафтов присутствуют соединения токсичных солей Na_2SO_4 , но концентрация их ниже порога токсичности. В почвах техногенных ландшафтов, в которых даже несмотря на наличие внешних признаков техногенного воздействия в виде каких-либо наносов, процессы засоления отсутствуют, наблюдается образование таких токсичных солей, как Na_2SO_4 и MgSO_4 . А в засоленных почвах помимо MgSO_4 появляются более токсичные и мобильные хлориды, образующие NaCl и CaCl_2 . Активизация процессов засоления в почвах северотаежных ландшафтов зависит от качественного состава пород, слагающих отвалы, которые оказывают воздействие на почвенный покров и являются источниками токсичных солей.

Таким образом, основным фактором засоления почв на территории АГОКа в результате алмазодобывающей деятельности является антропогенный фактор. Специфика природных условий в виде наличия многолетнемерзлых пород создает предпосылки для развития процессов засоления в подчиненных формах рельефа в результате процессов миграции, а высокая испаряемость создает предпосылки для преимущественно поверхностного засоления.

6. Благодарности

Работа выполнена в рамках выполнения госзадания Минобрнауки РФ FUFG-2024-007 «Мантейный магматизм, эволюция литосферы и рудоносность восточной части Сибирской платформы, геоэкология недропользования».

7. Литература:

- [1] Saline soils of Russia / E. I. Pankova [et al.]. M.: Akademkniga, 2006. 854 p.
- [2] Nosova M.V., Seredina V.P., Stovbunik S.A. Assessment of soil changes causing contamination with crude oil and mineralized liquids in the middle Ob region (Western Siberia) // Ecosystem transformation. 2023. Т. 6, № 2(20). Pp. 64-73. DOI 10.23859/estr-220718.
- [3] Solntseva N.P., Sadov A.P. Technogenic halogenesis in the areas of hydrocarbon production and the evolution of salt halos // Geography, society, environment. Volume IV: Natural and anthropogenic processes and environmental risk / ed. Prof. S.M. Malkhazova and Prof. R.S. Chalova. M.: Gorodets Publishing House, 2004. pp. 427-447.
- [4] Khairullina E.A., Novoselova L.V., Poroshina N.V. Natural and anthropogenic sources of water-soluble salts on the territory of the Verkhnekamsk deposit of potassium-magnesium salts // Geographical Bulletin. 2017. № 1(40). Pp. 93-101. DOI 10.17072/2079-7877-2017-1-93-101.
- [5] Nikiforova E.M., Kasimov N.S., Kosheleva N.E. Long-term dynamics of anthropogenic salinity of the soils of the VAO of Moscow with the use of deicing reagents // Soil Science. 2017. № 1. Pp. 93-104
- [6] Artamonova V.S, Dietz L.Yu., Elizarova T.N., Lyutykh I.V. Technogenic salinization of soils and their microbiological characteristics // Siberian Ecological Journal. 2010. No. 3. Pp. 461-470
- [7] Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Korshunova N.N., Shvets N.V. Description of the data array of monthly precipitation amounts at stations in Russia. Certificate of state registration of the database No.2015620394 – URL: <http://meteo.ru/data/158-total-precipitation#описание-массива-данных> (accessed 01/27/2024). – Text: electronic.
- [8] Scientific foundations for the prevention of soil degradation (lands) of agricultural lands in Russia and the formation of systems for the reproduction of their fertility in adaptive landscape

agriculture. Theoretical and methodological foundations for the prevention of soil degradation (lands) of agricultural lands. Collective monograph. M.: Soil. V.V. Dokuchaev Institute of the Russian Agricultural Academy, 2013. 756 p.

- [9] Bazilevich N.I., Pankova E.I. The experience of soil classification by salinity // Soil Science. 1968. No. 11. Pp. 3-16.
- [10] Salikhov R.F., Salikhova V.V. and others. State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:200 000. The Verkhneviluyskaya series. Sheet Q-49-XXI, XXII (Aikhal). Explanatory note. M.: VSEGEI, 2013

ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МОДЕЛИ РАСЧЁТА ТЕПЛООБМЕНА ПОВЕРХНОСТИ С АТМОСФЕРОЙ ДЛЯ РАЙОНА БАССЕЙНА РЕКИ ШЕСТАКОВКА, ЦЕНТРАЛЬНАЯ ЯКУТИЯ

Софья Шерстенникова^{1,2}, Борис Иванов^{1,3}, Людмила Лебедева^{2,1}, Ульяна Прохорова³

¹ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет» Институт наук о Земле
199034, Россия, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7–9

² ФГБУН «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН»,
677010, Россия, г. Якутск, Мерзлотная, 36

³ ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»,
199397, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38

EVALUATION OF THE SENSITIVITY OF THE SURFACE HEAT EXCHANGE CALCULATION MODEL TO THE ATMOSPHERE FOR THE AREA OF THE SHESTAKOVKA RIVER BASIN, CENTRAL YAKUTIA

Sofya Sherstennikova^{1,2}, Boris Ivanov^{1,3}, Lyudmila Lebedeva^{2,1}, Ulyana Prohorova³

¹ Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg State University, 7-9, University nab. St. Petersburg,
199034, Russia

² Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36, Permafrost str., Yakutsk, 677010, Russia

³ Arctic and Antarctic Research Institute, 38, Beringa str., St. Petersburg, 199397, Russia

Abstract. This article analyzes the variability of modeling results depending on various initial data used to assess the influence of meteorological parameters on the conditions of heat exchange between the atmosphere and the soil in the Yakutia region. The contribution of meteorological variables such as air temperature, surface temperature, atmospheric transparency, total cloud cover and albedo of the underlying surface was assessed. The thermophysical properties of the soil remained unchanged, while other parameters were varied. The input data were used to simulate the process of heat transfer between the atmosphere and the ground, and the obtained values of the heat flux were used in modeling the process of heat and mass transfer. The results of the analysis showed that a change in the transparency coefficient leads to significant variability in the simulation results.

1. Введение

В последние десятилетия наблюдается усиление антропогенного воздействия на природные процессы, что требует более точного их изучения. Один из ключевых аспектов исследований климатических изменений – теплообмен между поверхностью Земли и атмосферой. Теплообмен играет важную роль в регулировании климата, влияет на гидрологические процессы, особенно в регионах с экстремальным климатом, таких как Центральная Якутия. Для его изучения разрабатываются различные методы, в том числе и моделирование, однако результаты требуют сравнения с натурными измерениями для проверки их точности.

Математическое моделирование является современным методом научного познания, широко применяемым в научных исследованиях. Модель должна адекватно отображать целевые свойства объекта, существенные для конкретной задачи [1]. В настоящее время в Институте вычислительной математики РАН имеется комплекс различных версий модели климатической системы, каждая из которых включает в себя модель общей циркуляции атмосферы, модель общей циркуляции океана и может быть дополнена другими блоками, в том числе воздействием метеорологических параметров на подстилающую поверхность [2].

В настоящей статье проведена оценка чувствительности модели теплообмена поверхности с атмосферой к изменению её входных данных, что позволяет оценить вклад каждого из вводимых значений. Параметризация модели основана на данных с метеостанции Якутска

взятых за период 01.06.2023 – 07.06.2023. Этот период выбран с целью рассмотрения погодных условий без атмосферных осадков. Это сделано для того, чтобы минимизировать ошибки, путём исключения из моделирования блоков описания фильтрации воды в грунт, а также наличия снега и описание процессов его уплотнения.

2. Район исследования

Якутск - столица Республики Саха (Якутия), расположенная на востоке Сибири, в долине реки Лена. Город располагается в зоне развития многолетнемёрзлых пород, и является одним из самых холодных крупных городов мира. Средняя температура января составляет -41°C , а средняя температура июля $+19^{\circ}\text{C}$.

Влияние радиационного режима на климат Якутска ощутимо. В изучаемом регионе зимой поток солнечной радиации мал, а летом наоборот высок. Из-за значительных различий в количестве поступающей солнечной радиации в различные сезоны, в Якутске наблюдаются резкие перепады температур. Годовая амплитуда может достигать 100°C . Климат района резко континентальный [3].

3. Описание математической модели тепломассопереноса

Моделированием тепломассопереноса в криолитозоне специалисты на систематической основе занимаются с середины прошлого века [2]. Они включают в себя формирование вертикального распределения температуры в грунтах, с учётом влияния растительного и снежного покрова [4,5, 6]. Анализ публикаций показывает, что имеется значительное количество различных моделей, хорошо описывающих отдельные аспекты процесса тепломассопереноса в грунтах: неустановившаяся фильтрация, фирнизация, изменение альбедо, и прочее. Эти, наиболее современные наработки и составляют основу математической модели, созданной авторами. Частично она описана в работе [7]. Модель реализована в виде компьютерной программы [8].

Концептуальная схема модели тепломассопереноса в верхней части геологического разреза в течение года, характерная для районов криолитозоны, где развиты субэральные талики, показана на Рисунке 1.

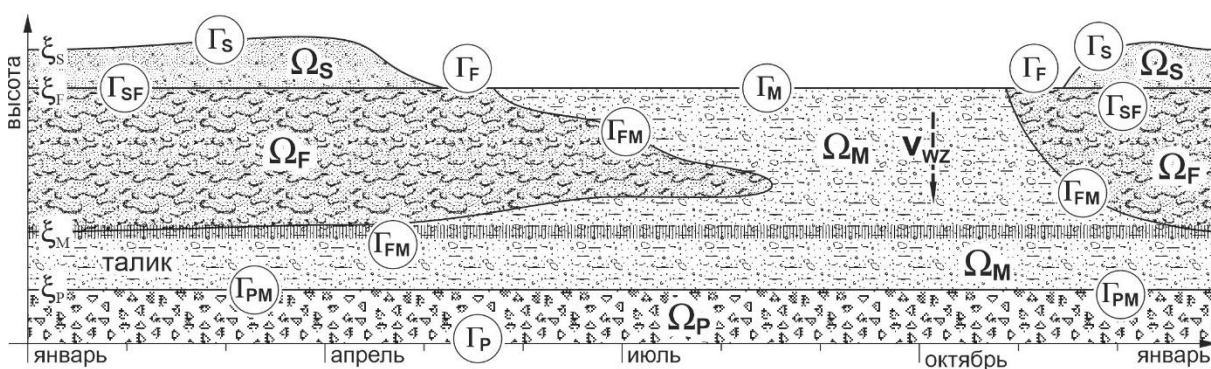


Рисунок 1 – Изменение верхней части геологического разреза с течением времени

Ω_P — многолетнемёрзлые породы; Ω_F — сезонно-мёрзлые породы; Ω_M — талый грунт; Ω_S — снежный покров; Γ_P — нижняя граница расчётной области; Γ_S , Γ_F и Γ_M — верхние границы расчётной области; Γ_{FM} — граница между сезонно-мёрзлыми и тальми породами; Γ_{PM} — граница между тальми породами и многолетнемёрзлыми породами; Γ_{SF} — граница между сезонно-мёрзлыми породами и снежным покровом; ξ_P , ξ_S , ξ_F и ξ_M — положение соответствующих границ Γ_{PM} , Γ_S , Γ_{SF} и Γ_{FM} .

Следуя классическим работам, запишем одномерное уравнение теплопроводности в энтальпийной формулировке:

$$\rho \left[c + q_1 \delta (\theta - \theta_{nw}) \right] \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + v_z \frac{\partial \theta}{\partial z} + \Phi, \quad (1)$$

где q_l — удельная теплота плавления льда, равная 333 кДж/кг, ρ — плотность, c — удельная теплоёмкость, λ — коэффициент теплопроводности, θ — температура, $\theta_{l/w}$ — температура фазового перехода, а δ — функция Дирака. Поскольку скорость вертикальных движений грунта мала, диссипативным членом Φ можно пренебречь. При небольших мощностях среды можно считать, что температура фазового перехода не зависит от глубины (т.е. от давления), т.е. (1) корректно для произвольного количества фазовых границ, поскольку их температура одинакова. Тогда

$$c = \begin{cases} c_1(\theta), \theta < \theta_{l/w} \\ c_2(\theta), \theta \geq \theta_{l/w} \end{cases}, \quad \rho = \begin{cases} \rho_1(\theta), \theta < \theta_{l/w} \\ \rho_2(\theta), \theta \geq \theta_{l/w} \end{cases}, \quad \lambda = \begin{cases} \lambda_1(\theta), \theta < \theta_{l/w} \\ \lambda_2(\theta), \theta \geq \theta_{l/w} \end{cases}.$$

Указанные параметры помимо температуры, зависят также от влажности (льдистости), и конкретного типа горных пород [6, 9]. В этом случае уравнение (1) примет классический вид со сглаженными ρ , c и λ . Начальными условиями могут быть как распределение температуры по глубине на основе данных термометрии, так и некоторое произвольное распределение, поскольку, как известно, и неоднократно подтверждалось авторами, на больших временных интервалах моделирования начальное распределение играет существенно меньшую роль, нежели граничные условия. На нижней границе (т.е. Γ_p), в зависимости от обстоятельств, условия могут быть заданы либо постоянной температурой в многолетнемёрзлых породах (что, на взгляд авторов, предпочтительнее), либо геотермическим потоком, величина которого зависит от глубинного строения региона. На дневной поверхности (т.е. на Γ_s , Γ_M и Γ_F) можно задавать как условие теплообмена [4, 5], так и тепловой поток, полученный из условия теплового баланса, т.е.

$$\lambda_0 \left. \frac{\partial \theta}{\partial z} \right|_{\Gamma_F}^{\Gamma_s} = A,$$

где λ_0 — коэффициент теплопроводности приповерхностной части, а A — тепловой поток в грунт.

4. Методика расчёта теплообмена

Приток тепла в виде лучистой энергии является важнейшей составляющей общего притока тепла, под влиянием которого изменяется термический режим атмосферы и земной поверхности. Балансом лучистой энергии или радиационным балансом называется разность между поглощенной им радиацией и собственным излучением поверхности [10].

$$A = Q(1 - \alpha) - E_{эф}, \quad (2)$$

где Q — поток приходящей солнечной радиации; α — альbedo поверхности; $E_{эф}$ — излучение поверхности. Отражение солнечной радиации земной поверхностью зависит от её характера. Отношение количества отражённой радиации к общему количеству радиации, падающей на поверхность и есть её альbedo [11].

В метеорологии потоки лучистой энергии подразделяется на коротковолновую (с длинами волн от 0,2 до 5,0 мкм) и длинноволновую радиацию (с длинами волн от 5,0 до 100 мкм) [11]. Потоки первой подразделяются на прямую и рассеянную. Прямая солнечная радиация представляет собой поток электромагнитного излучения, который напрямую достигает поверхности Земли от Солнца. Он рассчитывается следующим образом:

$$Q_{dir} = S_{const} \cdot B^m \cdot \cos(L), \quad (3)$$

где S_{const} — Солнечная постоянная, приближённо равная 1370 Вт/м² [10], B — прозрачность атмосферы, m — относительная длина оптического пути, зависит от высоты Солнца над горизонтом, L — угол падения между центроидом сектора воздушного пространства и осью, перпендикулярной к поверхности, зависит от экспозиции и наклона поверхности и от высоты и азимута Солнца.

Проходя сквозь атмосферу, солнечная радиация рассеивается в оптически неоднородной среде атмосферными газами и аэрозольными примесями, имеющими различные коэффициенты преломления, и переходит в особую форму — рассеянную радиацию [10].

$$Q_{dir} = \left(\frac{S_{const} \cdot B^m}{1 - P_{dif}} \right) \cdot \cos(L) \cdot P_{dif}, \quad (3)$$

где P_{dif} — доля рассеянного излучения (в среднем составляет 0,65).

Сумма прямой и рассеянной солнечной радиации является суммарной коротковолновой радиацией.

$$Q = Q_{dir} + Q_{dif}, \quad (4)$$

Дошедшая до земной поверхности суммарная радиация в большей своей части поглощается в деятельном слое почвы и переходит в тепловую энергию, а частично отражается. В отличие от коротковолновых потоков прямой, рассеянной и отраженной радиации, тепловое излучение земной поверхности и атмосферы приходится на невидимую инфракрасную часть спектра. Излучение земной поверхности и атмосферы принято называть длинноволновыми. Атмосферную радиацию, приходящую к земной поверхности, называют встречным излучением или противоизлучением атмосферы. Разность между собственным излучением земной поверхности и встречным излучением атмосферы называют эффективным излучением:

$$E_{эф} = \xi_n \cdot c \cdot T_n^4 - \xi_a \cdot c \cdot T_e^4, \quad (5)$$

где T_n — температура поверхности, E_n — излучательная способность поверхности, c — постоянная Стефана-Больцмана, равная $5.669 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴), E_a — излучательная способность атмосферы, являющаяся функцией количества облачности, T_e — температура воздуха. Первое слагаемое является восходящим излучением, второе — нисходящим.

5. Оценка чувствительности модели

Был проведён анализ изменчивости результатов моделирования при разных заданных исходных условиях. Для этого по отдельности оценивался вклад следующих метеорологических величин: (1) общая облачность, (2) прозрачность атмосферы, (3) альbedo дневной поверхности, и (4) температура окружающего воздуха. Теплофизические свойства грунта при этом оставались неизменными. Как указывалось, выше, перечисленные параметры используются в расчёте теплообмена между атмосферой и грунтом. Для выполнения расчётов они фиксировались на среднем значении для первой недели июня г. Якутска, при этом поочерёдно один из них изменялся. Интервалы изменяемых значений задавались следующим образом: брался возможный диапазон изменения для облачности, альbedo и прозрачности, и фактическая амплитуда температуры воздуха в июле, и для каждого изменяемого параметра высчитывалось одинаковое количество контрольных величин, с помощью которых и производились оценочные вычисления. На Рисунке 2 приведены синтезированные температурные профили для различных сценарных расчётов.

На Рисунке 2а приведены синтезированные температурные профили при различных значениях облачности. В расчётах она изменялась от 0 до 1 с шагом 0.1. Как следует из графиков, влияние этого параметра одно из самых незначительных: изменение облачности на 10% приводит к изменению температуры дневной поверхности примерно на 3°C.

На Рисунке 2б показаны синтезированные температурные профили при различных значениях прозрачности атмосферы. В расчётах она изменялась от 0.27 до 0.91 с интервалом 0.06. Как следует из графиков, его увеличение на указанную величину приводит к росту температуры дневной поверхности на 9 – 25°C, т.е. вклад этого фактора весьма существенен.

На Рисунке 2в приведены синтезированные температурные профили при различных значениях альbedo дневной поверхности. В расчётах она изменялась от 0.1 до 0.9 с шагом 0.08. Как следует из представленного рисунка, вклад этого параметра оказался самым значительным, при том, что степень его неопределённости весьма велика. В частности, при изменении альbedo на указанный шаг, температура дневной поверхности меняется на 1 – 6°C.

На Рисунке 2г представлены синтезированные температурные профили при различных значениях температуры окружающего воздуха. В расчётах она изменялась от +2°C до 55°C с интервалом 5.3°C. Как следует из графиков, при прочих равных условиях, изменение температуры на дневной поверхности примерно соответствуют изменениям температуры окружающего воздуха.

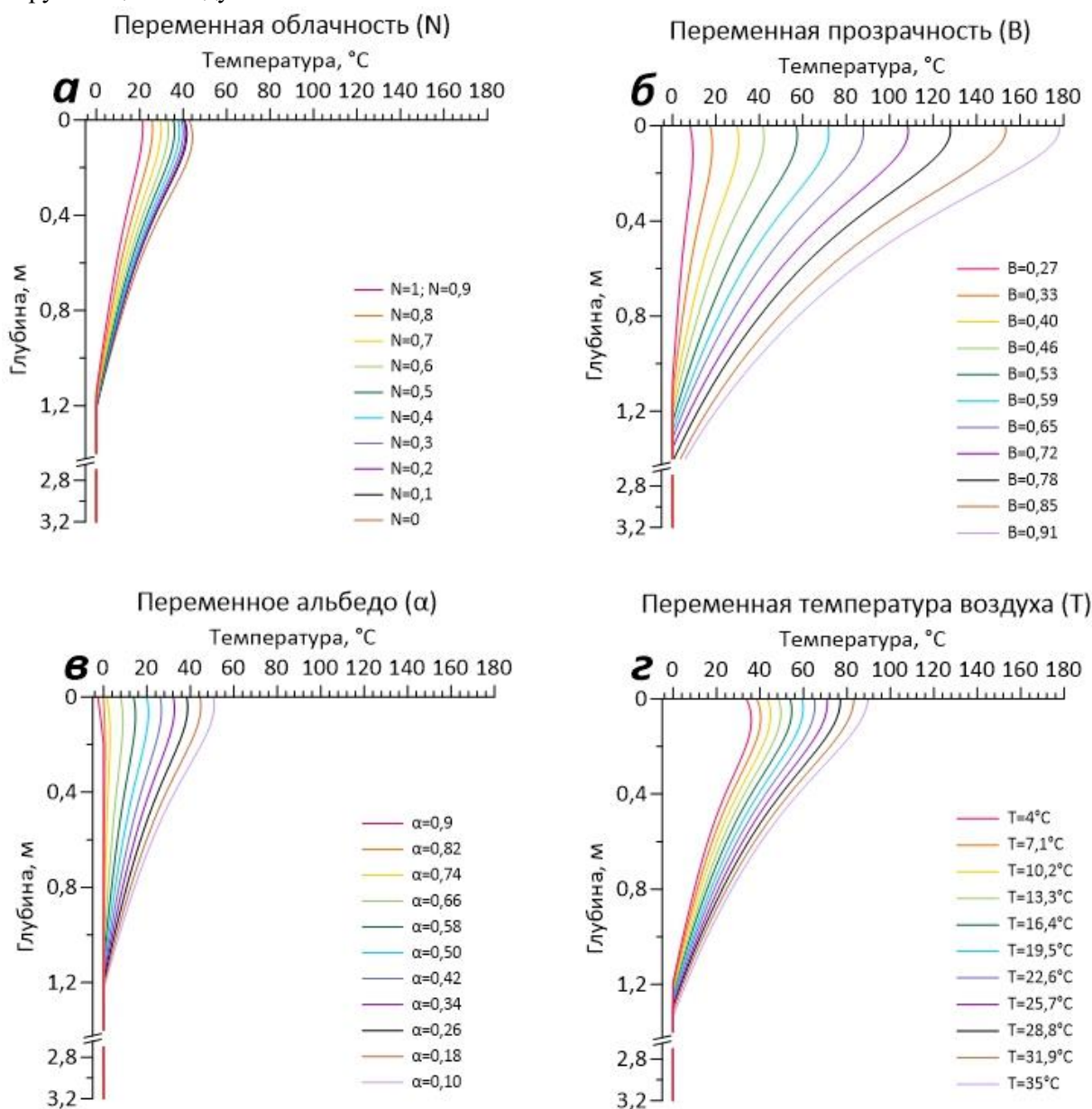


Рисунок 2 – Результаты моделирования вклада факторов в процесс теплообмена в грунты Якутии

6. Выводы:

Проведённое научное исследование показывает, что наибольшее влияние на процесс теплообмена дневной поверхности с атмосферой (а следовательно, и теплового потока, проникающего в среду) оказывает прозрачность. Она тесно связано не только с характеристикой погоды в срок наблюдения, но и с вопросами оптики атмосферы, и в том числе с концентрацией аэрозолей, что важно для пригородных районов. На втором месте по значимости стоит альbedo поверхности. Оно тесно связано не только со степенью её белизны, но и с шероховатостью, что важно для районов развития лугов, кустарников, степей и прочее. Оставшиеся два параметра оказывают значительно меньшее влияние на результаты расчётов. Таким образом, исследование авторов показало, что точность расчётов теплового баланса (а, следовательно, и моделирования процессов теплообмена) можно существенно

повысить, сужая спектр возможного изменения прозрачности атмосферы, а также альbedo дневной поверхности. Для этого целесообразно провести комплекс детальных актинометрических исследований и составить каталог, либо базу данных альbedo и прозрачности атмосферы при различных условиях.

7. Благодарности:

Авторы благодарят Попова С.В. (СПбГУ) за помощь при подготовке настоящей публикации, Немчинову А.В. (СПбГУ) за содействие при подготовке работы, а также своих коллег из СПбГУ, ААНИИ и Института мерзлотоведения за помощь при выполнении исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ и Якутского научного фонда Проект № 22-17-20040 «Субаэральные и подоёрные талики в сплошной криолитозоне Восточной Сибири: происхождение, современное состояние и реакция на изменение климата».

8. Литература:

- [1] Pavlov A.R. Mathematical modeling of processes at phase transitions: textbook// Yakutsk, 2001. – 55p.
- [2] Dymnikov V. P. Mathematical modeling of the dynamics of the Earth system / V. P. Dymnikov, V. N. Lykosov, E. M. Volodin // Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Physics of the atmosphere and ocean, 2015, vol. 51, No. 3, p. 260. – DOI 10.7868/S0002351515030049.
- [3] Skachkov Yu. B. Modern variability of the main elements of the Yakutsk climate // The eighth Siberian meeting on climate and environmental monitoring: Materials of the Russian conference, Tomsk, October 08-10, 2009 / Institute for Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS. - Tomsk: Publishing House Agraf-Press, 2009, pp. 83-84.
- [4] Sosnovsky A.V., Osokin N.I. Influence of moss and snow cover on permafrost stability in Western Svalbard under climatic changes // Bulletin of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2018. No. 3. pp. 178-184.
- [5] Sosnovsky A.V. Mathematical modeling of the effect of snow cover thickness on permafrost degradation during climate warming // Cryosphere of the Earth, 2006, vol. X, No. 3, pp. 83-88.
- [6] Feldman G.M. Methods of calculating the temperature regime of frozen soils / Moscow: Science, 1973. – 254 p.
- [7] Popov S.V., Boronina A.S., Lebedeva L.S. The main factors in the formation of subaerial taliks on the example of the Shestakovka River basin (Central Yakutia), using a one-dimensional mathematical model // Ice and Snow, 2023, vol. 63, No 4, pp. 597-611.
- [8] Popov S.V., Boronina A.S., Lebedeva L.S. “Program for modeling heat and mass transfer processes in permafrost” (FrozenSoil) // Certificate of the registration RUS No. 2023669994. Application No. 2023669430, 09.25.2023. Publ. 09.25.2023. Bull. No. 10.
- [9] Gavrilyev, R. I. Catalog of thermophysical properties of rocks of the North-East of Russia / Yakutsk: P.I. Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 2013. – 174 p.
- [10] Matveev L.T. Course of general meteorology. Physics of the atmosphere / edited by V.G. Morachevsky – L.: Hydrometeoizdat, 1984. – 738 p.
- [11] Kmito A.A., Sklyarov Yu.A. Pyrgeliometry / L.: Hydrometeoizdat, 1981. – 232 p.

**ОСОБЕННОСТИ КРИОГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ
КАРЬЕРНОГО ПОЛЯ ТРУБКИ КОМСОМОЛЬСКАЯ-МАГНИТНАЯ ВЕРХНЕ-
МУНСКОГО КИМБЕРЛИТОВОГО ПОЛЯ**

Алексей Янников¹, Илья Каратеев^{1,2}

¹ Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО), 678174, Россия,
г. Мирный, ул. Ленина, 39

² ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», 394018, Россия, г. Воронеж,
Университетская пл., 1

**FEATURES OF CRYOHYDROGEOLOGICAL CONDITIONS OF THE QUARRY
FIELD OF THE KOMSOMOLSKAYA-MAGNETIC PIPE OF THE VERKHNE-
MUNSKOYE KIMBERLITE FIELD**

Aleksey Yannikov¹, Ilya Karateev^{1,2}

¹ «Yakutniproalmaz» Institute PJSC «ALROSA», 39, Lenin str., Mirny, 678174, Russia

² Voronezh State University, 1, Universitetskaya sq., Voronezh, 394018, Russia

Abstract. The article presents the features of cryohydrogeological conditions within the quarry field of the Komsomolskaya-Magnitnaya pipe of the Verkhne-Munsky kimberlite field. Aspects of the formation of buried ice identified in the section of overlying sediments are considered, and intervals of potential natural-technogenic taliks, the reservoirs of which are composed of fractured dolomites and limestones, are characterized.

1. Введение

Мунский алмазоносный район, включающий Верхне-Мунское кимберлитовое поле, расположен на юго-восточном склоне Анабарской антеклизы, где платформенный чехол представлен нижнепалеозойской осадочной карбонатной толщей суммарной мощностью 1320-1380 м. Геологические условия в районе Верхне-Мунского поля относительно простые. Здесь широко развиты моноклинально залегающие терригенно-карбонатные отложения всех трех отделов кембрийской системы, которые являются вмещающими для известных в районе 16-ти кимберлитовых трубок и 5-ти жильных кимберлитовых образований, внедрившихся в среднепалеозойское время (D₃-C₁). Перекрывающие породы в отм. +280/+350 м представлены терригенными породами четвертичного возраста. Структурные этажи разделены между собой перерывами в осадконакоплении, угловыми и стратиграфическими несогласиями. Породы трапповой формации распространены только в юго-восточной части района (водораздел рек Муна – Тюнг) за пределами характеризуемой территории и представлены дайками (βP₂-T₁) долеритов [1, 2].

Гидрогеологические условия Верхне-Мунского района определяются его принадлежностью к сочленению Оленекского и Верхневилуйского артезианских бассейнов. В пределах осадочного чехла в отметках отработки и прямого техногенного влияния от процесса будущей отработки выделяются: верхнекембрийский водоносный комплекс (ВВК); среднекембрийский водоносный комплекс (СВК); нижнекембрийский водоносный комплекс (НВК) [3]. На основании результатов проведенных работ основная роль в обводнении месторождения отводится подземным водам СВК, залегающего на глубинах от 244 - 288 м (104 - 111 м, абс) до 370 м (-22,0 ÷ -64 м, абс).

Трубка Комсомольская-Магнитная является одним из месторождений в пределах Верхне-Мунского кимберлитового поля, расположена она в верховьях р. Муна в 180 км к северо-востоку от г. Удачный. С поверхности полностью перекрыта верхнечетвертичными аллювиальными отложениями I надпойменной террасы р. Муны, залегающими на элювиальных образованиях. Средняя мощность перекрывающих трубку отложений составляет 9,1-11 м на

северо-западном и до 5 м на юго-восточных ее флангах. Само тело трубки имеет дайкообразную форму. В настоящее время ведется подготовка к добыче открытым способом, вскрыша будет вестись послойно от отметки поверхности с абсолютной высотой 660 м ко дну с абсолютными отметками 400 м [4, 5].

2. Результаты и обсуждение

Для изучения текущего состояния вмещающих пород был выполнен комплекс исследований, включающий буровые работы, основной задачей которых являлось натурное изучение измененных криогидрогеологических условий в пределах карьерного поля и прилегающей дневной поверхности. Скважины были использованы для наблюдения за вскрываемыми породами и оценкой их геокриологического состояния, а также заверки состояния пород, пребывающих в условно неизменённом геокриологическом состоянии. В процессе исследований были задокументированы интервалы погребённых четвертичных пресных льдов (минерализация 0,06-0,18 г/литр), а также зоны повышенной трещиноватости, связанные с зонами динамического воздействия низкоранговых разрывных нарушений, подстилающих терригенно-карбонатные породы верхнего кембрия в верхней части разреза (рисунки 1 и 2).



Рисунок 1 – Погребённые льды в пределах карьерного поля



Рисунок 2 – Зона интенсивной трещиноватости в пределах карьерного поля

В процессе работ был зафиксирован факт корреляции погребённых льдов и зон повышенной

проводимости в терригенно-карбонатных породах, что, по всей видимости, обусловлено локальными особенностями горно-геологических условий карьерного поля изучаемого месторождения. После выполнения необходимых замеров, а также учёта результатов бурения, была составлена прогнозная схема предполагаемого планового распространения погребённых льдов (рисунок 3).

Как видно из представленной схемы, общая площадь многоугольной фигуры составляет порядка 70 тыс. м², с учётом общей мощности и % льдистости объём погребенного льда составляет ~ 150 тыс. м³. Что является достаточно уникальным фактором, т.к. вскрываемые линзы погребённых льдов на прочих месторождениях (тр. Ботуобинская, Зарница, Нюрбинская, Юбилейная) имели на порядок меньшие линейные и объёмные параметры и максимально оценивались до 1-2 тыс. м³ [6-8].

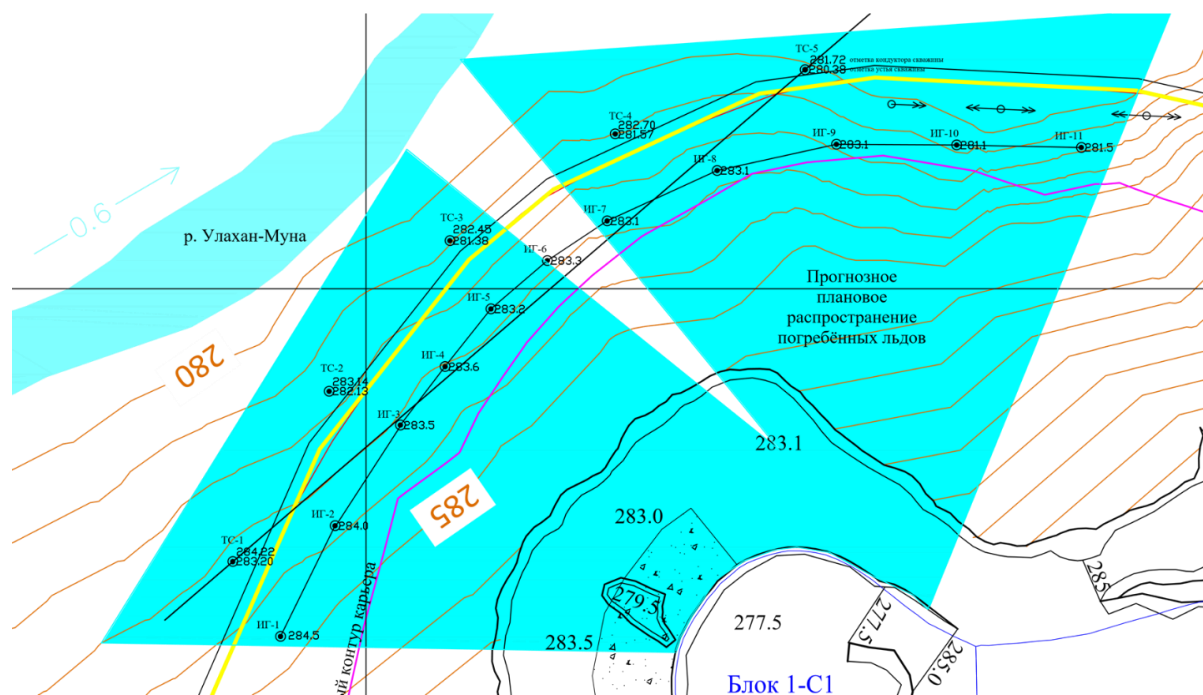


Рисунок 3 – Схема прогнозного распространения захороненных льдов

3. Выводы

В результате проведенных исследований было уточнено криогидрогеологическое строение северного борта карьера трубки Комсомольская-Магнитная, выделены факторы, влияющие на формирование текущих условий. При этом положительным фактором является подтверждение инертности многолетнемерзлых пород, в части процессов растепления и мощности сезонно-талого слоя. В результате проведенных термометрических замеров было установлено, что на глубине 3-30 м породы остаются в эффективно мерзлом состоянии, характеризуюсь температурами от -2,3 до -7,4 °С. Дополнительно было подтверждено, что месторождения Верхне-Мунского кимберлитового поля в целом, и трубка Комсомольская-Магнитная в частности характеризуются достаточно сложными криогидрогеологическими и тектоническими условиями, такими как: наличие в толще многолетнемерзлых пород зоны подруслового талика реки Муна и крупных линз захороненного четвертичного льда, вскрываемых непосредственно бортом карьера, что потребует проведения комплекса специализированных мониторинговых работ.

4. Литература:

[1] Kolganov V.F., Akishev A.N., Drozdov A.V. Mining and geological features of primary diamond deposits in Yakutia. Mirny, 2013. 558 p.

- [2] Drozdov A.V., Iost N.A., Lobanov V.V. Cryohydrogeology of diamond deposits in Western Yakutia. Irkutsk: ISTU, 2008, 507 p.
- [3] Hydrogeology of the USSR. Vol. XX. Yakut ASSR. Moscow, Nedra, 1970, 384 p.
- [4] Zheleznyak M. N., Shats M. M. Geological and geocryological conditions of the Verkhne-Munsky diamond ore field at the stage of completion of exploration // Subsoil use XXI century, 2019, no. 4(80), pp. 46-55.
- [5] Klimovsky I. V., Gotovtsev S. P. Cryolithozone of the Yakut diamondiferous province. Novosibirsk: Nauka, 1994, 167 p.
- [6] Yannikov A.M. Hydrogeology of the Alakit-Markhinsky kimberlite field. Mirny: Publishing house ZYANTS/YANA, 2022. 132 p.
- [7] Yannikov A.M. Hydrogeology of the Daldyn kimberlite field. Mirny: Publishing house ZYANTS/YANA, 2023. 305 p.
- [8] Yannikov A.M. Hydrogeology of the Mirny kimberlite field. Mirny: ZYANTS/YANA Publishing House, 2021. 240 pp.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Абрамов Д.А.	Глянцева Ю.С.	Исакова Т.А.
Акинин В.В.	Гоголева С.С.	Кадильников П.И.
Алексеев В.И.	Гололобова А.Г.	Калачева Л.П.
Аленичева А.А.	Горохов А.Н.	Каратеев И.А.
Андросов Д.В.	Горохов И.В.	Кардашевская В.Н.
Анисимова Г.С.	Гриненко В.В.	Карманов Н.С.
Анкушева Н.Н.	Гриффин В.Л.	Карпинчик Г.О.
Антонова Т.А.	Гусев Н.И.	Карпова М.И.
Афанасьев В.П.	Данилов К.П.	Касаткин Н.С.
Ахияров А.В.	Демидова Л.А.	Кашкевич М.П.
Аянитова Т.М.	Добрецов Н.Н.	Килясов А.Н.
Багаева А.А.	Донская А.Е.	Ковач В.П.
Барабаш Е.О.	Дорошкевич А.Г.	Козлова А.А.
Баранов В.В.	Ершова В.Б.	Колосов П.Н.
Баранов Л.Н.	Ефанова Л.И.	Кондратьева Л.А.
Батугина Н.С.	Жанабаев Р.К.	Конопелько Д.Л.
Башкова А.А.	Желонкин Р.Ю.	Константинов К.М.
Белозерцева И.А.	Жирков А.Ф.	Копылова А.Г.
Белянин Д.К.	Жмодик С.М.	Королева О.В.
Березкин В.И.	Журавлев А.И.	Кравцова О.Н.
Берзин С.В.	Заболотник П.С.	Кравченко А.А.
Богданов Е.А.	Зверева Н.А.	Кряжев С.Г.
Бондарь-Лунецкас Н.А.	Землянскова А.А.	Кудрин М.В.
Ботвин Г.В.	Зинчук М.Н.	Кужугет Р.В.
Брусницына Е.А.	Зинчук Н.Н.	Кузьмин В.И.
Брынько И.В.	Зольников И.Д.	Куклина С.Л.
Бубнова А.Р.	Зуева И.Н.	Курапов М.Ю.
Вавилов М.А.	Иванников С.И.	Кутыгин Р.В.
Вавилов С.А.	Иванов А.И.	Куть А.А.
Васильва О.И.	Иванов А.С.	Лазарева Е.В.
Васильев Д.А.	Иванов Б.В.	Лапин А.В.
Васильев Р.И.	Иванов В.В.	Ларионов А.Н.
Васильева Н.А.	Иванов В.К.	Лебедева Л.С.
Васильева Т.И.	Иванов Д.В.	Легостаева Я.Б.
Великин А.С.	Иванов Е.Е.	Линденблот Е.С.
Верниковская А.Е.	Иванов К.О.	Лифшиц С.Х.
Власова Н.В.	Иванов М.С.	Лодиз А.
Воробьев С.А.	Иванов П.О.	Лопатина Д.Н.
Воробьева И.Б.	Иванова И.К.	Лопатовская О.Г.
Гаврильев А.А.	Иванова О.А.	Лоскутов Е.Е.
Герасимов Б.Б.	Игнатъев А.А.	Львова О.С.
Гибшер А.А.	Илюшина П.Г.	Людвиг У.И.

Лямина В.А.	Петухова Е.С.	Сороковой А.А.
Майорова Т.П.	Погодаев А.В.	Специус З.В.
Макаров А.А.	Полубелова А.В.	Таловина И.В.
Макаров В.Н.	Полуфунтикова Л.И.	Таппырова Н.И.
Макарова Д.В.	Полянский О.П.	Тарасов Я.А.
Макарьева О.М.	Пономарчук В.А.	Тимофеев В.Ф.
Макошин В.И.	Попов В.И.	Толстов А.В.
Мальшева А.М.	Попов В.Ф.	Томшин М.Д.
Мальковец В.Г.	Попов С.В.	Травин А.В.
Манькин Е.Ф.	Попова Н.И.	Тумской В.Е.
Маркова С.А.	Портнягин А.С.	Тычков Н.С.
Матушкин Н.Ю.	Похиленко Л.Н.	Уткина А.Д.
Медков М.А.	Похиленко Н.П.	Фридовский В.Ю.
Мельников А.Е.	Приставка А.А.	Хасанов И.М.
Менкярова В.С.	Прокопьев А.В.	Хороших М.С.
Милаушкин М.В.	Прокопьев И.Р.	Хоютанов Е.А.
Михайлова В.А.	Проскурнин В.Ф.	Христофоров И.И.
Михалицына Т.И.	Протодьяконова Н.А.	Худолей А.К.
Молчанов В.П.	Прохорова У.В.	Чалая О.Н.
Мороз Т.Н.	Рожин С.С.	Чевычелов А.П.
Мурзин Ю.А.	Розанов А.Ю.	Чербакова Н.Н.
Мырьянов Э.Г.	Романис Т.В.	Чжан А.А.
Неклюдов В.В.	Романова Л.Ю.	Чжан Р.В.
Нестерова Н.В.	Романова Н.Е.	Чжан Т.Р.
Никифорова З.С.	Рубанова Е.А.	Чириков А.А.
Николаев А.И.	Рудых И.В.	Шабани-Сефиддашти Ф.
Оболкин А.А.	Руфова А.А.	Шадринова О.В.
Оболкин А.П.	Савельев А.Д.	Шеховцов А.И.
Овчинников Р.О.	Савченко В.А.	Шерстенникова С.Р.
Огонеров В.В.	Сальникова Е.Б.	Шихов А.Н.
Округин А.В.	Санников Ф.П.	Шманяк А.В.
Олейников О.Б.	Сарыг-оол Б.Ю.	Эрнст Р.Е.
Опарин Н.А.	Севостьянова Р.Ф.	Юрченко Ю.Ю.
О'Рейли С.Й.	Сивцев А.И.	Яковлев И.В.
Осташов А.А.	Сивцев М.А.	Янников А.М.
Охлопкова И.Ф.	Сивцева Н.Е.	
Ощепкова М.Г.	Скосырский Н.А.	
Павлова В.В.	Скублов С.Г.	
Павлова Н.А.	Слепцов А.П.	
Павлушин А.Д.	Слепцова М.И.	
Паламарчук В.А.	Собакин П.И.	
Патрикеев П.А.	Соловьев Т.М.	
Петров В.В.	Солтани-Дехвани А.	
Петров С.В.	Сорокин А.А.	

