



ГЕОЛОГИЯ И МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВЫЕ РЕСУРСЫ СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ

**ХIII Всероссийская научно-практическая конференция
с международным участием,
посвященная 30-летию Академии наук Республики Саха (Якутия) и
40-летию Геологоразведочного факультета СВФУ им. М.К. Аммосова
*21-24 марта 2023 г.***



г. Якутск

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 XIII Всероссийской научно-практической конференции
с международным участием, посвященной 30-летию Академии наук Республики Саха
(Якутия) и 40-летию геологоразведочного факультета СВФУ им. М.К. Аммосова**

21 – 24 марта 2023 г.

Якутск
2023

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: Обрывы р. Кючус, вид на Куларский гранитоидный массив.

Фото М. Кудрина, 2022 г.

Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России [Электронный ресурс] : материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 21-24 марта 2023 г. / [Отв. ред. В.Ю. Фридовский]. – Якутск : Издательский дом СВФУ, 2023. – 1 электрон. опт. диск.

ISBN 978-5-7513-3584-7

В сборнике представлены труды XIII Всероссийской 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.

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

ISBN 978-5-7513-3584-7

© ИГАБМ СО РАН, 2023
© Северо-Восточный федеральный университет, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОЛОГИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

| | |
|---|----|
| Акимова Е.Д. Гидротермально-метасоматические изменения пород рудного поля Ылэн..... | 10 |
| Алексеев В.И., Алексеев И.В. Вольфрамсодержащие акцессорные минералы в литий-фтористых гранитах Кестерского месторождения (Якутия)..... | 16 |
| Анисимова Г.С. Ивенсен Юрий Павлович – директор-организатор института геологии ЯФ АН СССР, видный специалист в области геологии рудных месторождений и металлогении: к 115-летию со дня рождения..... | 19 |
| Анисимова Г.С., Соколов Е.П., Кондратьева Л.А., Кардашевская В.Н. Новый минерал – амгаит – первое природное соединение таллия с теллуром..... | 24 |
| Афанасьев В.П., Похиленко Н.П., Похиленко Л.Н., Попов Н.В. О кимберлитовом магматизме в пределах Тунгусской синеклизы..... | 29 |
| Бабушкина С.А. Включения хромшпинелидов в макрокристаллах флогопита из кимберлитов АН-195 (Западно-Укукитское поле)..... | 34 |
| Батугина Н.С. Потери основных и попутных полезных компонентов в запасах вследствие их неучета и (или) недоизвлечения..... | 40 |
| Боескоров Г.Г. Массовые захоронения остатков мамонтов на территории Якутии..... | 44 |
| Глухов А.Н., Колова Е.Е. Сдвиговые дуплексы как рудоконтролирующие структуры разнотипной минерализации Охотско-Чукотского вулканогенного пояса..... | 50 |
| Горохов И.В., Христофоров И.И., Данилов К.П., Чепрасов М.Ю., Петухова Е.С. Предпосылки применения метода георадиолокации для обнаружения бивней мамонтов на дне пресноводных водоемов криолитозоны..... | 52 |
| Горячев Н.А., Горячев И.Н. О раннемеловом оруденении Северного Приохотья (Магаданская область, Россия)... | 57 |
| Зинчук Н.Н., Зинчук М.Н. Литогенез древних осадочных коллекторов Малоботуобинского района с платформы и их алмазоносность..... | 62 |
| Зинчук Н.Н. Древние коры выветривания и алмазная минерагения..... | 68 |
| Зуева И.Н., Чалая О.Н., Каширцев В.А., Лифшиц С.Х., Глянцева Ю.С. Геохимия органического вещества пермских отложений краевых прогибов Виллюйской синеклизы..... | 76 |
| Иванов Д.В., Толстов А.В., Иванов В.В. Геологическое строение и вещественный состав трубки Чукукская..... | 82 |
| Иванов М.А., Леонтьев С.П., Федотова М.А., Эверстова Д.Г. Статистический анализ данных о примесном составе алмазов и изготовленных из них бриллиантов..... | 88 |
| Канева Е.В., Шендрик Р.Ю., Радомская Т.А., Богданов А.И. Редкие силикаты щелочных пород Мурунского массива: кристаллохимические и оптические особенности..... | 92 |

| | |
|---|-----|
| Килижеков О.К., Толстов А.В., Яхин Ш.М., Симонов В.А., Разумов А.Н. | |
| Новые данные о геологическом строении глубоких горизонтов кимберлитовой трубки Мир..... | 96 |
| Климов Е.Н., Сивцев А.И. | |
| Организация подземного хранилища в перспективных на нефть и газ территориях Центральной Якутии..... | 103 |
| Колова Е.Е., Глухов А.Н. | |
| Мяучанское рудное поле – пример слабо эродированной Ag-Pb-Zn минерализации «Гольцовского» типа..... | 106 |
| Кондратьева Л.А., Анисимова Г.С., Кардашевская В.Н. | |
| Золотоносность минерализации висмута и теллура Спокойнинского узла (Алданский щит)..... | 109 |
| Константинов К.М., Константинов И.К., Черемных А.В., Декабрёв И.К., Орлова Г.В. | |
| Анализ природы термо- и пьезоостаточной намагниченности горных пород по данным анизотропии магнитной восприимчивости..... | 115 |
| Копылова А.Г. | |
| Самородное железо горных пород и метеоритов..... | 121 |
| Костровицкий С.И., Sun J. | |
| Корреляция кимберлитового, базитового и карбонатитового вулканизма в пределах Сибирского кратона..... | 123 |
| Кряжев С.Г., Двуреченская С.С. | |
| Гидротермально-осадочные сульфиды как возможный источник золота в орогенных рудообразующих системах Центральной Колымы..... | 127 |
| Кудрин М.В., Фридовский В.Ю., Полуфунтикова Л.И. | |
| Геолого-генетическая модель формирования орогенного золоторудного месторождения Хангалас Яно-Колымского металлогенического пояса..... | 132 |
| Мещеряков В.А., Сивцев А.И. | |
| Перспективы нефтегазоносности северо-восточной части Предпатомского регионального прогиба..... | 136 |
| Молчанов В.П., Юдаков А.А. | |
| Медистое золото интрузий ультрабазитов Сихотэ-Алиня (Приморье)..... | 140 |
| Мустафин С.К., Анисимова Г.С. | |
| Комплексный состав минерального сырья сурьмяных месторождений – как индикатор генезиса и качества..... | 144 |
| Мустафин С.К., Стручков К.К., Трифионов А.Н. | |
| Гелиеносность углеводородного сырья нефтегазоносных провинций Российской Федерации: задачи исследований, перспективы освоения..... | 152 |
| Литвиненко И.С. | |
| Оценка уровня эрозионного среза рудных проявлений Чумышского рудно-россыпного узла (Северо-Восток России) на основе изучения типоморфных признаков россыпного золота..... | 159 |
| Никифорова З.С. | |
| Индикаторный признак гидротермально-метасоматических образований – ртутьсодержащее золото..... | 165 |
| Новиков В.С., Дарьин А.В., Калугин И.А., Бабич В.В., Рогозин Д.Ю., Дарьин Ф.А., Ракшун Я.В., Сороколетов Д.С. | |
| Обработка методики анализа тяжелой фракции донных осадков о. Иткуль..... | 171 |

| | |
|---|-----|
| Оболкин А.П. | |
| Типы структур перспективных на поиски месторождений углеводородов, выявленных по данным региональных геофизических и геохимических исследований в Алдано-Майском прогибе..... | 173 |
| Овчинников И.М., Старостин П.В. | |
| Структурно-вещественная 3D-модель рудного узла Сюльдюкарского кимберлитового поля..... | 178 |
| Округин А.В. | |
| Генезис платина-хромитовой минерализации Инаглинского массива Алданского щита..... | 184 |
| Опарин Н.А., Мухамедьяров М.Г., Олейников О.Б., Корнилова В.П. | |
| Геологическое строение и вещественный состав кимберлитовых трубок Молодинского поля..... | 190 |
| Ощепкова М.Г., Мухамедьяров М.Г., Олейников О.Б. | |
| Морфологические особенности индикаторных минералов кимберлитов молодинского и толуопского полей..... | 196 |
| Павлушин А.Д., Коногорова Д.В. | |
| Кристаллогенетические предпосылки возникновения уникальной формы алмаза «матрешка» и подобные находки кристаллов..... | 201 |
| Петухова Е.С., Соловьев Т.М., Исакова Т.А., Ботвин Г.В., Петров В.В., Павлова В.В., Чириков А.А., Федоров А.Л. | |
| Свойства и структурные характеристики различных сортов бивня мамонта..... | 206 |
| Погодаев А.В., Рудых И.И. | |
| Гидродинамические особенности формирования месторождений соленосной гидрогеологической формации северо-западного склона Алданской антеклизы и прилегающих территорий..... | 211 |
| Полуфунтикова Л.И., Фридовский В.Ю., Кудрин М.В., Тарасов Я.А. | |
| Типохимизм и золотоносность пирита и арсенопирита из метасоматитов орогенных золоторудных месторождений Верхояно-Колымской провинции..... | 217 |
| Похиленко Л.Н., Афанасьев В.П., Похиленко Н.П., Королюк В.Н., Карманов Н.С. | |
| Минералы мантийных ксенолитов из обломка кимберлита, найденного в районе реки Сивикагна..... | 222 |
| Похиленко Н.П., Похиленко Л.Н., Афанасьев В.П., Тычков Н.С. | |
| Особенности появления и эволюции алмазов в литосферной мантии древних платформ..... | 230 |
| Проскурнин В.Ф., Романов А.П., Петров О.В., Сергеев С.А., Проскурнина М.А., Виноградова Н.П., Ремизов Д.Н., Богомолов Е.С. | |
| Возраст алмазаносных альнеитов Таймыра..... | 234 |
| Пуляев Н.А., Оросина Ч.С. | |
| Геохимическая специализация углей Верхне-Алдакайского участка Алдакайского месторождения..... | 240 |
| Радомская Т.А., Канева Е.В., Докучиц Э.Ю., Шендрик Р.Ю., Митичкин М.А. | |
| Франкаменит в чароитовых породах Мурунского массива (Алданский щит)..... | 245 |
| Самсонов Н.Ю., Гудин А.Н., Моралев Г.В., Толстов А.В., Слепцов А.П. | |
| Основные подходы к разведке и освоению золоторудного месторождения Кючус в современных условиях..... | 251 |
| Сачарысов А.С., Адаров Т.Д., Дубовченко Л.В., Чёрный Р.И. | |
| Применение “COSCAD 3D” с целью выделения перспективных участков на золотое оруденение..... | 254 |

| | |
|--|-----|
| Севостьянова Р.Ф. | |
| Геофлюидодинамические особенности вендского триггенного комплекса севера Непско-Ботобинской нефтегазоносной области..... | 258 |
| Слепцов А.П., Толстов А.В. | |
| Перспективы Томторского рудного поля на выявление месторождения марганца.... | 261 |
| Томшин М.Д., Константинов К.М., Гоголева С.С. | |
| Характер внедрения трапшвов вблизи кимберлитов..... | 267 |
| Трунилина В.А. | |
| Граниты А-типа Яна-Индигирского междуречья..... | 271 |
| Трунилина В.А. | |
| Литиевый потенциал северо-востока Республики Саха (Якутия)..... | 278 |
| Угайева С.С., Олейников О.Б. | |
| КР исследование кубических кристаллах алмаза из россыпей Анабарского алмазоносного района..... | 285 |
| Фридовский В.Ю. | |
| Рудообразующие системы орогенных золоторудных месторождений Яно-Колымского металлогенического пояса..... | 288 |
| Хосоев Д.В. | |
| Применение безвзрывных технологий на карьерах в условиях многолетнемерзлых пород..... | 292 |

ТЕКТОНИКА, ГЕОДИНАМИКА И ЭВОЛЮЦИЯ ЛИТОСФЕРЫ

| | |
|---|-----|
| Баранов В.В., Николаев А.И. | |
| Таксономическое значение морфологических признаков спириферид (brachiopoda)... | 298 |
| Бондарь Н.А., Кравченко А.А. | |
| Условия метаморфизма пород хатыминского комплекса в Амгинской зоне тектонического меланжа Алдано-Станового щита по результатам петрографических исследований..... | 303 |
| Васильев Д.А., Прокопьев А.В., Ершова В.Б. | |
| Новые данные о тектоническом строении северной части Хараулахского сегмента Верхоянского складчато-надвигового пояса..... | 309 |
| Гриненко В.С., Киричкова А.И. | |
| Схемы корреляции мезозоя: порайонные и региональные корреляционные – информативная основа перспектив потенциальной нефтегазоносности погребенных литокомплексов (западная периферия Верхояно-Колымской орогенной области и прилегающая территория Сибирской платформы)..... | 314 |
| Иванов А.И., Герасимов Б.Б., Иванов М.С., Журавлев А.И. | |
| Петрографический и петрохимический составы пород Хотугу-Экитского массива (Оленекский выступ)..... | 320 |
| Иванов А.И., Иванов М.С., Лоскутов Е.Е., Журавлев А.И. | |
| Петрография магматических пород Эвотинского массива (Алдано-Становой щит, Южная Якутия)..... | 325 |
| Иванов А.С., Специус З.В. | |
| Метасоматические преобразования в ксенолите алмазоносного перидотита из трубки Мир..... | 329 |
| Килясов А.Н., Кутыгин Р.В. | |
| О вертикальном распределении раннеиндских аммоноидей в типовом разрезе томпофичесерасовых слоев правобережья р. Сеторым Южного Верхоянья..... | 334 |
| Колосов П.Н., Охлопкова И.Ф. | |
| Интерпретация новых форм микрофоссилий венда Якутии..... | 338 |

| | |
|--|-----|
| Королева О.В., Прокопьев А.В., Полянский О.П., Камо С., Эрнст Р. Высокоточное U-Pb датирование сиенит-порфиоров Чаро-Синского дайкового пояса, Виллойский палеорифт, Сибирская платформа..... | 344 |
| Куляндина А.С. Количественная интерпретация геофизических полей для выяснения геологической структуры очаговой зоны мелкофокусного землетрясения..... | 347 |
| Кутыгин Р.В. Раннепермские амmonoидеи подсемейства uddenitinae в Западном Верхоянье..... | 353 |
| Левин Б. Субвулкан Орлинский - обоснование выделения такой структуры..... | 356 |
| Левин Б. Два разных подхода к изучению и картированию фундамента Омолонского массива | 361 |
| Макаров А.А., Козьмин Б.М. Южно-Якутское землетрясение 1989 г.: 30 лет спустя..... | 366 |
| Макошин В.И., Кутыгин Р.В. О брахиоподах левобережья низовьев реки Лены (Чекуровский разрез)..... | 369 |
| Милашкин М.В., Мальковец В.Г., Гибшер А.А., Яковлев И.В. Термальное состояние литосферной мантии и глубинные разрезы под кимберлитовыми трубками Алаakit-Мархинского кимберлитового поля (Сибирский кратон)..... | 373 |
| Павлова К.А., Жарков А.М. Тектоническое районирование осадочного чехла северо-востока Сибирской платформы и шельфа моря Лаптевых..... | 378 |
| Петрова Е.А. Обоснование классификации гиперболических осей синфазности сигналов георадиолокации для обучения модели сверточной нейронной сети..... | 382 |
| Прокопьев А.В., Васильев Д.А., Ершова В.Б., Стокли Д. Низкотемпературная термохронология центральной части Полоусного синклинория и Нагонджинского террейна (Верхояно-Колымская складчатая область)..... | 386 |
| Смирнов Ю.В., Дриль С.И., Смирнова Ю.Н., Заика В.А. Источники девонских терригенных отложений Нора-Сухотинского террейна: результаты геохимических и изотопно-геохимических (Sm-Nd) исследований..... | 389 |
| Фридовский В.Ю., Верниковская А.Е., Матушкин Н.Ю., Кадильников П.И., Кудрин М.В., Тарасов Я.А. U-Pb возраст, петрогенезис и геодинамическая обстановка образования гранитов рапакиви и ассоциирующих с ними пород Тарбаганнахского массива Аллах-Юньской тектонической зоны..... | 393 |
| Шацкий В.С., Рагозин А.Л. Тектоно-термальные этапы эволюции коры якутской алмазоносной провинции и их связь с процессами аккреции Сибирского кратона..... | 399 |
| Шкодзинский В.С. Глобальная петрология по данным о горячей гетерогенной аккреции Земли..... | 405 |
| Шкодзинский В.С. Происхождение алмазов в кимберлитовых магмах..... | 410 |

ГИДРОГЕОЛОГИЯ, ГЕОЭКОЛОГИЯ И МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЕ

| | |
|---|-----|
| Абишева А.В., Милушкин К.С., Мустафин С.К. Инженерно-геологические аспекты стратегии устойчивого развития в условиях промышленного освоения регионов Арктической зоны Российской Федерации..... | 415 |
| Васильев М.С., Тимофеев М.А., Сергин Д.К. Горимость лесов в Якутии за период 1958-2022 гг..... | 422 |

| | |
|---|-----|
| Васильева О.И., Муксунова Ю.И., Попов В.Ф. Инженерно-геологическая обстановка в районе ФГБОУ ВПО «Чурапчинский государственный институт физической культуры и спорта»..... | 428 |
| Васильева Т.И., Легостаева Я.Б. Сульфатные новообразования на поверхности агроземов заброшенных пастбищ долины Туймаада..... | 431 |
| Винокуров А.А., Портнягин А.С. Исследование устойчивости водонефтяных эмульсий растворов полимеров..... | 435 |
| Глязнецова Ю.С., Зуева И.Н., Чалая О.Н., Лифшиц С.Х., Львова О.С. Изменения состава нефтезагрязнения в процессе биodeградации..... | 439 |
| Гололобова А.Г. Содержание и распределение микроэлементов в почвах в зоне воздействия техногенеза..... | 444 |
| Ерофеевская Л.А., Александров А.Р., Ефимов С.Е. Гидрослюдисто-монтмориллонитовая глина для очистки объектов окружающей среды от нефтезагрязнений..... | 450 |
| Жирков А.Ф., Сивцев М.А. Восстановление и защита нарушенных территорий ледового комплекса в Центральной Якутии..... | 455 |
| Иванова И.К., Калачева Л.П., Портнягин А.С., Иванов В.К., Бубнова А.Р. Влияние пористой среды и засоленности поровой влаги на стабильность гидратов природного газа..... | 460 |
| Каймонов М.В. Численный прогноз температурного режима гидротехнических сооружений горных предприятий в условиях криолитозоны..... | 465 |
| Каминская А.В. История изучения почв минеральных источников Предбайкалья..... | 469 |
| Левина С.Н., Пестрякова Л.А. Разработка геоэкологической классификации озёр Якутии (на примере бассейна реки Индигирка)..... | 471 |
| Легостаева Я.Б., Сивцева Н.Е., Попов В.Ф., Муксунова Ю.И. Геоэкологические условия бассейна ручья Семюелях-Сала (Абыйская низменность) на перспективных участках поиска ископаемой мамонтовой фауны.. | 476 |
| Макаров В.Н. Торий во взвешенных веществах летней и зимней приземной атмосферы Якутска... | 482 |
| Мурзин Ю.А. Батагайский провал..... | 487 |
| Мустафин С.К., Анисимова Г.С. Ртуть в природно-техногенных экосистемах регионов недропользования: природа, миграция, экологические риски..... | 491 |
| Нестерова Е.А., Николаева Н.Н. Геокриологические условия залегания остатков животных мамонтовой фауны..... | 497 |
| Павлова М.Р., Лыткин В.М. Химический и изотопный состав подземных льдов Центрально-Якутской равнины и Западного Верхоянья..... | 501 |
| Павлова Н.А., Лебедева Л.С., Ефремов В.С., Огонеров В.В., Христофоров И.И., Горохов И.В., Полубелова А.В. Ресурсы и химический состав сточных озер на территории распространения над- и межмерзлотных таликов в Центральной Якутии (на примере оз. Юногестях)..... | 506 |
| Попов В.И. Изменение концентрации в донных отложениях при воздействии климатических циклов замерзания оттаивания..... | 512 |

| | |
|--|-----|
| Портнягин А.С., Иванова И.К. | |
| Изучение возможности образования газогидратов в процессе реализации мероприятий по водополимерному заводнению нефтяных оторочек нефтегазовых месторождений Якутии..... | 514 |
| Романис Т.В., Лебедева М.П. | |
| Влияние изменения температуры на микростроение промерзающих почв: теория и практика..... | 520 |
| Руфова А.А. | |
| Ретроспективный анализ гидрохимического состава озер г. Якутск..... | 523 |
| Сивцева Н.Е. | |
| Элементный состав почв и донных отложений озер города Якутска..... | 529 |
| Туктаров Р.М., Шибяев С.В., Куляндина А.С. | |
| Особенности сейсмического микрорайонирования территории г. Якутска..... | 534 |
| Черепанова А.М., Шепелев А.Г. | |
| Применение Terrset для составления карты наземного покрова Батагайского термоцирка на основе спутниковых снимков..... | 539 |
| Шадринова О.В. | |
| Трансформация солевого состава агрогенных почв Центральной Якутии..... | 542 |
| Шепелев А.Г., Черепанова А.М. | |
| Оценка подземного углерода в дельтовых участках реки Лены..... | 546 |
| Яковлева Л.Н., Чжан Т.Р. | |
| Гидрогеологический мониторинг грунтовых плотин Вилуйской ГЭС-3..... | 550 |
| Янников А.М. | |
| Вертикальная гидрогеологическая зональность в пределах Далдынского кимберлитового поля..... | 553 |

ГЕОЛОГИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 552.13

ГИДРОТЕРМАЛЬНО-МЕТАСОМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПОРОД РУДНОГО ПОЛЯ ЫЛЭН

Евдокия Акимова

ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова»,
677000, Россия, г. Якутск, ул. Белинского, 58

HYDROTHERMAL-METASOMATIC CHANGES OF THE YLEN ORE FIELD

Evdokiya Akimova

North-Eastern Federal University, 58, Belinsky str., Yakutsk, 677000, Russia

Annotation. The article presents data on the geological structure of the Ylen ore field. The ore zone is developed among sandstones, siltstones of the Aalen-Batsky tier of the Middle Jurassic and is confined to the development zone of the Burgandinsky deep fault of the Adycha-Suntar fold-block structural-formation zone of the Verkhoyano-Kolyma collision region. The zone of hydrothermal-metasomatically altered rocks is confined to discontinuous disturbances and is controlled by the outputs of magmatic bodies-dikes of rhyolite porphyries, diorite porphyrites. The parameters of quartz veins, carbonates with sulfides are given: length, power. In hydrothermally altered differences of sedimentary rocks, the texture of rocks becomes veined, the microstructure becomes relict blastopsammite, blastoaleurite. In micro-veins, the replacement of rock with aggregates of secondary minerals is observed: quartz, calcite, siderite, in fusion with sulfides, sericitization of polysynthetically twinned plagioclase. It should be noted the crystallization of chlorites in berezites, in association with quartz, calcite, sericite, sulfides, and in diorite porphyrites, rhyolite porphyries, the development of micro-calcification of quartz and calcite. Depending on the crack thickness, there is an increase in the dimension and crystallization of various forms of quartz and carbonate generation. The relationship of micro-veins of different composition emphasizes the multi-stage nature of the hydrothermal process.

Conducted micro-studies of altered rocks with the polarizing microscope POLAM L-213, allow us to draw conclusions:

1. According to the mineral associations of secondary minerals, the process of changing sedimentary rocks refers to berezitization.
2. The relationship of secondary changes with magmatism: with dikes of rhyolite porphyries and diorite porphyrites.
3. Structural and textural features and mineral composition of metasomatites indicate a multi-stage hydrothermal process.

1. Введение

Целью исследования является петрографическое изучение минерального состава и текстурно-структурных особенностей околорудных изменений пород на территории Ылэнского рудного поля. Ранее на этой площади работ такие исследования не проводились, в связи с этим представленный материал имеет научно-практическое значение.

В региональном плане Ылэнское рудное поле расположено в центральной части Иньяли-Дебинского мегасинклинория в пределах Адыча-Сунтарской складчато-блоковой структурно-формационной зоны Верхояно-Колымской коллизионной области. Оно находится на участке

пересечения зоны Бургандинского глубинного разлома, поверхностным отражением которого является полоса Антагачанских разломов, с серией разрывов северо-восточного простирания. Район изучения гидротермально-метасоматических изменений осадочных пород сложен песчаниками, алевропесчаниками, песчано-глинистыми сланцами аален-батского яруса, средней юры.

Структурная позиция рудного поля приурочена к участку сочленения Иньяльской синклинали и Ылэнской антиклинали северо-западного простирания. Ширина Ылэнской антиклинали около 4 км, ширина Иньяльской синклинали около 10 км, протяженность складок несколько десятков км. Крылья складок осложнены структурами более высоких порядков вплоть до плейчатости. Складки более высоких порядков, как правило, узкие, симметричные, линейно-вытянутые северо-западного и субширотного простирания. Они осложняют складки более низких порядков, создавая картину их сложных взаимоотношений и переплетений. Углы падения крыльев складок варьируют в пределах 40-70 град. Шарниры складок на площади рудного поля испытывают пологое погружение на юго-восток. В устьях ручьев Укромный и Ненужный, а также на водоразделе руч. Чистый и Цирк оно составляет 6-12 град.

Складчатые структуры рудного поля осложнены многочисленными разрывными нарушениями северо-западного, широтного, северо-восточного, меридианального. Разрывы северо-западного субширотного простирания, отражающие зону Бургандинского разлома глубинного заложения, субсогласные с простиранием складчатых структур и представлены серией сближенных кулисообразно сочленяющихся сбросов и взбросо-сдвигов. Протяженность разрывов достигает первых десятков километров, а амплитуды вертикальных смещений по ним достигают первых сотен м. В разрывах этого направления часто локализованы кварцевые жилы и зоны жильно-прожилкового окварцевания с золоторудной минерализацией. Мощность кварцевых жил колеблется от 0,05 м до 1,0-2,0 м, зон окварцевания от первых метров до десяти метров. Протяженность жил не установлена и предполагается не более 20-30 метров, протяженность зон достигает первых км. Содержание золота в кварцево-жильных образованиях по данным штуфного опробования, колеблется от долей г/т до сотен г/т.

Магматические образования представлены дайками кислого и среднего состава, прорывают и слабо метаморфизуют терригенные отложения средней юры и, предположительно, отнесены к образованиям позднеюрского возраста, ассоциируясь с магматитами диорит-гранит-гранодиоритовой формации малых интрузий (нера-бохапчинский комплекс). Выходы пород нера-бохапчинского комплекса традиционно контролируют размещение оруденения золото-кварцевой формации и связанных с ним россыпей золота. Петрографически дайки представлены андезибазальтами, андезитовыми и диоритовыми порфиритами, риолитами, риолит порфирами. Мощность даек колеблется от первых метров до 25 м, протяженность от десятков метров до 2,5 км, залегание даек вертикальное. Простирание даек, преимущественно, северо-восточное, реже меридиональное и широтное. Контакты даек с вмещающими породами четкие, извилистые, чаще контакты тектонические с развитием тектонической глинки трения. Дайки, в подавляющем большинстве, сопровождаются прожилково-кварцевой минерализацией с редкой вкрапленностью сульфидов. Повышенных содержаний золота в окварцованных дайках не установлено. Штуфное опробование карбонат-кварцевых высыпок, приуроченных к дайкам, выявило в них повышенное содержание золота от долей г/т до 21,4 г/т (правобережье руч. Кус).

Гидротермально-метасоматические образования рудного поля характеризуются широким развитием и представлены: зонами тонко-прожилкового окварцевания, прокварцованными зонами дробления с кварцевыми брекчиями и непротяженными (не более 50-80 м) кварцевыми жилами линзовидной формы. По минеральному составу они подразделены на следующие типы: мономинеральные кварцевые, карбонатно-кварцевые, хлорит-кварцевые, сульфидно-кварцевые, золото-кварцевые (в случаях визуального определения золота). Распределение образований в пределах рудного поля неравномерное. Наибольшее их количество сосредоточено в центральной части рудного поля в полосе шириной 2-3 км протягивающейся с юго-востока на северо-запад. Пространственно в этой полосе совмещены многочисленные разрывные нарушения и интенсивная мелкоамплитудная складчатость. Все кварцевые жильно-

прожилковые образования рудного поля относятся к типу жил выполнения трещин и характеризуются «холодными» контактами с вмещающими породами. Жильные минералы представлены кварцем, железистым карбонатом, кальцитом, хлоритом. Железистые карбонаты представлены минералами изоморфных рядов: сидерит-родохрозит и сидерит-кальцит. Рентгеноструктурным анализом в образцах определены минералы: родохрозит и кальциоколиаптит. Рудная минерализация в жилах представлена редкой вкрапленностью пирита, арсенопирита, антимонита, галенита, блеклых руд, золота. Иногда встречаются антимонит-кварцевые линзы и прожилки, где содержание антимонита достигает 40-60% (рудопоявление Чистый), обломочный ореол. Блеклая руда рентгеноструктурным анализом определена в одном из образцов как бурнонит. Самородное золото представлено мелкими (0,011-1,3 мм) зернами комковидной и интерстициальной формы, редко встречается тонкое (0,001 мм) золото идеальной шаровой формы. Пробность рудного золота колеблется от 881,7‰ до 969,5‰, при этом, имеет место тенденция приуроченности высокопробного золота к центрально-осевой линии рудного поля северо-западного заложения. В восточной части рудного поля линия проходит через головки россыпей золота, а в западной - через рудопоявления Соколиное или обломочный ореол золота.

Вторичные минералы в зоне гипергенеза кварцевых жил представлены в основном гетитом, лимонитом, редко встречаются малахит и охры сурьмы. Рентгеноструктурным анализом в протоочках определены редко встречаемые минералы литаргит и церуссит, развивающиеся по галениту.

В результате изучения структурно-морфологических особенностей гидротермальных образований выделено пять типов рудных тел:

1. Простые плитообразные (плитчатые, линзовидные, четковидные и т.п.) жилы, локализованные в зонах разрывных нарушений;
2. Сложные штокверкоподобные плитообразные тела (минерализованные зоны дробления), локализованные в зонах разрывных нарушений;
3. Секущие жилы простой морфологии выполняющие трещины в осадочных породах;
4. Субсогласные жилы и линзы в трещинах межпластовых срывов;
5. Продольно-, косо- и поперечносекущие жилы и прожилки разнообразной формы в дайках кислого и среднего составов;

2. Результаты исследования

По микропетрографическим описаниям алевролитов, песчаников, околорудные гидротермально-метасоматические изменения проявились в зоне развития разрывов различного направления, которые сопровождаются интенсивной трещиноватостью, катаклизмом и милонитизацией и сопутствующим изменением вмещающих пород с сохранением угловато-окатанного кварца и полисинтетически сдвойникового плагиоклаза (альбита). При этом текстура пород становится прожилковой, а микроструктуры приобретают реликтовый бластосаммитовый, бласто-алевропсаммитовый облик. В зонах интенсивной переработки пород восходящим гидротермальным раствором проявляются лепидогетеробластовые микроструктуры, цемент породы чаще становится черным, глинистым.

Вмещающие породы – песчаники, алевропесчаники, в зонах развития разрывных нарушений, пронизаны микропрожилками кварцевого, карбонатного, кварц-карбонатного состава. Карбонаты большей степени представлены кальцитом ($N=1.48-1.66$, спайность по ромбэдру, единичные зерна полисинтетически сдвойникованы, с перламутровой интерференционной окраской; $R=0.17$ нм.), нередко наблюдается сидерит с высоким рельефом ($N=1.875$ в скрещенных николях волнистое погасание). Спорадически в породах кристаллизован хлорит до 1-2 %, в частности, жильном кварце удлиненно-шестоватого облика содержание чешуек зеленого хлорита достигает до 5-10 %. Хлорит иногда кристаллизован в срастании с карбонатом и образует микропрожилки, мощностью 0.4-0.6 мм (рис.1, Г) Оптические константы хлорита- тюрингита ($N=1.68$, прямое погасание, положительное удлинение, аномально синего цвета интерференции, $R=0.009$ нм.).

В микропрожилках пород кварц в мелких трещинах кристаллизован в виде микрозернистых, халцедовидных (рис.1, А) и гранобластовых агрегатов (рис.1, Б). В более крупных трещинах, в условиях свободного роста – параллельно шестоватых, гребенчатых агрегатов (рис.1, В). Формы кристаллизации кальцита тоже меняется в зависимости от размеров микротрещин от микрогранобластовых до параллельно шестоватых.

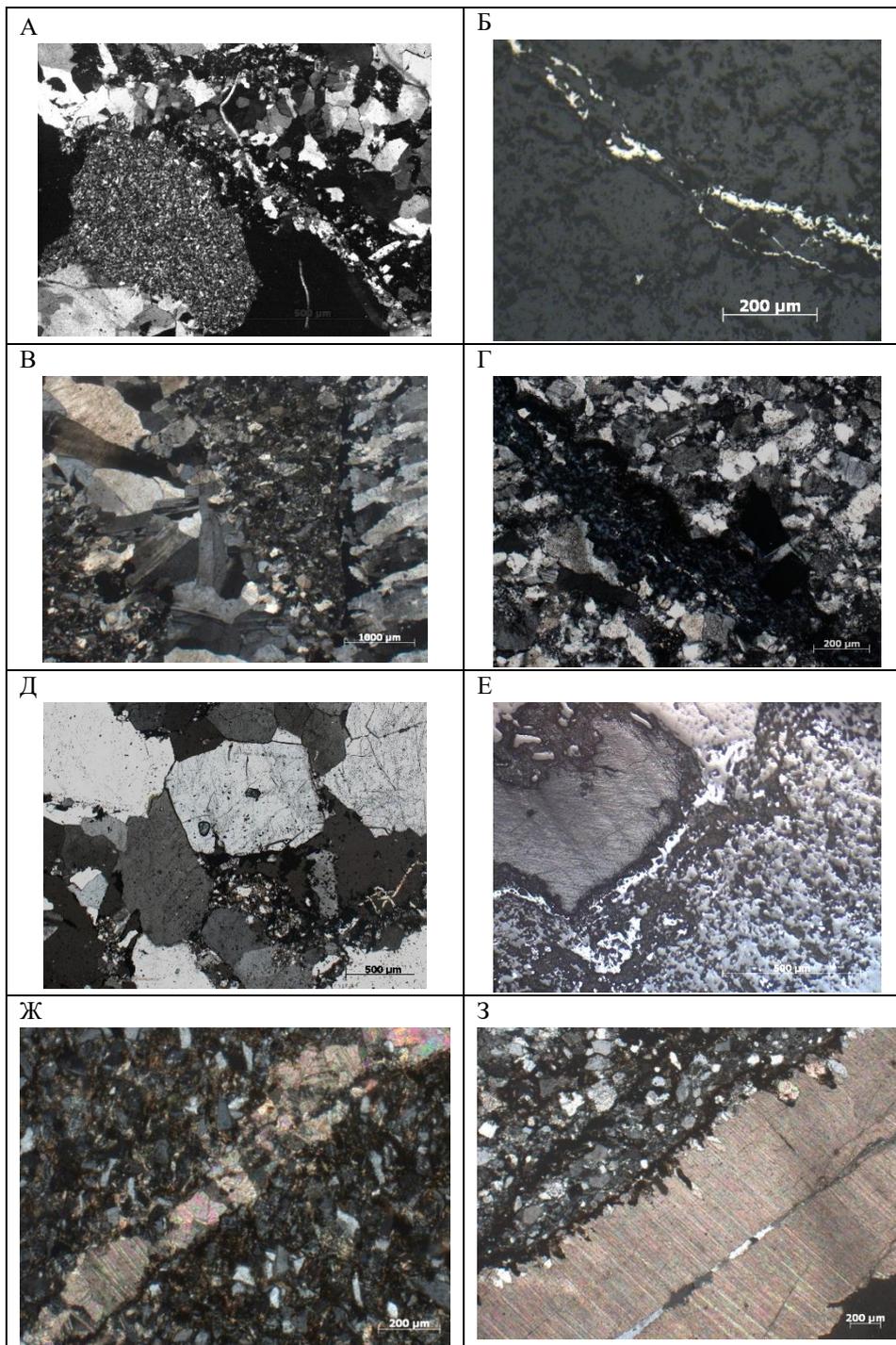


Рисунок 1 – Березитизированные терригенные породы: А – халцедовидный, микрозернистый кварц в березите; Б – микрожилок микрогранобластового кварца с сульфидами; В – микропрожилки гребенчатого и параллельно-шестоватого кварца; Г – микропрожилок хлорита с аномальной темно-синей интерференционной окраской; Д – кварц-серицитовые агрегаты в межзерновом пространстве более позднего кварца; Е - микропрожилок кальцит – кварцевого состава. Кальцит с оторочкой сульфидов; Ж – микропрожилок гетеробластового кальцита; З – микропрожилок параллельно шестоватого кальцита

В зонах интенсивной переработки восходящих гидротермальных растворов в березитах, содержание микрочешуйчатых агрегатов серицита (рис. 1, Д) (бесцветные, с яркой интерференционной окраской, прямое погасание, положительное удлинение, $R= 0,034$ нм.) достигает до 15-20%, при этом они частично или псевдоморфно в магматитах замещают обломочные и гипидиоморфные зерна альбита (рис 2.А, 2Г) и вытягиваются вдоль микротрещин до 0,3-0,5 мм (рис. 1, Б).

Дайки риолит-порфиров и диабазовых порфиритов пронизаны микропрожилками кварца, кальцита, а плагиоклазы псевдоморфно замещены агрегатами серицита. (рис. 2, Г).

Растворение породы по многочисленным микро и макротрещинкам, по поровому пространству и замещение его вторичными минералами подтверждает инфильтрационно-диффузионный тип околорудного метасоматоза [1, 2]. Сопряженность рудоотложения с метасоматическим процессом характеризуется оторочкой кальцита сульфидами. (рис. 1, Е)

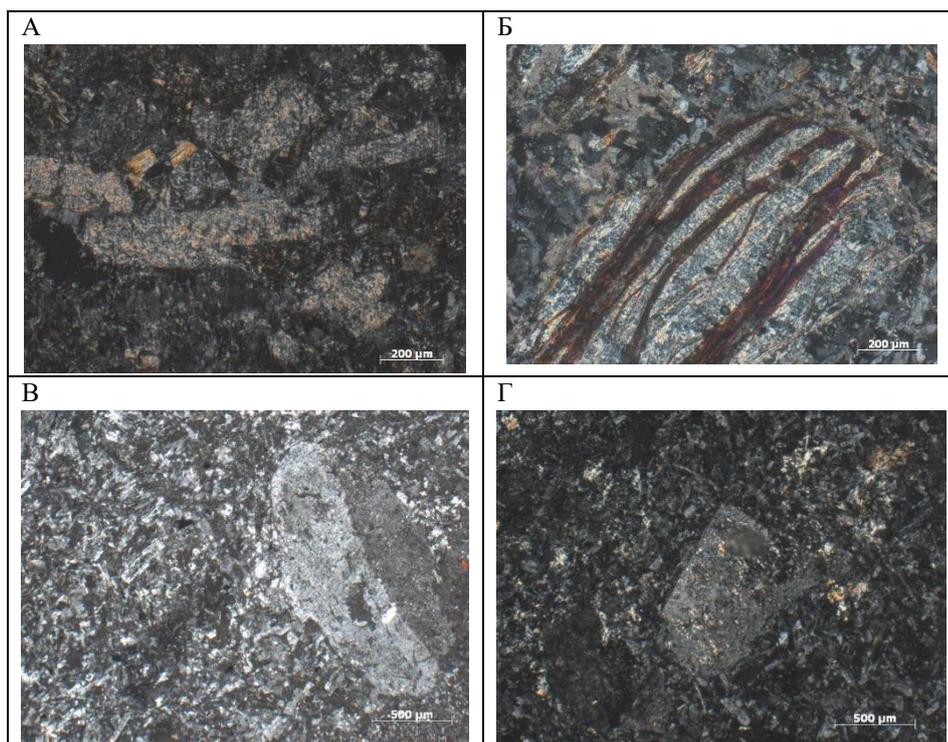


Рисунок 2 – Березитизированные дайки риолит –порфиров (А-Б) и диабазовых порфиритов (В-Г): А – серицитизация по порфировым зернам альбита и с основной массой; Б – вторичный ожелезненный серицит растущий по микротрещинкам катаклаза; В – окварцевание породы в основной массе; Г – серицитизация по порфировым зернам плагиоклаза и в основной массе по микротрещинам в ассоциации с кварцем.

3. Выводы

1. Таким образом, на основании парагенезиса вторичных минералов (кварц, кальцит, сидерит, альбит, хлорит, серицит, пирит), процесс изменения вмещающих пород относится к березитизации. [2].
2. Наличие прожилков и микропрожилков кварца и кальцит-кварцевого состава с сульфидами в магматических породах подтверждают прямую генетическую связь гидротермально-метасоматических изменений с дайками риолит-порфиров и диабазовых порфиритов.
3. Наблюдается пространственная связь березитов, березитизированных песчаников и алевролитов с рудной зоной и с зонами развития разрывных нарушений.
4. Разная форма и размерность кристаллизации вторичного кварца позволяют выделять несколько генераций кварца, связанных с многостадийностью гидротермального процесса:
 - Ранний кварц 1-й генерации: халцедоновый, субмикроскопический (0,01-0,05мм), кристаллизованный в мелких трещинах, в порах.

- Кварц 2-й генерации, сопряженный с оруденением: мелкокристаллический, гипидиоморфный удлиненного габитуса, параллельно-шестоватый, гетеробластовый, размером 0,1-1,0 мм и более, в ассоциации с серицитом, хлоритом, карбонатами (кальцит, сидерит) сульфидами (пирит, антимонит и тд.).
- Кварц 3-й генерации, поздний, заполняющий более крупные трещины: параллельно шестоватый, гребенчатый, размером больше 1 мм, макроскопически, занимает широкие трещины
- Кварц 4-й генерации микрозернистый (0,05- 0,1мм) гетеро- и гранобластовый.

4. Литература

- [1] Кучеренко И.В. Гидродинамика трещиннопоровых породно флюидных взаимодействий и механизм масспереноса в процессах околоитрещинного гидротермального метасоматизма // Разведка и охрана недр . – 2010. – №11. – С.37-43.
- [2] Омеляненко Б.И. Околорудные гидротермальные изменения пород. – Москва: Недра, 1978. – С.7, 71.

ВОЛЬФРАМСОДЕРЖАЩИЕ АКЦЕССОРНЫЕ МИНЕРАЛЫ В ЛИТИЙ-ФТОРИСТЫХ ГРАНИТАХ КЕСТЕРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЯКУТИЯ)

Виктор Алексеев, Иван Алексеев

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

TUNGSTEN-BEARING ACCESSORY MINERALS IN LITHIUM-FLUORIC GRANITES OF KESTER DEPOSIT (YAKUTIA)

Viktor Alekseev, Ivan Alekseev

Saint-Petersburg Mining University, 2, 21st Line, Vasilievsky island, St. Petersburg, 199106, Russia

Annotation. For the first time, an accessory complex of tungsten minerals was observed in lithium-fluoric granites of the Kester deposit. It includes ferberite and wolframioxiolite, and tungsten-bearing tantalum-niobates: columbite-(Fe), columbite-(Mn), tantalite-(Mn), microlite, struverite and wodginite. The complex of tungsten-bearing accessory minerals is indicative of rare-metal lithium-fluoric granites of the Russian East. It is associated with a tin-rare-metal ore mineralization.

1. Введение

Важнейшим фактором рудоносности Тихоокеанского подвижного пояса является генетическая и пространственная связь редкометалльно-оловорудных месторождений с литий-фтористыми гранитами (ЛФГ) [1]. К информативным признакам крупных месторождений Sn, W, Ta, Nb, Li Востока России относятся акцессорные комплексы тихоокеанских гранитоидов, их видовой состав и характерные черты наиболее распространенных акцессорных минералов. Топоминералогическими исследованиями установлена характерная черта рудоносных гранитов Дальневосточного пояса ЛФГ – наличие вольфрамовых минералов и повышенное содержание примеси вольфрама в акцессориях [2]. В докладе этот критерий рудоносности рассмотрен на примере редкометалльно-оловянного месторождения Кестер в Восточной Якутии.

2. Основной раздел

Кестерское месторождение расположено в Арга-Ыннах-Хайском гранитном плутоне, на контакте гарполита редкометалльных ЛФГ, прорывающих андезиновые граниты главной фазы. Рудное тело представляет собой залежь топаз-мусковит-кварцевых грейзенов с касситеритом, амблигонитом и сульфидами. Главные акцессорные минералы ЛФГ: топаз, монтебразит, танталсодержащий касситерит, фторапатит, колумбит-(Mn), танталит-(Mn) и др.; второстепенные: ниобиевый ферберит, вольфрамооксиолит, уран-гафниевый циркон, стрюверит, ильменит, монацит-(Ce), ксенотим-(Y), уранинит и др.

Вольфрамовая специализация ЛФГ выражена в наличии собственно вольфрамовых минералов: ферберита и вольфрамооксиолита. Кроме того, в их состав входят вольфрамсодержащие акцессории: колумбит-(Fe), колумбит-(Mn), танталит-(Mn), микролит, стрюверит [3] (рис. 1, а). Минералы группы колумбита содержат в среднем 2.67 масс.% WO₃; колумбит-(Fe) до 7.12; танталит-(Mn) до 4.72; микролит до 3.64; стрюверит до 3.39 масс.% WO₃. Формула колумбита-(Mn) из ЛФГ месторождения Кестер: $(Mn_{0.58}Fe_{0.37})_{0.95}(Nb_{1.39}Ta_{0.55}Ti_{0.04}W_{0.03}Sn_{0.01})_{2.02}O_6$.

Наши последние исследования показали наличие в составе Кестерского гарполита ЛФГ вольфрамсодержащего воджинита. Минерал в виде зерен размером 0.7–10 мкм образует агрегаты с танталитом-(Mn), нарастающим на колумбит-(Mn). Характерны также гипидиоморфные таблитчатые зерна размером 1–19 мкм, нарастающие на танталит-(Mn), колумбит-(Mn), колумбит-(Fe) (рис. 1, б). В кристаллах акцессорного касситерита встречаются включения колумбита-(Mn), окруженного каймами воджинита шириной 0.7–8 мкм.

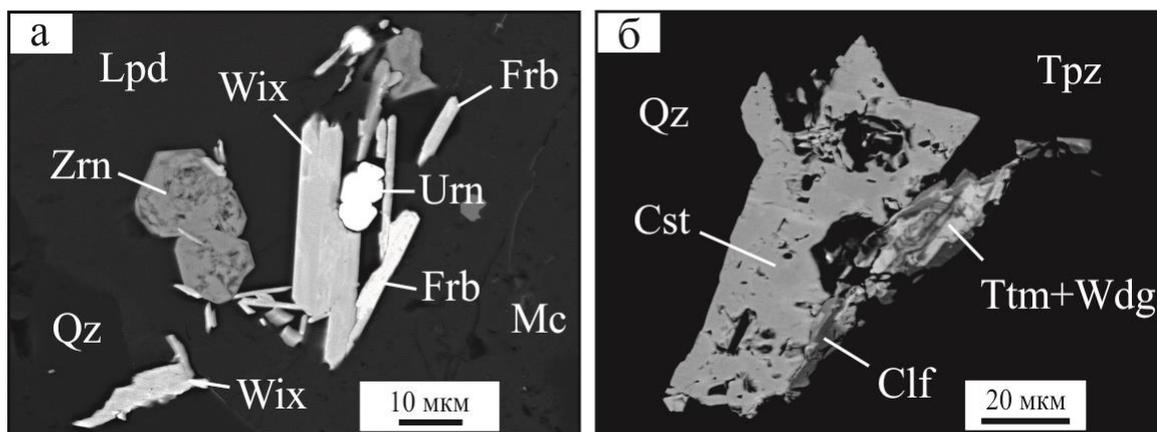


Рисунок 1 – Вольфрамовые и вольфрамсодержащие акцессорные минералы в литий-фтористых гранитах месторождения Кестер: Clf – колумбит-(Fe), Cst – касситерит, Frb – ферберит, Lpd – лепидолит, Mc – микроклин, Qz – кварц, Ttm – танталит-(Mn), Trz – топаз, Wix – вольфрамооксиолит, Urn – уранинит, Wdg – воджинит, Zrn – циркон.

Воджинит Кестерского месторождения обогащен марганцем: $Mn/(Mn+Fe_t) = 0.61-0.82$. В сравнении с типичным воджинитом содержит меньше тантала: $Ta/(Ta+Nb) = 0.69-0.84$. Содержание WO_3 в воджините составляет в среднем 2.46 %. Эмпирическая формула: $(Mn^{2+}, Fe^{2+})_{1.00}(Sn, Ta, Ti, Fe^{3+})_{1.00}(Ta, Nb, W^{6+})_{2.00}O_8$.

Наиболее близким аналогом кестерского воджинита является вольфрамсодержащий воджинит из ЛФГ крупнейшего вольфрамового месторождения Dajishan в Юго-Восточном Китае [4].

В условиях высокой активности летучих компонентов вольфрам может выступать как типичный элемент остаточных редкометалльных расплавов-растворов [5]. Это определяет образование вольфрамсодержащих минералов в редкометалльных пегматитах и гранитах и может служить признаком их рудоносности. Это наблюдается в российском секторе Тихоокеанского подвижного пояса. Например, воджинит редкометалльного Вознесенского месторождения в Приморье содержит около 1.9 % WO_3 [6].

3. Выводы

1. В литий-фтористых гранитах Кестерского месторождения установлен акцессорный комплекс вольфрамовых минералов – ферберита и вольфрамооксиолита, и вольфрамсодержащих тантало-ниобатов – колумбита-(Fe), колумбита-(Mn), танталита-(Mn), микролита, стрюверита и воджинита.
2. Комплексы вольфрамовых акцессорных минералов служат признаком редкометалльных литий-фтористых гранитов Востока России и связанной с ними оловянно-редкометалльной рудной минерализации.

4. Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-15-50064. Авторы выражают благодарность главному научному сотруднику ИГГД РАН В.Н. Подковырову за разрешение использовать коллекцию горных пород из личного архива М.А. Романовой.

5. Литература

- [1] Alekseev, V.I. Lithium-fluoric granites of the Far East. – SPb.: National mineral resources university (Mining University). – 2014. – 244 p. (in Russian).
- [2] Alekseev, V.I. and Marin, Yu.B. Tungsten Accessory Minerals in Lithium-Fluoric Granites of the Russian Far East // Doklady Earth Sciences. – 2014. – Vol. 458. – Part 1. – P. 1161-1164.
- [3] Alekseev, V.I. and Marin, Yu.B. Columbite-Tantalite of the Kester Deposit (Eastern Yakutia) // Russian Journal of Pacific Geology. – 2022. – Vol. 16. –No. 2. – P. 161-171.

- [4] Wu, M., Samson, I.M., Zhang, D. Textural and Chemical Constraints on the Formation of Disseminated Granite-hosted W-Ta-Nb Mineralization at the Dajishan Deposit, Nanling Range, Southeastern China // *Economic geology*. – 2017. – Vol. 112. – No 4. – P. 855-887.
- [5] Voloshin, A.V. Tantaloniobaty. Taxonomy, crystallochemistry and evolution of mineral formation in granite pegmatites. – St. Petersburg: Nauka, 1993. – 298 p. (in Russian).
- [6] Rub, A.K., Rub, M.G. Rare-metal granites of Primorye. – Moscow: VIMS, 2006. – 86 p. (in Russian).

УДК 553.411

**ИВЕНСЕН ЮРИЙ ПАВЛОВИЧ – ДИРЕКТОР-ОРГАНИЗАТОР ИНСТИТУТА
ГЕОЛОГИИ ЯФ АН СССР, ВИДНЫЙ СПЕЦИАЛИСТ В ОБЛАСТИ ГЕОЛОГИИ
РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И МЕТАЛЛОГЕНИИ:
К 115-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ**

Галина Анисимова

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

**IVENSEN YURI PAVLOVICH - DIRECTOR-ORGANIZER OF THE INSTITUTE OF
GEOLOGY OF THE YAF SO AN OF THE USSR, OUTSTANDING SPECIALIST IN
THE FIELD OF GEOLOGY OF ORE DEPOSITS AND METALLOGENY: ON THE
115TH ANNIVERSARY OF THE BIRTHDAY**

Galina Anisimova

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

Annotation. Ivensen Y.P. was born on December 3, 1908 in Moscow. He studied at the Literary Institute (1925–1926), studied for 3 years at the Geological Department of the Faculty of Physics and Mathematics of Moscow State University (1926–1929), graduated from the Kazakh Mining and Metallurgical Institute (1948) as an external student. He worked at the Institute of Applied Mineralogy (now VIMS) (1929–1936), at NIGRIzoloto (1936–1940), at the GIN of the USSR Academy of Sciences (1940–1941), at the Tajikzolotoredmet trust (1941–1945), at the Geological Institute of the Kyrgyz branch of the Academy of Sciences USSR (1945–1948), head. department, and then deputy director at the GipronIimica of the Ministry of Internal Affairs of the USSR (1948–1953). Since 1953 worked in the Yakut branch of the USSR Academy of Sciences as the head of the department of geology, and in 1957 he was appointed director-organizer of the Institute of Geology of the YaF Academy of Sciences of the USSR. In 1958–1961 worked as deputy Chairman of the Presidium of the Komi Branch of the Academy of Sciences of the USSR and director-organizer of the Geological Institute of the KFAN of the USSR. In 1961–1965 headed a department at the Lopi Institute of the Academy of Sciences of the USSR. In 1965 he returned to Yakutia and served as head of the laboratory of geochemistry and metallogeny, as well as deputy. Director of the Institute of Geology, YaF, Siberian Branch, USSR Academy of Sciences (until 1973). The field of research is the geology of ore deposits of polymetals, tungsten, tin, gold, rare and trace elements, mica, metallogeny. Of particular importance are his works on the predictive assessment of the territory of Yakutia for gold and polymetals. The discoverer of eight rare-metal and polymetallic deposits, incl. Ak-Tuz, Kastek, Kan-Choch; Turkestan uranium belt (Central Asia).



1. Введение

Юрий Павлович родился 3 декабря 1908г в Москве. Учился в Литературном институте (1925–1926), и геологическом отделении физико-математического факультета МГУ (1926–1929), экстерном окончил Казахский горно-металлургический институт (1948). Работал в институте прикладной минералогии (ныне ВИМС) (1929–1936), в НИГРИзолото (1936–1940), в ГИН АН СССР (1940–1941), в тресте «Таджикзолоторедмет» (1941–1945), в Геологическом институте Киргизского филиала АН СССР (1945–1948), зав. отделом, а затем заместителем директора в ГипроНИИслюда МВД СССР (1948–1953). С 1953 г. работал в Якутском филиале АН СССР заведующим

отделом геологии, а в 1957 г. был назначен директором-организатором Института геологии ЯФ АН СССР. В 1958–1961 гг. работал зам. председателя Президиума Коми Филиала АН СССР и директором-организатором Геологического института КФАН СССР. В 1961–1965 гг. заведовал отделом в ЛОПИ АН СССР. В 1965 г. вернулся в Якутию и занимал должности заведующего лабораторией геохимии и металлогении, а также зам. директора Института геологии ЯФ СО АН СССР (до 1973 года). Область исследований – геология рудных месторождений полиметаллов, вольфрама, олова, золота, редких и рассеянных элементов, слюды, металлогения. Особое значение имеют его работы по прогнозной оценке территории Якутии на золото и полиметаллы. Первооткрыватель восьми редкометальных и полиметаллических месторождений, в т.ч. Ак-Тюз, Кастек, Кан-Чоч; Туркестанского ураноносного пояса (Средняя Азия) [1-5].

2. Формационная классификация золоторудных месторождений в трудах Ю.П.Ивенсена

Юрий Павлович важнейшей задачей геологической службы Якутии в то время считал выявление крупных золоторудных объектов, что является и сейчас актуальной задачей. Для решения этой задачи он полагал, что надо выяснить какие золоторудные формации и районы проявления золоторудных формаций наиболее перспективны именно для выявления крупных объектов. Одной из ключевых задач он считал вопрос о формационной классификации золоторудных месторождений, выделения металлогенически специализированных на золото магматических комплексов и рудоконтролирующих структур. Ивенсен Ю.П. с соавтором Левиным В.И. рассмотрели и подвергли критическому разбору основные типы классификации рудных месторождений с позиций геолога, пользующегося ими в своей теоретической и практической деятельности [6]. Они также рассмотрели последние варианты специальных классификаций золоторудных месторождений Н.В.Петровской, И.С.Рожкова и Д.А.Тимофеевского. На основе разбора этих классификаций было показано, что по своей структуре они отличаются теми же логическими недостатками и по ряду причин геологами используются неоднозначно, что вносит большую путаницу в геологическую науку и затрудняет правильное сопоставление описанных в литературе фактов.

Эти классификации основаны на наиболее приемлемом в данное время формационном принципе с учетом того, что генетическое понимание сущности рудных формаций чаще всего гипотетично и не может использоваться в качестве основания классификации. Сознвая это, авторы рассматриваемых классификаций ограничились в своих определениях формаций их вещественным составом (парагенезами минералов). Но эти определения оказались настолько общими (формальными), что использованные формационные термины многими геологами применяются вне всякой связи с тем сущностным понятием, которое автором классификации имелось в виду. Кроме того, объем формаций Н.В.Петровской и Д.А.Тимофеевского слишком широк, каждая из формаций включает группы месторождений нередко различного генезиса и образовавшиеся в разной геологической обстановке. Формации этих двух классификаций лишь частично сопоставимы между собой, так как границы между ними определены разными методами. Формации неравновелики между собой, особенно в классификации Д.А.Тимофеевского.

На основе этого критического разбора Ивенсеном Ю.П. и Левиным В.И. были рассмотрены предпосылки к разработке более приемлемой схемы, которая, оставаясь по логической структуре классификацией перечисления с объяснением, включала бы в основание классификации не только формально-минералогические признаки, но и признаки геологические (характеристику условий образования и распространения данной группы месторождений, генезис), становясь хотя бы в зачатке, сущностной классификацией. Они полагали, что последнее требование наиболее важно и является единственным путем к созданию подлинно сущностной классификации.

Таблица 1 – Предлагаемая схема классификации золоторудных месторождений [6]

| Генетические группы | Рудные формации | Месторождения |
|--|--|---|
| Магматическая | 1.Золотое оруденение в гипербазитах 2.Хромит-золото-платиновая | Золотая Гора, проявления Алтая, Закавказья, Средней Азии Протезоиды, палеозоиды и мезокайнозоиды Тихоокеанского и Средиземноморского поясов |
| Колчеданная | 3.Сульфидно-золото-платиновая-медно-никелевая Колчеданная золото-полисульфидная | Седбери, Бушвельд, Стилутер, Норильский, Талнахский, Инсизва Учалинское, Сибайское, Куросанское, Баймакское, Торт-Кудук (Казахстан)и др. |
| Скарновая | Золото-скарновая | Тордон, Лебедское, Натальевское. Синюхинское (Алтае-Саян), Джилад, Куру-Тегерек, Мосриф (Средняя Азия), Санатафе, Монтана, Кебл (Мексика) Суайн (Япония) |
| Полевошпатовых метасоматитов и грейзенов | 1.Золотоносных полевошпатовых метасоматитов 2.Золотоносных грейзенов | Алданский щит, Украинский щит Енисейский Кряж, Западное Приохотье, Камфло (Канада) |
| <u>Плутоногенный класс</u> | | |
| Гидротермальная | 1.Золото-сульфидная в карбонатных породах | Восточные Саяны, Алданский щит (Куранах, Лебединое) |
| | 2.Золото-сульфидная в силикатных породах | Миндяк, Бакырчик, Сухой Лог, Кокпатас, Маунт-Морган, Калгурли |
| | 3.Золото-редкометалльно-кварцевая | Монгольский Горный Алтай, Калба-Нарын, пояс Малайи, Шеперд и Морфи (Тасмания), Куларский район, Чугулук, Эргелях |
| | 4. Золото-арсенопирит-кварцевая | Березовское, Коч-Булак, Ново-Широкинское, Степняк, Сарала, Советское, Мурунтау, Токур, Наталка, Нежданинское, Эргелях, Штурмовское, Утинское, Сарылахское |
| | 4.Золото-турмалин-кварцевая | Казаковское, Ключевское |
| | 5.Золото-медно-молибденовая (порфировая) | Казахстан, Средняя Азия, Дальний Восток, Колорадо, Чили, Британская Колумбия |
| | 6. Золото-полисульфидно-кварцевая | Дарасунское, Ново-Широкинское, Коч-Булак, Айгедзорское, Марал-Заминское, Личхваское |
| | 7.Малосульфидная золото-кварцевая (сингранитоидная) | Степняк, Джеламбет, Коммунарское, Саралинское, Наталкинское, Нежданинское, Кокпатас?, Мурунтау? |

| Генетические группы | Рудные формации | Месторождения |
|---|--|---|
| Гидротермальная | 8. Малосульфидная золото-кварцевая (глубинного происхождения) 9. Золото-антимонитовая | Аллах-Юньская зона, Советское, Токурское, Сагурское, Докембрий Южной Родезии, мезозоида и кайнозоиды Средиземноморского пояса, Центральны и Южный Тянь-Шань, Итакинское, юг Дальнего Востока, Сарылахское |
| | <u>Вулканогенный класс</u> | |
| Хемогенно-осадочная Метаморфизованно-осадочная группа Метаморфогенная | Убогосульфидная золото-кварцевая или золото(адуляр)-халцедон-кварцевая | Проявления С-В Ссрр, Au-Ag Мансфельд Витватерсранд, Тарква, Жакобина, Блайн-Ривен Сухой Лог, Верхне-Селемджинский район, |

В своей работе Ю. П.Ивенсен и Левин В.И. привели в качестве примера минеральные типы и продуктивные ассоциации золото-скарновой формации (таблица 2).

Таблица 2 – Минеральные типы и продуктивные ассоциации золото-скарновой рудной формации [7]

| Минеральный тип | Парагенетическая продуктивная ассоциация | Примеры месторождений |
|---|---|--|
| Пирит-арсенопиритовый | а) Пирит-арсенопиритовая (с дисперсным золотом, леллингитом, халькопиритом или без) б) висмут-теллуридная | Мосриф (Средняя Азия), Лебедское (Горная Шория) Лебедское |
| Магнетитовый | а) кварц-халькопирит-тетрадимитовая б) золото-кварцевая в) теллуридно-(тетрадимит)-халькопиритовая с галенитом и сфалеритом | Калиостровское (Кузнецкий Алатау) То же Лебедское (Горная Шория) |
| Халькопиритовый | а) халькопирит-борнит-висмутовая | Натальевская (Маринская Тайга), Гордон (Тува) |
| Халькозин-халькопирит-борнитовый | а) халькозин-халькопирит-борнитовый с теллуридами Ni, Au, Ag б) пирит-халькопиритовая | Синюхинское (Горный Алтай), Рабинжанское (Средняя Азия) Синюхинское |
| Пирит-халькопирит-шеелитовый | а) галенит-висмут-теллуридная (тетрадимитовая) б) шеелит-сульфидно-(халькопирит-виттихенит, борнит)-кальцитовая | Джилад (Средняя Азия) Кум-Бель(Тянь-Шань) |
| Бессульфидный Халькопирит-пирротинный с платиноидами | а) свободное в скарнах а) халькопирит-(троилит)-платиноидная, с теллуридами Bi, Au б) самородных элементов Bi, Pt, Pd, Cu | Ольгинское (Приморье) Куру-Тегерек, Мосриф (Средняя Азия) Куру-Тегерек |

Главным решением этих вопросов Ивенсен Ю.П. считал изучения геохимии золота. Также Ивенсен Ю.П. коснулся вопроса генезиса рудных формаций, который оставался остро дискуссионным. По этому вопросу его мнение не совпадало с мнением некоторых его коллег. В основном это касается мнений А.В.Коробицына о метаморфическом происхождении оруденения малосульфидной золото-кварцевой формации, Л.Н.Индолева о двухэтапном «гибридном» образовании месторождений золото-антимонитовой формации, А.Т.Хитрунова, Г.Г.Кухтинского и М.Л.Мельцера о рудогенерирующей роли трансмагматических растворов. В 1975г под его руководством и редакцией была издана коллективная (Амузинский В.А., Невоиса Г.Г., Коробицын А.В., Семенов В.П., Сергеенко А.И., Цурбаев Ф.И., Гусев Г.С., Кухтинский Г.Г., Трунилина В.А., Самусиков В.П.) монография «Строение, история развития, магматизм и металлогения северной части Верхоянской складчатой зоны», в которой были освещены актуальные проблемы эндогенной и экзогенной металлоносности Верхоянского хребта и Янского нагорья (включая Куларский район) [7]. Многие вопросы были решены на основе детального изучения литологии верхоянского комплекса, тектонического районирования, петрографического и петрохимического изучения базальтоидных и гранитоидных изверженных пород, новых аналитических данных по магматическим и рудным формациям.

3. Выводы

Ивенсен Ю.П. внес большой вклад в изучении геологии рудных месторождений не только Якутии, но и Средней Азии, Казахстана, Урала и Тимана. Так им кроме упомянутых выше монографий были опубликованы : «Полиметаллические месторождения Средней Азии и Южного Казахстана» (1937, Цветметгиздат); «Опыт изучения морфологии и микроструктуры золота» (1938), «Геологическое строение и рудоносность Западного Верхоянья (1961, Изд-во АН СССР, соавторы А.В.Вихерт, В.Ф.Возин, Е.Г.Прощенко, А.С.Каширцев); «Магматизм Тимана и полуострова Канин» (1964, Наука); «Строение Земной коры Якутии и закономерности размещения полезных ископаемых» (1969, М., Наука, соавторы К.Б.Мокшанцев, Н.В.Черский и др.); «Формационные типы древних золотоносных площадей и методы их поисков» (1969, Наука, соавторы В.И.Левин и С.В.Нужнов). Его работы остаются до сих пор востребованными, не утратили своей актуальности. В 1979г он подготовил рукописный вариант работы «Золоторудные формации и их геологическая позиция», которая, к сожалению, так и осталась неопубликованной.

Кроме непосредственной производственной и научной геологической работы Ю.П.Ивенсен много и успешно занимался подготовкой научных кадров. Среди его учеников 15 человек защитили кандидатские диссертации, многие из которых впоследствии стали докторами наук.

4. Благодарности

Исследование выполнено за счет государственного задания ИГАБМ СО РАН.

5. Литература

- [1] Korobitsyn A.V. Yuri Pavlovich Ivensen - Organizing Director of the Yakutsk Institute of Geological Sciences // Science and Education. – 1997. – P. 211-213.
- [2] Scientists of the Yakut Institute of Geology. – Yakutsk, Sakhapoligraphizdat, 2007. – P. 50.
- [3] Academic science in Yakutia (1949-2009). – Novosibirsk: Academic publishing house "Geo", 2009. – P. 29.
- [4] Yushkin N.P. A romantic with an intellectual mindset // Bulletin of the IG KSC Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2008. – No. 12. – P. 16-19.
- [5] Ivensen V.Yu. Son about father // Bulletin of the IG KSC Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2008. – No. 12. – P.20-21.
- [6] Gold ore formations and geochemistry of gold in the Verkhoyansk-Chukotka folded region. Under the editorship of Ivensen Yu. – M-va: Nauka, 1975. – 336 p.
- [7] Y.P. Ivensen, V.A. Amuzinsky, G.G. Structure, development history, magmatism and metallogeny of the northern part of the Verkhoyansk fold zone. – Novosibirsk: Nauka, 1975. – 320 p.

НОВЫЙ МИНЕРАЛ – АМГАИТ – ПЕРВОЕ ПРИРОДНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ТАЛЛИЯ С ТЕЛЛУРОМ

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

A NEW MINERAL - AMGAITE - THE FIRST NATURAL COMPOUND OF THALLIUM WITH TELLURIUM

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

Annotation. For the first time, a natural compound of thallium with tellurium was found. The discovery of amgaite in the ores of the Khokhoi ore field, along with other Tl minerals, such as avicennite, jankovicit, parapierrrotite, weissbergite, and several as yet unnamed Tl phases, is of great importance for industrial gold mining in the region. The rather peculiar association of gold with Tl minerals must be taken into account when choosing the right technology for extracting gold due to the high toxicity of thallium, on the one hand, and its growing economic value and number of industrial applications, on the other. In this regard, the possible associated extraction of thallium during gold mining is of particular importance.

The study of the interesting and diverse mineralogy of the Khokhoyskoye deposit continues and the discovery of new minerals is quite possible.

1. Введение

Учеными Института геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения РАН Г.С.Анисимовой, Л.А. Кондратьевой и В.Н.Кардашевской совместно с коллегами из Минералогического Музея им А.Е.Ферсмана РАН (А.В.Касаткин), коллегами из Падуанского университета Италии (Ф. Нестола), Института физики, Национального музея и Университета Масарикова из Чехии (Я. Плашил, И. Сейкора, Р. Шкода) и АО «Якутскгеология» (Е.П. Соколов) открыт новый минерал, теллуриат таллия – *амгаит*, Tl_2TeO_6 [1,2]. Найдено первое в мире природное соединение таллия с теллурием.

2. Первое природное соединение теллура с таллием – новый минерал -амгаит

Таллий и теллур являются редкими элементами на Земле. Таллий и его соединения используются в самых разных областях промышленности, таких как высокотемпературные сверхпроводящие материалы, оборудование для обнаружения и передачи гамма- и инфракрасного излучения, акустико-оптические измерительные устройства, фотоэлектрические элементы, магнитно-резонансная томография, производство и передача электроэнергии, изготовление оптических линз с высоким показателем преломления и др. В минералогии и геммологии раствор Клеричи используют в качестве жидкости для измерения плотности минералов и драгоценных камней, а также для разделения минералов погружным методом. Из-за малых объемов добычи теллура спрос на него и цены также растут, а диапазон применения продолжает расширяться: его используют при вулканизации каучука, производстве специальных марок стекол, оптических генераторов, полупроводников и во многих других высокотехнологичных областях.

В свете этого находка теллуриата таллия имеет как научное, так и прикладное значение.

Следует отметить, синтетический аналог амгаита — теллуриат таллия, создан еще в 70-х годах прошлого столетия [3], но в природе он был найден только в наши дни в Якутии.

Минерал был обнаружен на золоторудном месторождении Хохойское, расположенном в 120 км к западу от города Алдана, в верхнем течении ручья Хохой, правого притока реки Амги, в

Алданском районе Республики Саха (Якутия), и назван в честь красавицы реки Амги (рисунок 1).

Из рудных минералов единственным макроминералом Хохойского месторождения является пирит, который всегда преобразован в гетит или гематит. Форма минерала весьма разнообразна – пентагондодекаэдрическая, кубооктаэдрическая, октаэдрическая и кубическая. Размеры зерен варьируют от микронных до крупнокристаллических. Окисленный пирит содержит примесь Sb до 4,6%, а также иногда имеет кайму, обогащенную теллуrom до 3,13%.

Все другие рудные минералы образуют микровключения в пирите и жильных минералах. К ним относятся арсенопирит, галенит, антимонит, халькопирит, борнит, сфалерит, бертьерит, шеелит, касситерит, минералы таллия (вейсбергит, янковицит, парасьерротит), ртути (киноварь, колорадоит), самородное золото и серебро. Гипергенные минералы представлены ярозитом, авиценнитом, амгаитом, смитсонитом, хлораргиритом и бисмоклитом.

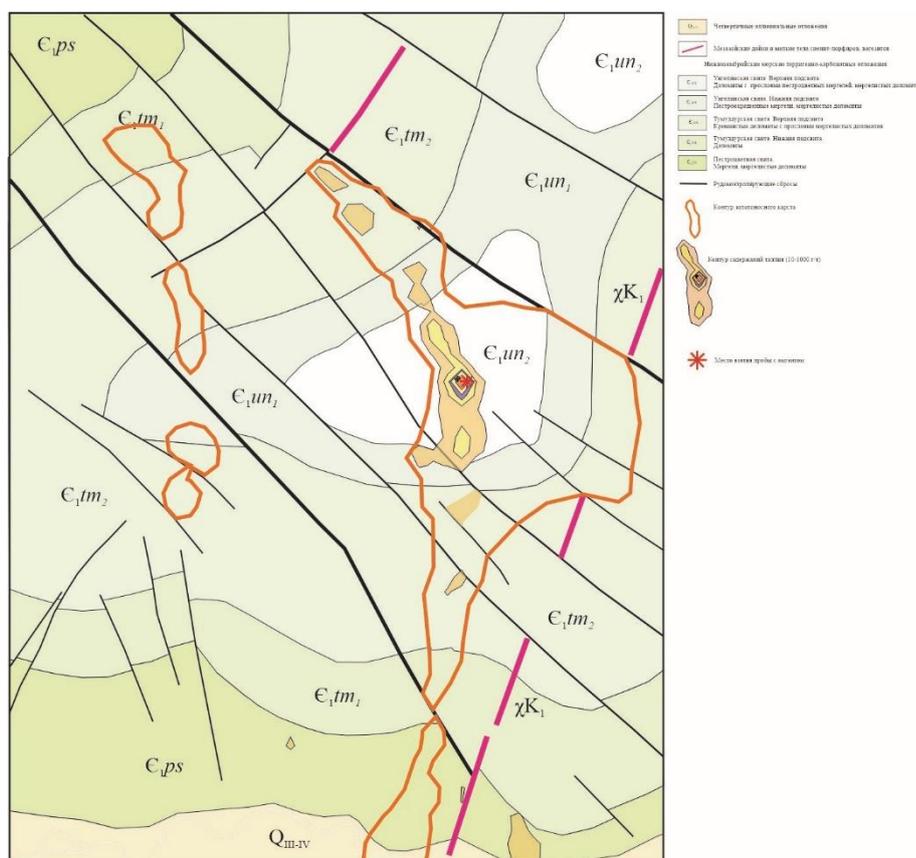


Рисунок 1 – Карта золоторудного месторождения Хохой, где найден новый минерал – амгаит. Составил Е.П.Соколов.

Подавляющее большинство минералов таллия представлено сульфидами и сульфосолями, и только небольшая часть – это оксиды, алюмосиликаты, сульфаты и селениды. Л.Т. Шевыревым [4] дана подробная информация о закономерностях распределения таллия в литосфере Земли, историко-минераграфический анализ таллиеносных объектов. В природе собственные минералы Tl встречаются настолько редко, что о промышленном использовании их в качестве таллиевого сырья не может быть и речи. Собственных месторождений таллий не образует, а извлекается попутно при переработке цинковых, медных и свинцовых руд. Только в некоторых случаях он может являться одним из главных или даже основным извлекаемым компонентом – это месторождения Алшар в Северной Македонии, Ланьмучань, Сянькуан, Зимудань и другие в Китае, Баррейраш в Бразилии [4]. Сейчас отмечается возрастающий интерес к таллию из-за его важности для “новой” высокотехнологичной экономики.

Амгаит найден в сильно лимонитизированных глинисто-песчаных образованиях, содержащих многочисленные обломки первичных руд и вмещающих пород, заполняющих карстовые полости.

Физико-химические свойства амгаита изучены в лабораториях ИГАБМ СО РАН, Минералогического Музея им А.Е.Ферсмана РАН, Падуанского университета Италии, Института физики, Национального музея и Университета Масарикова из Чехии. Теллурат таллия образует мелкозернистые зональные агрегаты размером до 0,05 мм, кристаллизуется в тригональной сингонии (рисунок 1). Цвет минерала от очень темного красновато-коричневого до черного. Твердость (по шкале Мооса): примерно 1,5–2. Хрупкий. Излом раковистый. Рентгенограмма идентична синтетическому аналогу (рисунок 2). Химический состав: MgO 0,43, CaO 1,62, Mn₂O₃ 0,25, Fe₂O₃ 0,16, Tl₂O₃ 66,27, Sb₂O₅ 3,48, TeO₃ 27,31 (таблица 1). Идеальная формула химического соединения – Tl₂TeO₆. Амгаит встречается совместно с самородным золотом и другими минералами таллия: авиценнитом, вейсбергитом, а также с неидентифицированными карбонатами и антимонатами и кварцем (см. рисунок 1).

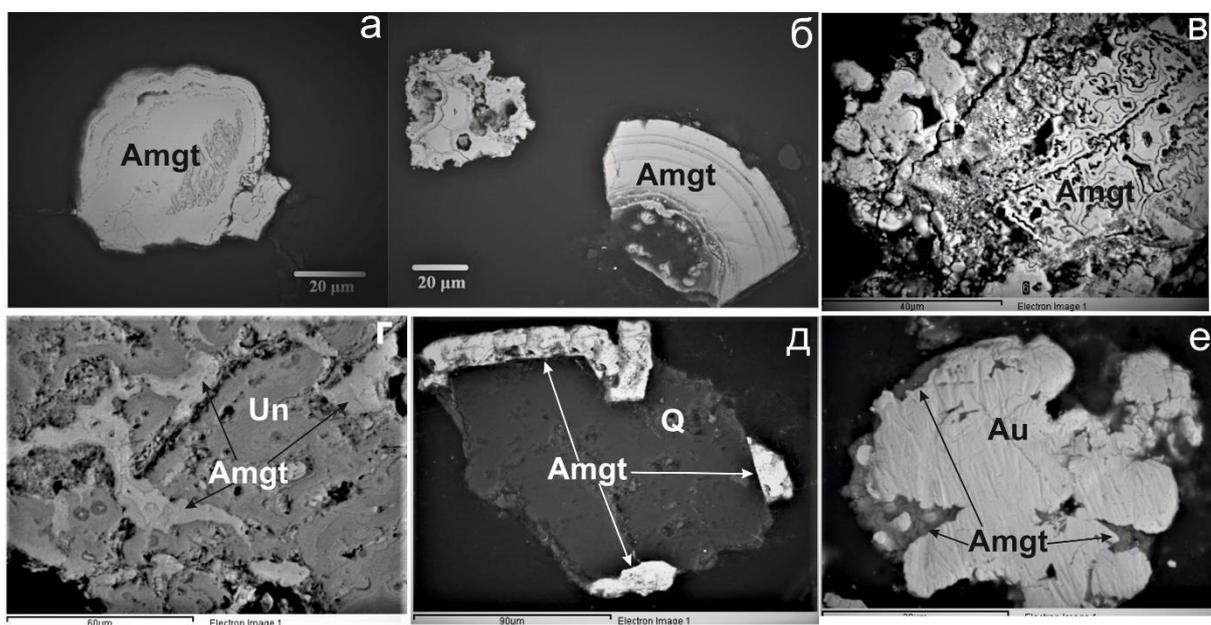


Рисунок 1 – Формы выделения и ассоциации с другими минералами первого природного соединения теллура с таллием – амгаита: а-б – зональные агрегаты, в – ритмично-зональные индивиды, г – прожилки амгаита в неидентифицированном антимонате таллия, д – ободки амгаита вокруг кварца, е – тесная ассоциация самородного золота и амгаита. Amgt – амгаит, Au – самородное золото, Un – неидентифицированный антимонат таллия, Q – кварц.

Таблица 1 – Химический состав амгаита [2]

| Компоненты | Вес.% | Вариации | Стандартное отклонение | Стандарты |
|--------------------------------|-------|-------------|------------------------|--------------|
| MgO | 0.43 | 0.31–0.53 | 0.10 | pyrope |
| CaO | 1.62 | 1.50–1.69 | 0.09 | fluorapatite |
| Mn ₂ O ₃ | 0.25 | 0.18–0.35 | 0.07 | rhodonite |
| Fe ₂ O ₃ | 0.16 | 0.13–0.19 | 0.02 | hematite |
| Tl ₂ O ₃ | 66.27 | 64.68–67.12 | 0.98 | Tl(Br,I) |
| Sb ₂ O ₅ | 3.48 | 2.11–5.74 | 1.51 | Sb |
| TeO ₃ | 27.31 | 26.10–28.87 | 0.97 | HgTe |
| Сумма | 99.52 | | | |

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. Сильное обогащение руд летучим элементом – Тl – происходит именно при калиевом метасоматозе, в зонах разломов [4], что мы и наблюдаем на территории Хохойского рудного поля. Этим можно объяснить появление таллиевых минералов в описываемом рудопроявлении. Кроме амгаита ранее были обнаружены редкие минералы таллия авиценнит и вейсбергит [5,6]. Авиценнит, вероятно, образовался в процессе карстообразования при окислении вейсбергита – минерала первичных руд.

Очень сильные окислительные условия привели к тому, что и Тl, и Те достигли в амгаите своих высших валентных состояний: +3 и +6 соответственно. Амгаит является лишь четвертым минералом, содержащим Тl³⁺ в качестве видоопределяющего элемента, после авиценнита Тl₂O₃, обнаруженного также на Хохойском месторождении, и двух эндемичных минералов из fumarol вулкана Толбачик, также известных своими экстремально окислительными условиями: хризоталлита $K_6Cu_6Tl_3 + Cl_{17}(OH)_4 \cdot H_2O$ [8] и калиталлит $K_3Tl_3 + Cl_6 \cdot 2H_2O$ [9].

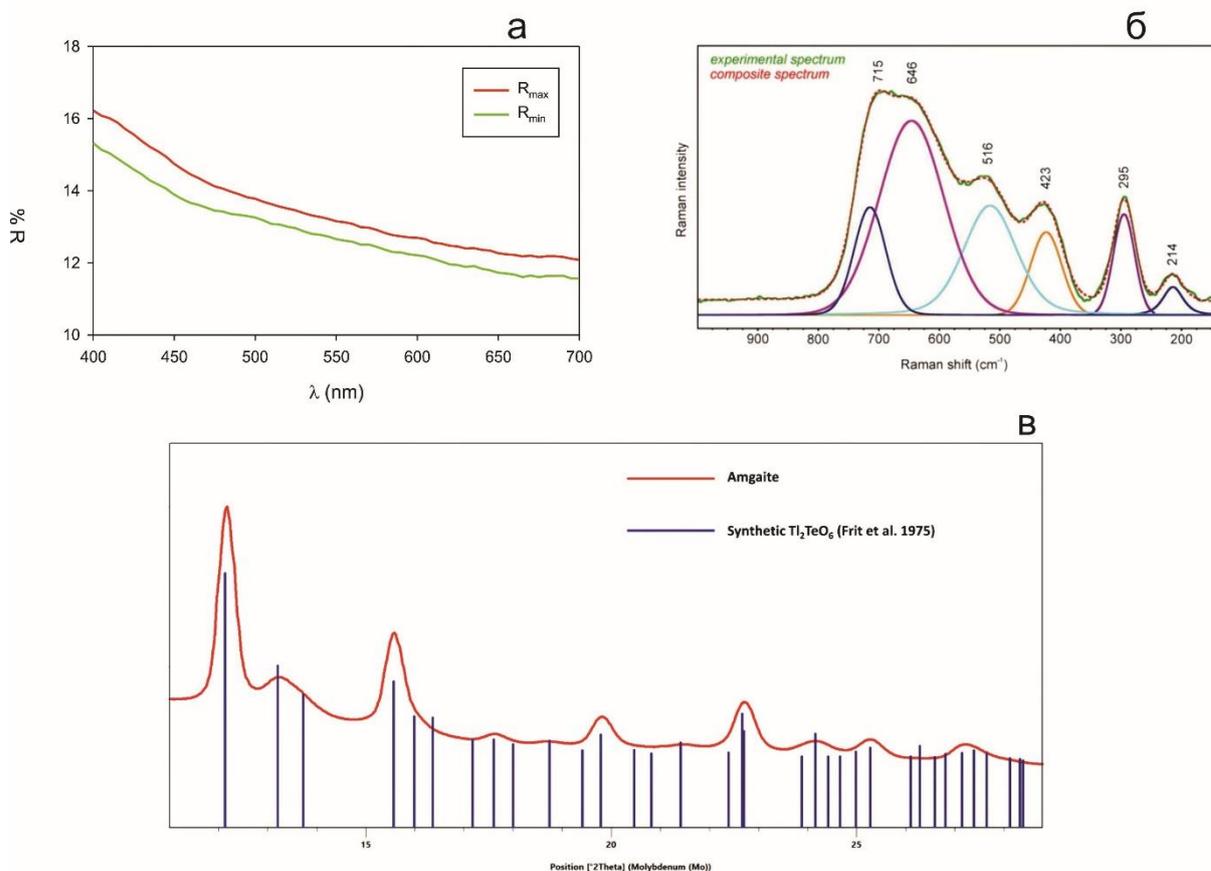


Рисунок 2. Физические параметры амгаита [2]: а – отражательная способность, б – спектры RAMAN, B – сравнение рентгенограммы амгаита и синтетического аналога.

3. Выводы

Таким образом, впервые найдено природное соединение таллия с теллуrom. Обнаружение в рудах Хохойского рудного поля амгаита наряду с другими минералами Тl, такими как авиценнит, янковицит, парапьерротит, вейсбергит и несколькими еще незазванными фазами Тl, имеет важное значение для промышленной добычи золота в регионе. Достаточно своеобразную ассоциацию золота с минералами Тl необходимо учитывать при выборе правильной технологии извлечения золота ввиду высокой токсичности таллия, с одной стороны, и его растущей экономической ценности и числа промышленных применений, с другой. В связи с этим особое значение приобретает возможное попутное извлечение таллия при добыче золота.

В данный момент владельцем лицензионного участка на Хохойском рудном поле выступает ООО «Хохой» — совместное предприятие ПАО «Селигдар» (75%) и подразделения госкорпорации «Росгеология» ООО «РГ Партнёр» (25%). По результатам разведки геологи ранее выявили прогнозные ресурсы Хохойского рудного поля: по категориям P1 и P2 они оцениваются в 6 т золота, по кат. P3 — в 13 т.

Изучение интересной и разнообразной минералогии Хохойского месторождения продолжается и вполне возможны открытия новых минералов.

4. Благодарности

Исследование выполнено за счет государственного задания ИГАБМ СО РАН.

5. Литература

- [1] Kasatkin, A. V., Anisimova, G. S., Nestola, F., Plášil, J., Sejkora, J., Škoda, R., Sokolov, E. P., Kondratieva, L. A., and Kardashevskaya, V. N.: Amgaite, IMA 2021-104, in: CNMNC Newsletter 66 // Eur. J. Mineral. – 2022. – P. 34.
- [2] Kasatkin, Anatoly V., Galina S. Anisimova, Fabrizio Nestola, Jakub Plášil, Jiří Sejkora, Radek Škoda, Evgeniy P. Sokolov, Larisa A. Kondratieva, and Veronika N. Kardashevskaya. () "Amgaite, $Tl_3+2Te_6O_6$, a New Mineral from the Khokhoyskoe Gold Deposit, Eastern Siberia, Russia" // Minerals. – 2022. – 12. – No. 9. – 1064. – URL: <https://doi.org/10.3390/min12091064>
- [3] Frit, B.; Pressigout, R.; Mercurio, D. (1975) Synthèse et étude structurale du tellurate (VI) de thallium (III) Tl_2TeO_6 // Mater. Res. Bull. – 10. – P. 1305–1312.
- [4] Shevyrev L.T. Regularities in the volatile elements distributions within the surficial envelope of Earth: probable historical-mineragenic interpretation // Proc. VSU. Geology. – 2015. – N 3. – P. 5-16 (in Russian).
- [5] Anisimova, G.S.; Kondratieva, L.A.; Kardashevskaya, V.N. Weissbergite ($TlSb_2S_2$) and avicennite (Tl_2O_3) -rare thallium minerals. The first finds in Yakutia // Zap. Ross. Miner. Obs. – 2021. – 2. – P. 18-27
- [6] G.S. Anisimova, L.A. Kondratieva and V.N. Kardashevskaya Weissbergite ($TlSb_2S_2$) and Avicennite (Tl_2O_3), Rare Thallium Minerals: First Findings in Yakutia // Geology of Ore Deposits. – 2022. – Vol. 64. – No. 7. – P. 424-431.
- [7] 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, 2022. – P. 184-188.
- [8] Pekov, I.V.; Zubkova, N.V.; Belakovskiy, D.I.; Yapaskurt, V.O.; Vigasina, M.F.; Lykova, I.S.; Sidorov, E.G.; Pushcharovsky, D.Y. Chrysothallite $K_6Cu_6Tl_3+Cl_{17}(OH)_4 \cdot H_2O$, a new mineral species from the Tolbachik volcano // Miner. Mag. – Kamchatka, 2015. – 79. – P. 365-376.
- [9] Pekov, I.V.; Krzhizhanovskaya, M.G.; Yapaskurt, V.O.; Belakovskiy, D.I.; Sidorov, E.G. Kalithallite, IMA 2017-044. CNMNC Newsletter No. 39, October 2017, page 1280 // Miner. Mag. – 2017. – 81. – P. 1279-1286

О КИМБЕРЛИТОВОМ МАГМАТИЗМЕ В ПРЕДЕЛАХ ТУНГУССКОЙ СИНЕКЛИЗЫ

Валентин Афанасьев¹, Николай Похиленко¹, Людмила Похиленко¹, Николай Попов²

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

2 ФГБУН «Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука»,
630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3/4

ON KIMBERLITE MAGMATISM WITHIN THE TUNGUSKA SYNECLISE

Valentin Afanasiev¹, Nikolai Pokhilenko¹, Luydmila Pokhilenko¹, Nikolai Popov²

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

2 Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics SB RAS,
3/4, Akademika Koptyug ave., Novosibirsk, 630090, Russia

Annotation. The article describes the indicator minerals of kimberlites from the tuffs of the Tunguska syncline. Two types of them are distinguished: one corresponds to the eluvium of kimberlite, the second has "signs of antiquity" corresponding to kimberlite minerals from the Upper Paleozoic reservoirs associated with the Middle Paleozoic kimberlites. Most likely, the minerals of the first type are associated with the local Late Jurassic kimberlite body that cuts through the rocks of the trap formation of the Tunguska syncline, the minerals of the second type are captured from an intermediate sedimentary reservoir, probably of the Upper Paleozoic age. Thus, there is reason to assume the existence of Mesozoic kimberlite bodies intruding the rocks of the trap formation of the Tunguska syncline, as well as the existence of Middle Paleozoic kimberlite bodies, including diamond-bearing ones, under the syncline traps.

1. Введение

Надежные признаки существования кимберлитовых тел, прорывающих породы трапповой формации Тунгусской синеклизы, а также погребенных под ними, установлены в бассейне реки Сивикагна.

Присутствие индикаторных минералов кимберлитов (пироба, хромдиоксида, хромшпинелида) было установлено в 1977-1980 гг в процессе геологической съемки масштаба 1:50000 на восточном борту Тунгусской синеклизы в бассейне реки Большая Сивикагна - правого притока реки Верхняя Кочема в туфовых породах нижнего триаса (Рисунок 1). В последующие годы для наработки минералогического материала и выяснения природы кимберлитовых минералов в туфах Сивикагны Ботубинская ГРЭ АК «АЛРОСА» проводила буровые работы, которые позволили значительно продвинуться в понимании данной ситуации.

Нашими предыдущими исследованиями установлено, что в комплексе индикаторных минералов присутствуют две их группы: а) минералы без признаков механического износа и физико-химических изменений, по своему состоянию соответствующие индикаторным минералам из элювия кимберлитов; б) с признаками экзогенных изменений - механического износа разной степени и гипергенных изменений [1, 2]. Вторая группа индикаторных минералов захвачена наиболее вероятно из верхнепалеозойского промежуточного коллектора под породами трапповой формации. Происхождение первой группы осталось не выясненным: с одной стороны, эти минералы не имеют ни малейших признаков экзогенных изменений и по своему состоянию соответствуют элювию кимберлита, но при этом находятся в смеси с окатанными и выветрелыми минералами, с другой – все они вместе содержатся в базальтовых туфах.

Однако в последнее время расширение наших знаний по глубинному минерогенезу и некоторым особенностям формирования мезозойских кимберлитовых тел позволили

сформулировать более определенные представления о природе индикаторных минералов в туфах.

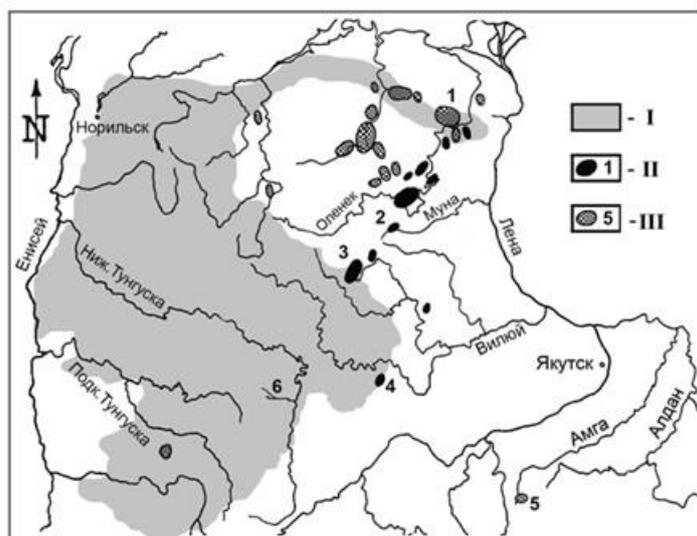


Рисунок 1 – Обзорная карта Сибирской платформы: I – мезозойский вулканогенно-осадочный комплекс, включающий породы трапповой формации и послетрапповые осадочные образования; II – кимберлитовые поля среднепалеозойского возраста; III – кимберлитовые поля мезозойского возраста. 1 – Беенчиме-Куойкское поле, 2 – Верхнемунское поле, 3 – Далдыно-Алакитский алмазоносный район, 4 – Мирнинское поле, 5 – Чомполинское поле (дайка Алданская), 6 – р. Сивикагна.

2. Результаты исследований

Площадь распространения “пироподносных” туфов располагается в пределах Сивикагнинской вулканогенно-осадочной структуры (ВТС) [1]. Эта структура расположена в поле сплошного развития туфовых отложений нижнего триаса и представляет собой кальдеру проседания, выполненную мощной (более 500 м) толщей вулканогенных образований нижней подсвиты корвунчанской свиты. “Пироподносные” туфы по имеющимся данным залегают субгоризонтально и имеют площадное распространение внутри ВТС. Их мощность в центральной части ВТС достигает 190 м.

Нами изучены минералы по 80 пробам из скважин, а также шурфов по поверхности туфов и из аллювия реки Сивикагна. Индикаторные минералы кимберлитов прослежены по скважинам в переменных количествах до глубины 190 м, однако максимальное количество проб с этими минералами приурочено к близповерхностным горизонтам (0-10 м) (Рисунок 2).

Как отмечено выше, кимберлитовые минералы из туфов делятся на две группы.

В одной из них, доминирующей, присутствуют индикаторные минералы (пироп, пикроильменит, хромшпинелид, хромдиопсид, флогопит), по своему состоянию полностью соответствующие минералам из элювия кимберлитов [3]. Преобладает пироп. Гранулометрический диапазон минералов широкий – от 4 мм до 0,2-0,5 мм. Пиропы преимущественно фиолетового цвета, на некоторых них сохранились фрагменты келифитовой каймы, большинство зерен имеет постмагматическую коррозионную трещиноватость с вторичными продуктами по трещинам. Встречены сростки пироба с хромдиопсидом, характерные для кимберлитов и представляющие собой микроксенолиты. Пикроильменит представлен овальными зернами и их обломками с микропирамидальным рельефом на овальной (“первичной”) поверхности. Хромдиопсид ярко- и светлозеленый, неправильной формы, иногда со следами постмагматического растворения (копьевидная зубчатость). Хромшпинелид обычный для кимберлитов, представлен октаэдрами, октаэдрами с вичиналями, мириоэдрическими кристаллами, в большинстве случаев с признаками магматической коррозии. Флогопит хлоритизированный, присутствует в форме чешуек и пачек.

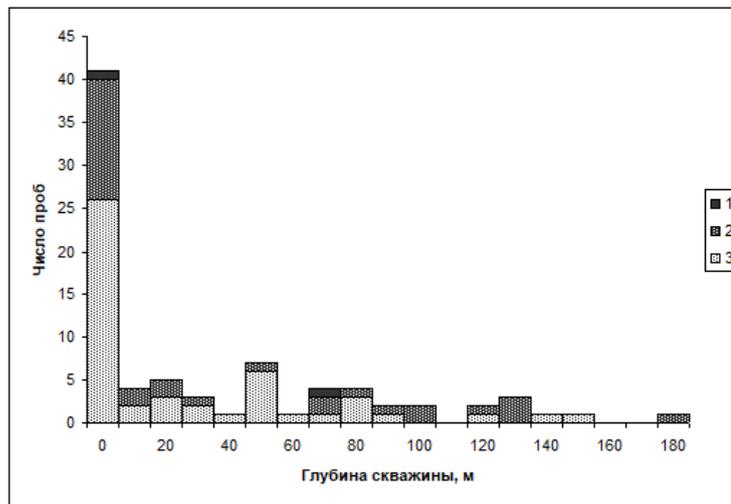


Рисунок 2 – Сводная диаграмма распределения индикаторных минералов с разной степенью экзогенной эволюции: 1 – индикаторные минералы с сильным износом из промежуточного коллектора; 2 – индикаторные минералы со слабым и средним износом из промежуточного коллектора; 3 – «свежие» индикаторные минералы, возможно непосредственно из кимберлита. Общее количество проб – 80.

Минералы в таком состоянии встречаются в элювии кимберлитового тела, либо в ближайшем законтурном пространстве, на них нет ни малейших признаков экзогенных изменений, связанных с формированием ореолов механического рассеяния.

Распределение минералов данной группы по площади крайне неравномерное, преимущественно это единичные знаки, однако в некоторых пробах по поверхности туфов их концентрация достигает 500 зн. на 10-литровую пробу.

Но наряду со «свежими» минералами в скважинах и по поверхности туфов встречаются немногочисленные пиропы и пикроильмениты, типичные для ореолов индикаторных минералов в верхнепалеозойских отложениях Якутии, т.е. с признаками механического износа и гипергенной коррозии. Эта ассоциация в свою очередь делится на две группы. В одну входят пиропы и пикроильмениты со слабой – средней степенью износа и гипергенной коррозией, соответствующие ореолам регрессивного прибрежно-морского литодинамического типа, во вторую – только пиропы с сильным износом, соответствующие трансгрессивному прибрежно-морскому типу [3].

Закономерностей распределения ассоциаций по скважинам с глубиной не отмечается, первая ассоциация преобладает по количеству проб и зерен минералов (Рисунок 2).

По химическому составу изученные минералы соответствуют кимберлитовым. Все проанализированные гранаты являются магнезиальными с широкими вариациями содержания хрома (Рисунок 3). Два граната из руслового аллювия реки Сивикагна показали составы, соответствующие гранатам алмазной ассоциации [4].

Большинство гранатов формирует плотное вытянутое облако, пересекающее верхнюю границу лерцолитового поля. Такое распределение составов пиропов характерно для мезозойских неалмазоносных кимберлитов типа трубки Муза и других на северо-востоке Якутии. Однако на той же диаграмме выделяются составы пиропов, полностью соответствующие среднепалеозойским кимберлитам, в том числе два пиропы алмазной ассоциации. На диаграмме разделены пиропы предположительно мезозойского типа и достоверно среднепалеозойского; первые составляют около 63%, что соответствует доле «свежих» минералов в поверхностных пробах, показанных на рис. 2. Минералы второй группы могли поступать в вулканогенно-осадочные породы только путем захвата из более древнего, скорее всего верхнепалеозойского коллектора, поэтому возраст их коренных источников среднепалеозойский.

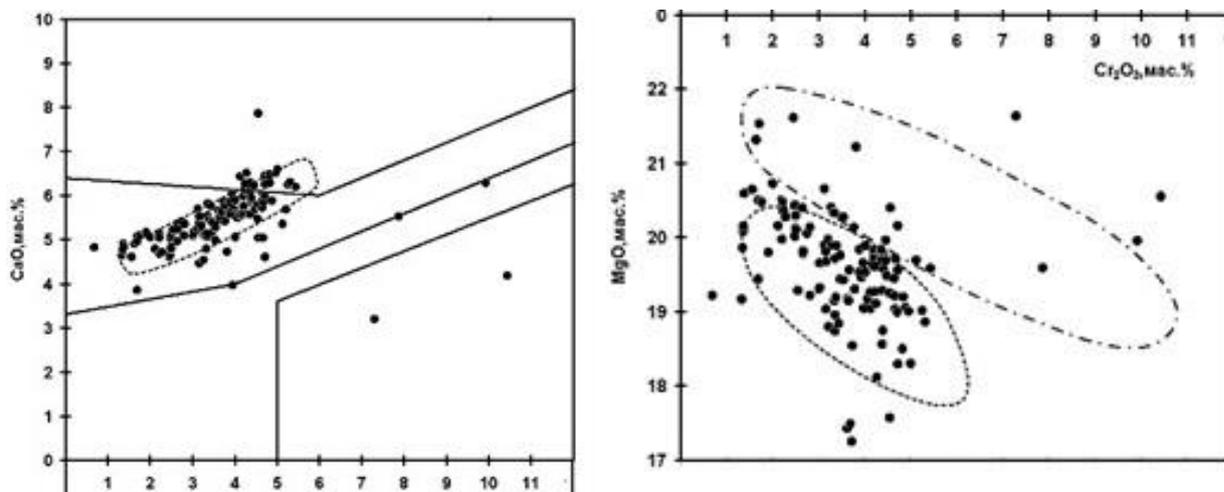


Рисунок 3 – Диаграмма составов гранатов из аллювия реки Сивикагна. Пунктиром обозначено поле пиропов, соответствующих мезозойским кимберлитам; штрихпунктирной линией обозначено поле пиропов из среднепалеозойских кимберлитов.

3. Обсуждение результатов исследований

Наибольшие затруднения вызывает вопрос об источниках и путях поступления в туфы глубинных минералов первой группы. Их «свежесть», преимущественная распространенность по поверхности туфовой толщи и соответствие по составу пиропам мезозойских кимберлитов позволяет предполагать наличие здесь мезозойских кимберлитовых трубок, прорывающих туфы. Однако непонятно, как эти минералы могли попасть в разрез туфов; один из возможных вариантов – инъецирование туфов кимберлитовым материалом, в результате чего кимберлит не имеет характерных для него физиографических признаков и петрохимически не выделяется контрастно на фоне состава туфа. Аналогично кимберлит кратерных частей трубок Архангельской провинции настолько перемешан с материалом вмещающих вендских песчаников, что сам выглядит как песчаник.

Таким образом, индикаторные минералы кимберлитов в нижнетриасовых туфах корвунчанской свиты представляют собой смесь двух ассоциаций. Одна, минералы которой имеют признаки гипергенных изменений и окатанности разной степени, происходит из среднепалеозойских кимберлитов и была захвачена из верхнепалеозойского промежуточного коллектора; присутствие гранатов алмазной ассоциации свидетельствует о потенциальной алмазности их коренных источников. Вторая ассоциация представлена исключительно «свежими» кимберлитовыми минералами, состояние которых соответствует элювию кимберлитов; составы гранатов этой ассоциации характерны для мезозойских кимберлитов.

Можно предположить, что туфы инъецированы мезозойским (возможно позднеюрским) кимберлитом, несущим как собственные индикаторные минералы, так и минералы, захваченные из верхнепалеозойского коллектора. Аналогичная ситуация описана нами для Енболакской площади на северной части Чадобецкого поднятия, где мезозойские кимберлиты контаминированы индикаторными минералами и алмазами из среднекарбонного коллектора, аналогичного Тарыдакскому, на южной части Тычанской алмазоносной площади в Красноярском крае.

Подтверждение этой гипотезы получено нами в 2022 году. В. П. Губарева, работавшая на этой территории в 1990-1991 гг., передала нам два образца, найденные на поверхности туфовой толщи данной территории ее мужем, И. Веденьковым, и сохранившиеся в домашней коллекции. Один образец представляет собой обломок кимберлита (он описан здесь в тезисе «Мантийные ксенолиты из обломка кимберлита, найденного в районе реки Сивикагна»), второй представляет собой обломок метаморфической породы – офиолита.

К сожалению, в связи с окончанием работ на Сивикагнинской площади образцы не вызвали интереса и данная интерпретация впервые дана нами.

4. Заключение

Выше изложенное позволяет предполагать, что в пределах Тунгусской синеклизы существуют неалмазные кимберлитовые тела, вероятно позднеюрского возраста, прорывающие породы трапповой формации. Одновременно получены надежные свидетельства того, что под породами трапповой формации погребены среднепалеозойские кимберлитовые тела, весьма вероятно алмазные. Эти данные дают новое понимание алмазной минерализации в пределах Тунгусской синеклизы.

5. Литература

- [1] Afanasiev V.P., Zinchuk N.N., Safyannikov V.I., Antipin I.I., Yanygin Yu.T. On the nature of kimberlite indicator minerals in Triassic tuffs of the Tunguska syncline. – *Ores and metals*, 1999. – No. 6. – P.58-63.
- [2] Afanasiev V.P., Tyshkov N. S., Pokhilenko N. P., and Yu. On the nature of kimberlite indicator minerals in Triassic tuffs of the Tunguska syncline, *Dokl. RAN*. – 2010. – Т. 435. – No. 4. – P. 501-505
- [3] Afanasiev V.P., Zinchuk N.N., Pokhilenko N.P. Morphology and morphogenesis of kimberlite indicator minerals. – Novosibirsk: Branch "Geo" Ed. SO RAN, 2001. – 276 p.
- [4] Sobolev N.V. On mineralogical criteria of diamond content // *Russ. Geol. and Geophys.*, 1971. – N 3. – P. 70-80.

ВКЛЮЧЕНИЯ ХРОМШПИНЕЛИДОВ В МАКРОКРИСТАЛЛАХ ФЛОГОПИТА ИЗ КИМБЕРЛИТОВ АН-195 (ЗАПАДНО-УКУКИТСКОЕ ПОЛЕ)

Светлана Бабушкина

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

INCLUSIONS OF CHROMSPINELIDES IN MACROCRYSTALS OF PHLOGOPITE FROM KIMBERLITES AN-195 (WEST UKUKIT FIELD)

Svetlana Babushkina

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

Annotation. The results of the study of inclusions of chromspinelides from macrocrystals of phlogopite of the kimberlite body An-195 of the West Ukukit field of the Yakut kimberlite province are presented. Based on a comparative analysis of the studied chromspinelides with the composition of analogues from various parageneses of this mineral from mantle xenoliths, inclusions in garnets, and accretions with garnets and pyroxenes, it is concluded that inclusions in phlogopite are representatives of cataclysmic dunites and products of their recrystallization under the influence of high-temperature mantle fluid.

1. Введение

Макрокристаллы флогопита некоторых трубок Якутской кимберлитовой провинции содержат включения ряда мантийных минералов, являющихся ксеногенными или сингенетичными по отношению к минералу-хозяину. В то же время и сам флогопит может быть ксенокristным и фенокristным. Соотношение общего количества зерен флогопита с количеством флогопитов с кристаллическими включениями примерно составляет 2,5:1. По нашим данным наибольшим распространением в качестве кристаллических включений во флогопите пользуются шпинелиды различного генезиса [1–3]. Помимо включений только шпинелидов в отдельных зернах флогопита (например, из тр. Мир) были отмечены включения шпинель + гранат, шпинель + диопсид + амфибол, ильменит + шпинель, ильменит + шпинель + амфибол, шпинель + диопсид. А в тр. Юбилейная – шпинель + гранат и шпинель + ильменит.

Ан-195 расположена в южной части Западно-Укукитского поля Якутской кимберлитовой провинции в составе Среднеоленинского алмазоносного района. Здесь же (примерно в 40 км выше по течению р. Укукит) находятся две трубки Светлана и Лорик (Рисунок 1), ранее относимые к убогоалмазоносным. В результате проведенного дополнительного изучения петрографо-минералогических особенностей кимберлитов этих трубок было установлено, что требуется переопробование данных кимберлитов для переоценки их алмазоносности [4]. По данным полевых работ 1989 года аномалия представлена тремя телами, выполненными интрузивным кимберлитом и кимберлитовой брекчией с автолитовой текстурой.

Монофракция макрокристаллов флогопита (класс -1+0,5) была отобрана из протолочной пробы кимберлитов, затем заложена в эпоксидную шашку, отполирована и напылена. Исследование состава слюды и включений хромшпинелидов проводилось в ИГАБМ СО РАН по стандартной методике на микронзонде Camebax-micro и сканирующем электронном микроскопе JSM6480LV с энергетическим спектрометром INCA-Energy 350 при напряжении на катоде 20 кВ и токе электронов 1 нА.

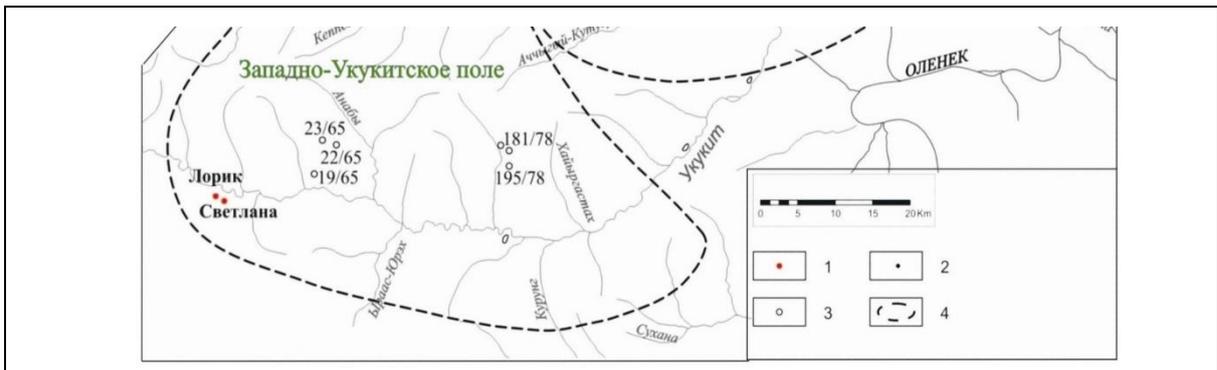


Рисунок 1 – Схема южной части Западно-Укукитского поля: 1– убогоалмазные трубки; 2 – геофизические аномалии трубчатого типа; 3 – кимберлитовые трубки и дайки; 4 – предполагаемые границы кимберлитовых полей.

2. Результаты исследований

Было изучено 54 зерна макрокристаллов флогопита, из которых в 13-ти диагностированы включения хромшпинелидов. Флогопиты имеют овальную (бочонковидную) или таблитчатую форму (Рисунок 2). Овальные зерна проявляют зональность. Но в данной работе на составе флогопита мы останавливаться не будем.

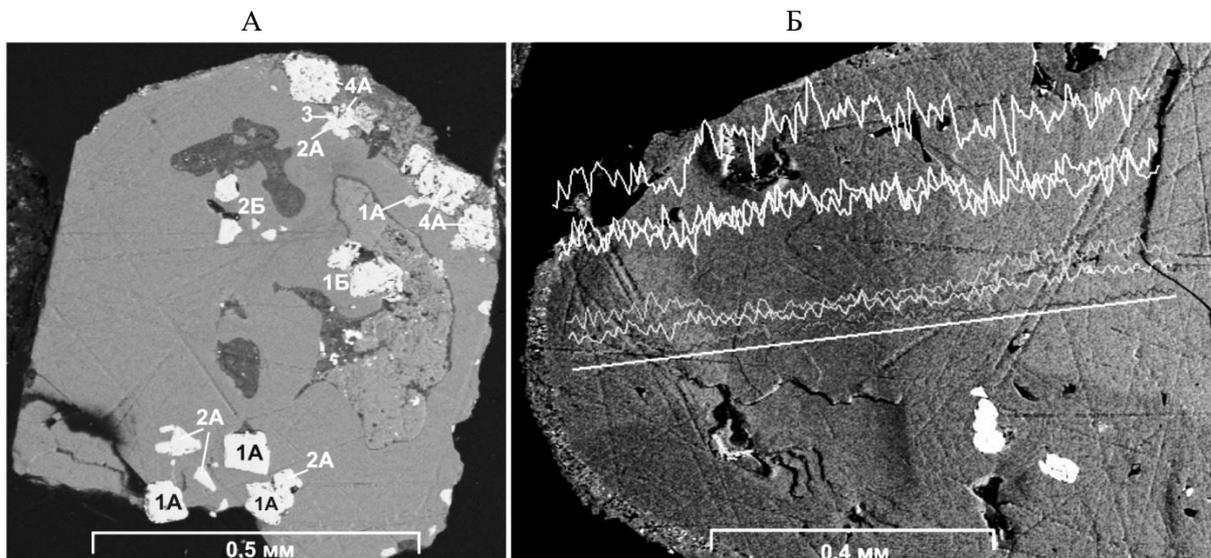


Рисунок 2 – Формы выделения флогопитов в кимберлитах Ан-195 Западно-Укукитского поля: А – таблитчатое (гомогенное), Б – овальное (зональное).

Цифрами обозначены генерации шпинелидов (пояснения в тексте).

Форма включений шпинелидов разнообразная, чаще неправильная, и не зависит от их состава и размера. Встречаются субидiomорфные кристаллы. Отмечаются одиночные, парные или множественные включения. В одном зерне можно наблюдать включения нескольких генераций (Рисунок 2А). Их размер не превышает 0,1x0,1 мм. Чаще всего включения хромшпинелидов приурочены к центральной части макрокристаллов флогопита (29 зерен), отмечаются в промежуточных (12 зерен) и близкраевых частях (8 зерен). По краям 13-ти макрокристаллов диагностированы ферришпинели (генерации 4 и 5 на Рисунке 3), состав которых идентичен ферришпинелиям из основной массы кимберлита и в данной работе не обсуждается.

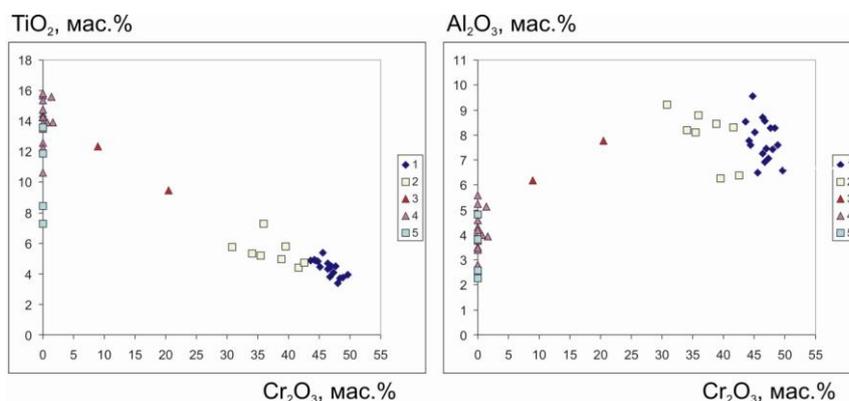


Рисунок 3 – Зависимость содержаний TiO_2 и Al_2O_3 от Cr_2O_3 в составе шпинелидов из кимберлитов Ан-195 Западно-Укукитского поля. Номера в условных обозначениях соответствуют выделенным генерациям (описание в тексте).

В результате микрозондового изучения установлено, что содержания главных компонентов их состава варьирует в следующих пределах (в мас.%): 8,84 – 49,66 Cr_2O_3 ; 3,37 – 12,33 TiO_2 ; 6,17 – 9,54 Al_2O_3 ; 8,89 – 13,79 MgO ; 8,43 – 37,45 Fe_2O_3 и 16,86 – 27,77 FeO . Существенных примесей других компонентов выявлено не было. Анализ компонентных диаграмм $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Cr}_2\text{O}_3$ и $\text{TiO}_2 - \text{Cr}_2\text{O}_3$ [5] позволил выделить 3 основных генерации изученных хром- и хромистых шпинелидов. Третья группа представлена всего двумя анализами реакционных кайм на границе хромшпинелидов, включенных в слюду, с кимберлитом-цементом, содержит в составе минимальные содержания Cr_2O_3 (8,84 и 20,48 мас.%). По этой причине на ней мы тоже останавливаться пока не будем.

При детальном рассмотрении форм выделений хромшпинелидов было замечено, что встречаются сростки кристаллов 1 и 2 генераций (Рисунок 4). Так, менее алюминиевое зерно 1 генерации образует сросток с менее алюминиевым зерном 2 генерации, а более алюминиевое зерно 1 генерации – с более алюминиевым зерном 2 генерации.

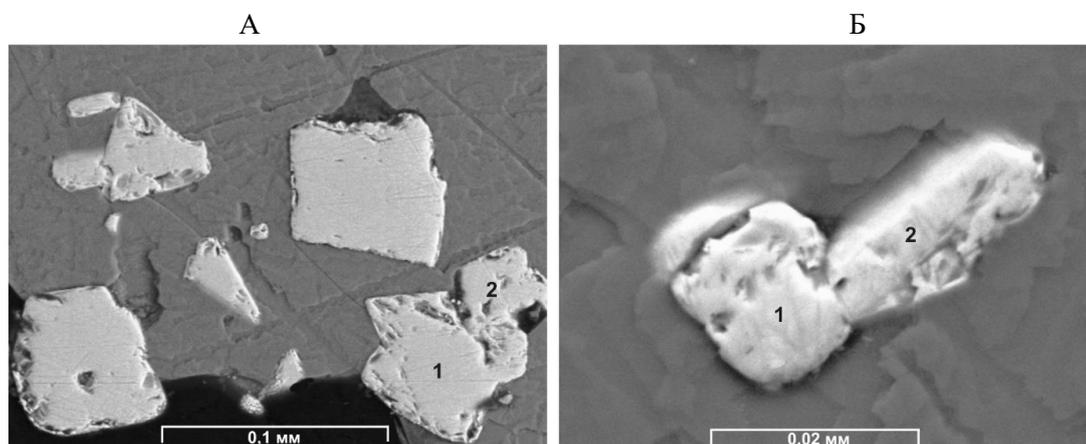


Рисунок 4 – Сростки шпинелидов двух генераций в разных макрокристаллах флогопита: А – менее алюминиевые, Б – более алюминиевые.

На основании этой закономерности мы выделили в каждой из двух генераций типы А и Б соответственно. На Рисунке 2 видно, что генерации 1А–2А и 1Б–2Б пространственно тяготеют к разным зонам минерала-хозяина: центральной и промежуточной. Средний химический и минеральный состав выделенных генераций хромшпинелидов приведен в Таблице.

В ряду генераций 1А–2А, 1Б–2Б, 1А–1Б и 2А–2Б в составе изученных шпинелидов происходит увеличение количества Mg-ульвошпинели на фоне уменьшения магнезиохромита и хромита. В хромитах генераций 1А и 2А по сравнению с хромитами генераций 1Б и 2Б повышено количество шпинелевого минала.

Таблица – Средние химический и минеральный составы различных генераций включений хромшпинелидов в макрокристаллах флогопита из кимберлитов Ан-195 Западно-Укукитского поля.

| Компонент, мас.% | Генерация хромшпинелидов | | | |
|----------------------------------|--------------------------|----------|-----------|-----------|
| | 1А (n=17) | 2А (n=5) | 1Б (n=13) | 2Б (n=13) |
| TiO ₂ | 4,26 | 5,25 | 4,47 | 5,50 |
| Al ₂ O ₃ | 7,10 | 6,32 | 8,37 | 8,51 |
| Cr ₂ O ₃ | 47,43 | 41,05 | 45,69 | 36,11 |
| FeOtotal | 30,51 | 36,38 | 29,96 | 37,74 |
| MgO | 10,57 | 10,16 | 10,98 | 11,52 |
| Сумма | 99,87 | 99,16 | 99,48 | 99,37 |
| <i>Миналы:</i> | | | | |
| MgAl ₂ O ₄ | 13,89 | 12,50 | 16,30 | 16,46 |
| Mg ₂ TiO ₄ | 10,65 | 13,26 | 11,13 | 13,56 |
| MgCr ₂ O ₄ | 17,16 | 11,84 | 15,52 | 12,76 |
| FeCr ₂ O ₄ | 45,13 | 42,63 | 44,21 | 34,16 |
| Fe ₃ O ₄ | 13,16 | 19,77 | 12,84 | 23,07 |

3. Обсуждение и заключение

По своему химическому составу изученные хромшпинели не принадлежат к породам ни алмаз-хромпироповой, ни коэситовой, ни гроспидитовой, ни шпинель-пироповой и шпинель-пироксеновой фаций [5]. Наибольшее сходство они проявляют с хромшпинелидами из пород фации катаклазированных дунитов. Для сравнительного анализа мы нанесли на диаграммы точки состава хромшпинелидов из сростков с гранатом и пироксеном, из зональных гранатов, из зональных гранатов с ильменитом из тр. Мир [5, 6]; включения хромшпинелида в гранате из катаклазированного дунита из тр. Удачная и хромшпинелидов из шпинель-гранатовых катаклазированных дунитов из тр. Удачная и Айхал [7].

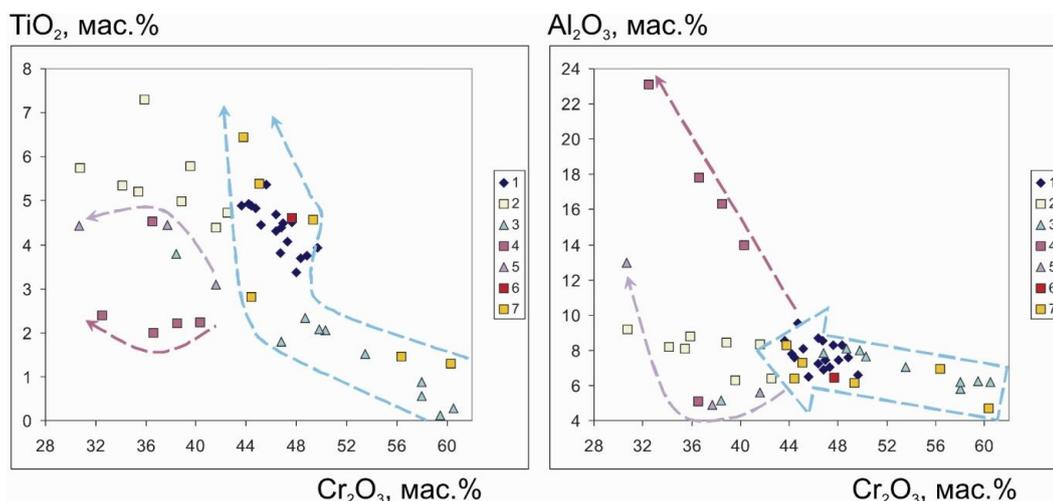


Рисунок 5 – Зависимость содержаний TiO₂ и Al₂O₃ от Cr₂O₃ в составе шпинелидов из: 1, 2 – кимберлитов Ан-195 Западно-Укукитского поля (наши данные); 3 – сростков с гранатом и пироксеном, 4 – из зональных гранатов, 5 – из зональных гранатов с ильменитом из тр. Мир [5, 6]; 6 – включения хромшпинелида в гранате из катаклазированного дунита из тр. Удачная, 7 – хромшпинелидов из шпинель-гранатовых катаклазированных дунитов из тр. Удачная и Айхал [7]. Разноцветные стрелки – тренды изменения состава хромшпинелидов [8, 9] 3 – 7 групп (см. условные обозначения).

Видно, что кристаллизация хромшпинелидов из шпинель-гранатовых катаклазированных дунитов и из гранат-пироксеновых сростков начинается в одних высокотемпературных условиях.

По мере кристаллизации в их составе на фоне снижения содержания Cr_2O_3 идёт незначительное увеличение TiO_2 и Al_2O_3 . При значениях Cr_2O_3 44 – 48 мас.% направление тренда изменяется: хромшпинелиды резко обогащаются титаном (Рисунок 5), в их составе увеличивается количество Fe^{3+} (Рисунок 6А), между магниальностью и отношением $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ отмечается положительная корреляция (Рисунок 6Б).

Все эти изменения, вероятно, связаны с проявлением катаклаза и перекристаллизацией равномернозернистых мантийных перидотитов с одновременным воздействием высокотемпературных флюидов. В результате этих процессов, как отмечалось ранее [5–10], возникли катаклазированные породы с гранат-пироксен-хромшпинелевыми сростками, зональные гранаты с включениями хромшпинелидов, которые являются продуктами дезинтеграции этих катаклазированных перидотитов [6]. Чем больше в кимберлитах содержится минералов из этих катаклазированных пород, тем меньше вероятность алмазности тел.

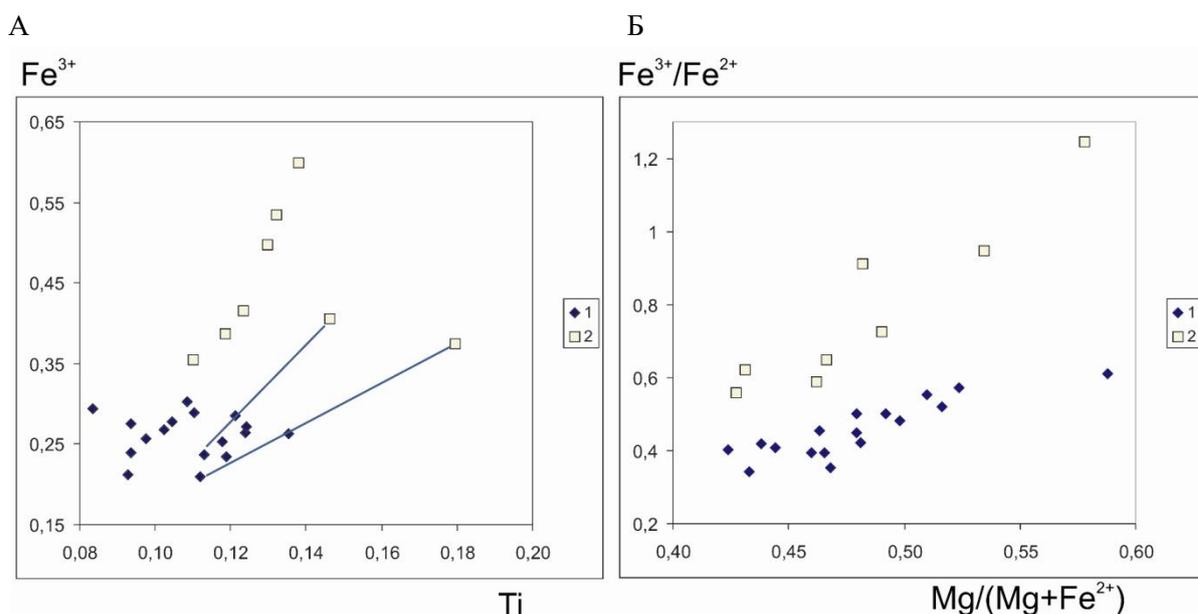


Рисунок 6 – Зависимости количества Fe^{3+} и Ti , и отношений $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ – $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$ в составе хромшпинелидов из Ан-195 Западно-Укукитского поля: 1 – 1 генерация, 2 – 2 генерация. Линиями соединены точки состава сростков шпинелидов.

Таким образом, изучение состава хромшпинелидов, включенных в макрокристаллы флогопита из кимберлитов Ан-195, показало, что они, вероятнее всего, могли входить в состав катаклазированных дунитов. Воздействие высокотемпературного флюида на первоначальный субстрат привело к перекристаллизации и смене первой генерации хромшпинелидов на вторую с соответствующим изменением их состава. Наличие подобных хромшпинелидов в теле Ан-195 может служить признаком отсутствия в нем алмазов.

4. Благодарности

Работа выполнена по государственному заданию ИГАБМ СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект НИР 0381-2019-0003.

5. Литература

[1] Babushkina, S.A., Marshintsev, V.K. Composition of spinel, ilmenite, garnet and diopside inclusions in phlogopite macrocrystals from kimberlites tr. Mir // *Geology and Geophysics*, 1997. – vol. 38 (2). – P. 440-450.

- [2] Babushkina S.A. Inclusions of spinelides and ilmenites in phlogopites of the Malokuonapskaya tube // Problems of magmatic and metamorphic petrology, geodynamics and the origin of diamonds. Abstracts of reports of the International Conference dedicated to the 110th anniversary of the birth of Academician V.S. Sobolev. – 2018. – P. 12.
- [3] Babushkina S.A. New data on the composition of phlogopite macrocrystals from the Jubilee tube // Bulletin of the North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov. Series: Earth Sciences. – 2019. – No. 4 (16). – P. 41-46.
- [4] Kornilova, V.P., Spezius, Z.V., Pomazansky, B.S. Petrographic-mineralogical features of the expediency of revaluation of diamond bearing kimberlite pipes Lorik and Svetlana (Zapadno-Ukukitskoye field, Yakutia) // Regional geology and metallogeny. – 2016. – No. 68. – P. 92-99.
- [5] Sobolev N.V. Deep inclusions in kimberlites and the problem of the composition of the upper mantle. – Novosibirsk: Nauka, 1974. – 264 p.
- [6] Sobolev, N.V., Kharkiv, A.D., Lavrentiev, Yu.G., Pospelova, L.N. Chromite-pyroxene-garnet splices from the kimberlite pipe "Mir" // Geology and Geophysics. – 1973. – No. 12. – P. 15-20.
- [7] Spinelids of mantle rocks / Matsyuk, S.S., Platonov, A.N., Polshin, E.V. et al.; Ed. V.I. Pavlishin: Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. Institute of Geochemistry and Physics of Minerals. – Kiev: Nauk, dumka, 1989. – 212 p.
- [8] Bovkun, A.V., Garanin, V.K., Kudryavtseva, G.P., Samsonov, P.A. Evolution of spinel composition from kimberlites // Geology of diamonds - present and future (geologists to the 50th anniversary of Mirny and the diamond mining industry of Russia. / Edited by N.N. Zinchuk et al. Voronezh: Publishing House of Voronezh State University. – 2005. – P. 941-950.
- [9] Samsonov P.A., Bovkun A.V., Garanin V.K. Spinelids from kimberlites // News of higher educational institutions. Geology and exploration. – 2008. – No. 4. – P. 17-22.
- [10] Garanin, V.K. Mineralogy of kimberlites and related rocks of diamond-bearing provinces of Russia in connection with their genesis and searches: Abstract. dis... Dr. geol.-miner. Sciences. – M., 2006. – 44 p.

ПОТЕРИ ОСНОВНЫХ И ПОПУТНЫХ ПОЛЕЗНЫХ КОМПОНЕНТОВ В ЗАПАСАХ ВСЛЕДСТВИЕ ИХ НЕУЧЕТА И (ИЛИ) НЕДОИЗВЛЕЧЕНИЯ

Наталья Батугина

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

LOSS OF MAJOR AND RELATED USEFUL COMPONENTS IN RESERVES DUE TO THEIR OMISSION AND (OR) INCOMPLETE RECOVERY

Natalia Batugina

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

Annotation. The paper stresses that for dozens of large and a number of unique deposits the recoverable value of associated components is mainly 10-50% of the potential value, and in some cases the estimated and approved reserves of many associated components are not recovered at all. On average, the total loss of base and associated metals is about 50% of the calculated in-situ. Yakutia has many explored complex deposits, which are expected to be developed in the coming years and near future. Some of them are characterized by the fact that the value of the main component is already comparable to the value of one or more by-products. The article shows that the most effective would be not a sequential, but a complex, parallel development of a group of deposits of diverse minerals.

1. Введение

Для десятков крупных и ряда уникальных месторождений давно подсчитаны и утверждены запасы многих попутных компонентов, однако при разработке таких месторождений попутные компоненты недоизвлекаются, а в ряде случаев совсем не извлекаются. Фактические коэффициенты извлечения основных компонентов в большинстве случаев превышают плановые. Коэффициент извлечения серебра, как правило, низок, а в ряде случаев серебро не извлекается совсем.

2. Основной раздел

В настоящее время в Якутии разрабатывается несколько комплексных рудных месторождений (таблица 1). На золоторудных месторождениях Нежданинском и Кючюс среди сопутствующих компонентов имеются мышьяк, ртуть, сера, существенно осложняющие переработку руд. В более благоприятных условиях мышьяк и сера могли бы быть попутно извлекаемыми ценными компонентами. Здесь же они в большей степени являются «вредными примесями», затрудняющими переработку руд, и требуют сложных и дорогих приемов по защите окружающей среды, утилизации отходов горного производства.

В Якутии много разведанных комплексных месторождений, освоение которых ожидается в ближайшие годы и в недалеком будущем. Некоторые из них характерны тем, что ценность основного компонента уже сопоставима с ценностью одного или нескольких попутных. Геологическое изучение месторождений и технологическое исследование руд большинства месторождений пока остается неполным. По имеющимся технико-экономическим обоснованиям и результатам геолого-экономической оценки ожидаемые коэффициенты извлечения основных компонентов составляют 0,8–0,95, а попутных значительно меньше (см. таблицу 1). Нередко извлечение даже основных компонентов затрудняется из-за сложности и дороговизны процессов рудоподготовки, обогащения и дальнейшего передела, индивидуальных природных особенностей перерабатываемого минерального сырья и др. Например, характерной особенностью многих крупных золоторудных месторождений Сибири

и Дальнего Востока России (Олимпиадинское в Красноярском крае, Нежданинское и Ключюское в Якутии, Токурское в Амурской области и др.) является тонкая вкрапленность золота в различных (нескольких) минералах и высокое содержание в рудах мышьяка и серы. Переработка таких руд по традиционным схемам неприемлема из-за малого извлечения (до 50%), загрязнения процесса и окружающей среды мышьяком и (или) серой.

Таблица 1 – Состояние и перспективы извлечения основных и попутных компонентов на разрабатываемых рудных месторождениях РС(Я)

| Месторождение, компоненты | Среднее содержание, г/т | Коэффициент извлечения, % | | |
|-----------------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------|---------------|
| | | плановый | фактический | перспективный |
| Бадран: | | | | |
| золото | 6,2 | 93 | 93,4 | 95 |
| серебро | 0,7–13,3 | 50 | 0 | 90 |
| Золотосурьмяное «Сарылах»: | | | | |
| золото | 7,7 | 86 | 86–88 | 90 |
| сурьма | 12–22% | 92,6 | 93 | 95 |
| серебро | – | – | – | – |
| Золотосурьмяное Сентачан: | | | | |
| золото | 1–62 | 70 | 70 | 80 |
| сурьма | 38% | 90 | 90 | 92 |
| серебро | 6-13 | – | – | 80 |
| Куранахское рудное поле: | | | | |
| золото | 2,0 | 86,7 | 84 | 90–96 |
| серебро | 1–1,5 | 15 | 15 | 50 |
| Нежданинское: | | | | |
| золото | 5,0 | 75 | 76 | 92 по проекту |
| серебро | 28,5 | 80 | 80 | 87 по проекту |
| сера | 2,0% | – | – | – |
| мышьяк | 1,7% | – | – | – |
| Оловорудное Депутатское: | | | | |
| олово | 0,94 | 64 | 58–60 | – |

В Якутии сейчас практически нет месторождений, пригодных для освоения традиционными технологиями разведки, добычи и переработки минерального сырья. Особенно остро встает проблема разработки новых, нетрадиционных технологий под имеющееся минеральное сырье [1-2 и др.].

При оценке уровня комплексности переработки и использования полезных ископаемых в РС(Я) следует обратить внимание на тот факт, что извлекаемая ценность попутных компонентов, в основном, составляет 10–50% потенциальной ценности [1, 3-5].

Большинство рудных полезных ископаемых проходят три стадии передела: горный, обогатительный и металлургический. Отметим, что в среднем общая сумма потерь основных и попутных металлов составляет около 50% подсчитанных в недрах. При этом на горный передел приходится 10-25%, обогатительный – 60-80% и металлургический – 5-10% общих потерь. Извлечение золота в концентраты даже на ведущих зарубежных предприятиях составляет в среднем (при традиционных технологиях) 34-92%. В ЮАР в 90-е годы прошлого столетия из руды извлекалось 75–85% золота, из хвостов – 25–55%, из текущих хвостов цианистых заводов – 20–35%. Извлечение золота из руд на основе передовых сорбционных технологий с

использованием активированных углей составляет 70–96%, а при кучном выщелачивании – 50–75% [3]. Извлечение ниобия (Nb_2O_5) в концентрат 50–70% считается приемлемым, а 80% – весьма высоким. Извлечение ниобия из концентрата на дальнейших стадиях передела считается вполне приемлемым, если оно достигает 75–85% [3-4].

До последних лет прошедшего века в республике добывалось ограниченное число разных видов полезных ископаемых. Это, в основном, золото, алмазы, олово, сурьма, слюда и уголь. В последние годы начали добывать газ и нефть.

Освоение недр ведется выборочно как по видам полезного ископаемого, так и по месторождениям одноименного полезного ископаемого. В рыночных условиях без должного государственного регулирования еще в большей степени увеличил избирательность, будут осваиваться редкие достаточно рентабельные участки месторождений. Эти месторождения, будучи выведенными (отрабатываемыми, отработанными) из природного минерального комплекса, существенно его обедняют, так как наиболее эффективным было бы не последовательное, а комплексное, параллельное освоение группы месторождений разноименного минерального сырья.

Для иллюстрации подобной ситуации можно привести следующие примеры. В Якутии, как и во многих других регионах современной России, еще с 50–60 годов прошлого столетия известны россыпные месторождения циркона, монацита, ксенотима, куларита и других полезных компонентов, расположенных, в том числе, и в районах интенсивной, в недавнем прошлом, золотодобычи. Куларит и другие полезные компоненты часто являются попутными компонентами при разработке золотоносных россыпей. Многие отработанные и разрабатываемые россыпные месторождения при их разведке не были оценены в должной мере на редкие и другие металлы. В многотоннажных эфтелях (отходах горного производства при разработке россыпных месторождений золота) до настоящего времени в большинстве случаев не оценены содержания золота и попутных ценных компонентов. В то же время потенциальная ценность, например, куларита, в нескольких отработанных россыпях золота в Куларском золотоносном районе Якутии была сравнима с ценностью извлекаемого золота (а в ряде случаев и выше).

Для отработанных и отрабатываемых россыпных месторождений золота характерна следующая ситуация. Мелкое (от 0,25 до 0,1 мм) и тонкое (мельче 0,1 мм) золото в россыпных месторождениях часто составляет весьма большой процент: 50–60% и более (до 95–100%) [1]. Извлечение тонкодисперсного золота в большинстве случаев и до настоящего времени затруднительно из-за несовершенства и недостаточной эффективности технологии.

Обычно при разведке в процессе опробования мелкодисперсное золото не извлекалось и не учитывалось при подсчете запасов и геолого-экономической оценке россыпей. В результате распределение тонкодисперсного золота на территории республики даже в старых золотопромышленных районах изучено недостаточно, а участки с более крупным золотом почти все отработаны. Когда-то дойдет очередь и до не выявленных пока россыпей тонкодисперсного золота и отходов отработки россыпей с более крупным золотом, частью сохранивших в себе тонкодисперсное, мелкое и более крупное золото.

3. Выводы

Показано, что для десятков крупных и ряда уникальных месторождений извлекаемая ценность попутных компонентов, в основном, составляет 10–50% потенциальной ценности, а в ряде случаев подсчитанные и утвержденные запасы многих попутных компонентов совсем не извлекаются. При этом в среднем общая сумма потерь основных и попутных металлов составляет около 50% подсчитанных в недрах.

4. Литература

- [1] Batugin S.A., Yakovlev V. L. Patterns of development of mining: monograph. – Yakutsk: YSC SB RAS, 1992. – 116 p.
- [2] Korolev, Yu.I., Bobrova L.V. The role of associated components in assessing the industrial significance // Economics of minerals and exploration: review. – Moscow: VIEMS, 2008. – 67 p.
- [3] Abramov A.A., Gorlovsky S.I., Rybakov V.V. Enrichment of non-ferrous ores and rare metals in Asia, Africa and Latin America: a textbook. – Moscow: Nedra, 2001. – 312 p.
- [4] Stopic S.R., Friedrich B.G. Advance in ultrasonic spay pyrolysis (USP) for the synthesis of gold nanoparticles // Military Technical Courier. – 2020. – Vol. 68. – No. 4. – P. 877-894.
- [5] Istomina E.E., Kuranov M.N. Technology of segregation-diffusion concentration as a method for the extraction of fine and thin gold from waste products // International Research Journal. – 2022. – Vol. 7-2 (121). – P. 71-74.
- [6] Anisimova A.B. Some aspects of the economic assessment of associated components in the complex processing of mineral raw materials // Natural-humanitarian studies. – 2021. – Vol. 34 (2). – P. 18-22.
- [7] Kusevich V.I.1, Aliskerov V.A.1, Grigoryeva M.V.1, Danilyants S.A.1, Zavertkin V.L. On high and integrated mineral processing // Mineral Resources of Russia. Economics and Management. – 2013. – Vol. 2. – P. 55-59.

МАССОВЫЕ ЗАХОРОНЕНИЯ ОСТАТКОВ МАМОНТОВ НА ТЕРРИТОРИИ ЯКУТИИ

Геннадий Боескоров

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

MAMMOTH FAUNA SITES AND MAMMOTH MASS BURIALS ON THE TERRITORY OF YAKUTIA

Gennady Boeskorov

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

Annotation. The article discusses the Mammoth fauna localities and mass burial sites of the mammoths, or the so-called «cemeteries» of mammoths. Such paleontological monuments are found on the territory of Russia from the Russian plain in the West to Yakutia in the East. The causes for the formation of such "cemeteries" are analyzed. It was established that they are mainly formed due to the impact of the following causes: 1. abiotic factors, 2. the deaths of mammoths from natural causes, 3. anthropogenic factor. It is assumed that paleolithic people did not conduct mass hunting for mammoths, and single mammoth hunts could not create mass burials of their remains.

1. Введение

На территории Сибири, в том числе и Якутии, известно много местонахождений естественных массовых захоронений остатков крупных млекопитающих позднего плейстоцена. В научной литературе эти объекты получили название «местонахождения мамонтовой фауны» [1]. На них кости шерстистого мамонта (*Mammuthus primigenius* (Blumenbach, 1799)) могут составлять от 10-25% (обычное число на большинстве местонахождений) до 95% (на некоторых местонахождениях) от всех остатков ископаемых млекопитающих (бизонов, лошадей, шерстистых носорогов, северных оленей и др.), что освещено в работах Н.К. Верещагина, Т.В. Кузнецовой, П.А. Лазарева, П.А. Никольского, А.В. Шера и др.

П.А. Лазарев [2] на основе многолетних подсчетов костей крупных млекопитающих мамонтовой фауны с подобных местонахождений, подсчитал среднюю встречаемость костей некоторых видов в местонахождениях с территории Якутии и Магаданской области: шерстистый мамонт – 27,4%, древние лошади – 26,9%, первобытный бизон – 26,8% и т.д.

На территории России имеются местонахождения (в некоторых случаях позднелепелитические стоянки, ассоциированные с естественными местонахождениями), на которых отмечено абсолютное преобладание костей мамонтов, т.н. «мамонтовые кладбища»: Севск в Брянской области (99,9%), Бызовая на р. Печора (97,6%), Гари на Северном Урале (99,5%), Луговское в Ханты-Мансийском автономном округе (98%), Тегульдэт (Красноярская курья) в Томской области (более 99%), Шестаково в Кемеровской области (90%), Волчья Грива в Новосибирской области (98%) (работы Машенко, Мангеруда, Павлова, Серикова, Бойко, Лещинского и др.).

2. Местонахождения массовых захоронений мамонтов

На территории Якутии хорошо известно Берелехское «кладбище» мамонтов, являющееся одним из наиболее крупных в Евразии местонахождений остатков шерстистого мамонта. Оно находится в верхнем течении реки Берелёх (левый приток р. Индигирка), 150 км к юго-западу от пос. Чокурдах (70°29'98" с.ш. и 144°02' 35" в.д. и было открыто Н.Ф. Григорьевым в 1947 г. Местонахождение представляет собой участок левого берега реки длиной более 500 м и приурочено в 10-12 метровому береговому обрыву. На нем в 1970-71 годах было учтено около 8500 костей мамонтов, что составляло примерно 99,3% от всех остеологических находок на этом местонахождении [3]. При последующем обследовании этого местонахождения в июле

2010 г. было собрано и учтено более 600 костей крупных млекопитающих мамонтовой фауны. Более 96% из них составляют кости шерстистого мамонта [4, 5]. Используя морфологические критерии для определения индивидуального возраста на посткраниальном скелете, установленные для основных возрастных групп *M. primigenius* Е.Н. Машенко и подсчет количества парных длинных костей конечностей, по материалам собранным в 2010 г. получены данные о возможном составе и численности групп шерстистого мамонта местонахождения Берелёх: минимальное число учтенных особей – 24. Из них 17 представлены половозрелыми особями (самцы - 3, самки – 14), неполовозрелых – 7 особей (1 новорожденный, 2 особи 1-2 года, 2 особи 3-4 лет, 2 особи 4-8 лет). Эти данные показывают, что в Берелехе представлены особи всех возрастных групп, включая новорожденных детёнышей и детёнышей всех возрастных групп, до особей подросткового возраста (subadult). Беременные самки (их количество определено по костям двух эмбрионов) составляют не менее 14% от числа учтенных половозрелых самок (2 особи). Высота тела в холке у наиболее мелкой половозрелой особи (самка) – около 175 см. Соотношение самцов и самок - 1:4,7. Соотношение половозрелых (70,8%) и неполовозрелых особей, ближе к их отношению в семейных группах у современных слонов [4, 5] (Боескоров, Машенко, 2010). По материалам, полученным в 2010 г., не подтверждается высказанное ранее мнение об отсутствии на Берелёхе старых самцов с полностью приросшими эпифизами длинных костей конечностей (старше 40-45 лет) [3] (Верещагин, 1977). Около половины половозрелых самок имеют не полностью приросшие (или не приросшие) эпифизы длинных костей конечностей. Указанная возрастная структура может указывать на популяцию с быстро увеличивающимся числом особей.

Возрастная и половая структура исследованной в 2010 г. выборки из Берелеха, указывает на преимущественную и неизбежную гибель особей (самок и детёнышей) из семейных групп и неизбежную гибель самцов разного индивидуального возраста. Таким образом, анализ данных по костям мамонтов на Берелехском "кладбище" мамонтов позволяет сделать следующие выводы:

1. В выборке представлены все возрастные группы, которые обычно представлены в быстро растущей популяции современных африканских слонов;
2. Возрастной и половой состав группы мамонтов с Берелеха не свидетельствует о вымирании вида *M. primigenius*, по крайней мере в районе местонахождения, а скорее говорит о том, что гибель мамонтов на Берелехе была результатом длительного процесса гибели разных особей по каким-то естественным причинам [5].

Другое местонахождение с массовым скоплением костей шерстистого мамонта было обнаружено в начале 1970-х годов на р. Аччыгый Аллаиха (левый приток р. Индигирки). Здесь в 1982 г., было найдено около 200 костей мамонтов [2]. Исследование этого местонахождения проводилось в 2003-2004 гг. П.А. Никольским, А.Э. Базилянком и В.В. Питулько [6]. Во время этих работ было найдено и раскопано более 1000 костей мамонтов (99,4% от всех остеологических находок), изучена стратиграфия обнажения, получен ряд радиоуглеродных датировок по костным остаткам и сделано предположение о причинах гибели животных [6]. Восемь радиоуглеродных датировок костей мамонтов с этого местонахождения показали возраст от 12400 ± 60 до 12490 ± 80 лет назад, соответствующий беллинговскому колебанию (фаза позднеледникового потепления климата приблизительно от 12800 до 12300 лет назад в финале плейстоцена). Таким образом, по этим данным скопление костей мамонтов на р.Аччыгый-Аллаиха, скорее всего, образовалось в относительно небольшой промежуток времени (от 230 до 110 лет) в тоже время, когда происходило короткое, но достаточно сильное беллинговское потепления, вызвавшее, видимо, ряд неблагоприятных последствий (увеличение снежного покрова зимой, сильные паводки весной и т.д.). Подобные условия по мнению авторов исследования могли привести на Аччыгый-Аллаихе к одновременной гибели большого количества мамонтов (вероятно, нескольких семейных групп) в течение одного или нескольких сезонов.

Радиоуглеродные датировки остатков мамонтов с Берелехского «кладбища» показывали больший временной интервал накопления костей, чем на Аччыгый-Аллаихе – от 10370 ± 90 до

13700±400 лет, т.е. 2800-4000 лет. Однако эти датировки были получены в разных лабораториях и могли иметь различные погрешности, большая часть этих датировок не калибрована и не может быть напрямую сопоставлена с датировками из Аччыгый-Аллаихи. Новые датировки, полученные П.А.Никольским с соавторами [6] по костям мамонтов с Берелехского «кладбища» мамонтов - от 11900±50 до 12720±100 лет, значительно сужают интервал накопления костей на Берелехе до 700-1000 лет, но тем не менее, свидетельствуют о том, что сотни мамонтов не погибли одновременно в водах древнего Берелеха в результате глобальной катастрофы. Эти датировки весьма схожи с таковыми с Аччыгый-Аллаихи и большей частью соответствуют периоду беллингского колебания. По-видимому, во время беллингской оттепели на берегах Пра-Берелёха образовалось чрезвычайно топкое место, в котором регулярно увязали и погибали мамонты. По нашему мнению гибель мамонтов на Берелёхе и Аччыгый-Аллаихе, происходившая во время беллингского колебания (о чем свидетельствует ряд новых датировок), не была еще началом массового вымирания мамонтов, т.к. многочисленные датировки остатков этих слонов возрастом от 12 до 10 тысяч лет назад свидетельствуют о том, что они относительно благополучно пережили указанный период и дожили во многих областях Северной Евразии до самого конца плейстоцена [4, 5]. С другой стороны, известный специалист по мамонтовой фауне проф. Н.К. Верещагин предполагал, что Берелехское "кладбище" обязано своим происхождением с древней старицей Пра-Берелеха, в которую половодьем сносились трупы погибших выше по течению животных [3].

Образование массовых скоплений костей мамонтов на Берелёхе и Аччыгый-Аллаихе, по всей видимости, не связано с деятельностью человека. На этих костях не обнаружено никаких следов деятельности человека – нет искусственно разбитых, разрубленных, обработанных или обожженных. Предполагалось, что стоянка человека позднейшего палеолита, расположенная в непосредственной близости от Берелёхского кладбища, более поздняя, и таким образом, человек не был главной причиной образования массовых захоронений костей [3]. В последние годы получены новые доказательства того, что стоянка образовалась позже накопления костей мамонтов – со стоянки Берелёх были получены радиоуглеродные датировки возрастом от 11450 до 11820 лет [7].

«Кладбище» мамонтов было обнаружено и в низовьях р. Яна недалеко от верхнепалеолитической Янской стоянки на местонахождении Мус Хая (или, иначе «Сопливая Гора») [8, 9]. Анализируя материал из этого местонахождения с массовым количеством костей крупных позднплейстоценовых млекопитающих, найденных в 2008 г. (более 1000 экземпляров), среди которых остатки мамонтов составляют 97,9%, сделан вывод [8] о том, что данное скопление имеет антропогенное происхождение, т.е. кости мамонтов были по каким-то причинам сконцентрированы возле Янской стоянки ее обитателями, людьми верхнего палеолита. С какой целью они были собраны и были ли эти кости остатками добытых животных, авторы не поясняют. Интересно, что на самой стоянке количество костей мамонта среди костей других ископаемых млекопитающих составляет всего около 3% [9]. В.В. Плотников обнаружил на данном месте в 2009 г. 52 кости мамонтов, относящихся как минимум к 13 особям разного индивидуального возраста: детенышам, подросткам, половозрелым и старым особям, вероятно, представлявшим остатки особей одной или нескольких семейных групп. Следов деятельности человека на костях мамонтов не обнаружено. Предполагается, что одной из возможных причин гибели мамонтов в районе данного местонахождения может быть неизбирательная гибель части семейных групп во время половодья [10].

Не обнаружено следов орудий человека и на костях мамонтов, найденных и на других массовых захоронениях: Максунуохском [2, 11] и Селляхском [12], на которых мамонты по-видимому, тоже, погибли в силу природных катастрофических событий. Надо отметить, что следы использования костей шерстистого мамонта обычны на стоянках верхнего палеолита, но все они относятся к примерам обработки кости вторичного характера, произведенным после гибели животных, или связь этих следов обработки с охотой на мамонта не является очевидной [13]. Прямое свидетельство охоты на мамонта из местонахождения Мамонтовый ручей

(Луговское, Ханты-Мансийский автономный округ), до настоящего времени остается очень редким во всей Евразии [14].

Массовые скопления костей мамонтов в Центральной Якутии никогда не отмечались, а только части скелетов отдельных особей. Пожалуй, единственное небольшое «кладбище» мамонтов в этом регионе было обнаружено в 2011 г. на территории Соморсунского наслега в Амгинском районе [15]. Здесь было найдено 37 костей от пяти особей мамонтов разного индивидуального возраста (подростки, половозрелые молодые и старые особи). Радиоуглеродная датировка, полученная по кости, показала возраст 38770 ± 320 л. н. (ГИН - 14740), что соответствует эпохе потепления позднего плейстоцена (каргинский межстадиал, MIS-3). Следов деятельности человека на костях не обнаружено. Причина гибели Соморсунских мамонтов пока не ясна, наиболее вероятно гибель в результате утопления [15].

В противоположность этому многие археологи обычно связывали образование мамонтовых кладбищ только с хозяйственной и охотничьей активностью человека позднего палеолита. «Обитатели стоянки Берелех были современниками мамонта – основного объекта их охоты... Кости мамонтов на стоянке Берелех являются не случайным скоплением, а остатками жилищ древнего человека...» [16]. Н.К. Верещагин рассматривал такую возможность только как второстепенную: «Возможно, что и палеолитические охотники принимали активное участие в гибели некоторой части мамонтов, загоняя их в трясину» [3]. С точки зрения биологии и предполагаемой экологии шерстистого мамонта, забой сотен мамонтов одновременно на одном месте противоречит и популяционной структуре, экологии таких крупных животных и возможностям, которые дает охотничье вооружение человека позднего палеолита [17].

Тем не менее, на стоянке верхнего палеолита Хотылево 2 (Русская равнина), 90% костей шерстистого мамонта претерпели глубокую модификацию в процессе хозяйственной деятельности человека [18]. Для Русской равнины неоднократно отмечалось, что часть стоянок человека верхнего палеолита могла размещаться вблизи естественных мамонтовых «кладбищ». Кости из таких местонахождений широко использовались в хозяйственной деятельности человека этой эпохи для сооружения жилищ в безлесной зоне, как поделочное сырье для изготовления орудий и, видимо, являлись частями мерзлых туш, употреблявшихся в пищу [13].

Две противоположные концепции о роли мамонта в жизни первобытного человека: как объекта специализированной охоты или объекта поедания падали и сбора костей, сформировались давно [19, 20] и имеют своих сторонников и противников.

Примеры с Берелехского местонахождения не содержат прямых данных об охоте населения этой стоянки на мамонта. Найденные на Берелехской позднепалеолитической стоянке обожженные и расколотые кости мамонтов, судя по их сохранности, являются не остатками убитых на охоте мамонтов, а костями, подобранными на соседнем «кладбище мамонтов». Прямых свидетельств целенаправленной охоты на мамонтов с памятников позднего палеолита на Русской равнине только два, и оба они происходят из Костенок, по [13].

В настоящее время преобладает мнение, что и на территории Восточной Европы и Западной Сибири, люди финальной поры верхнего палеолита (28-12 тыс. лет назад) практиковали охоту на отдельных особей мамонтов, но никогда не устраивали массовых облавных охот на этот вид [13]. Но есть достаточно утвердительные свидетельства единичной охоты на взрослого мамонта, например, с палеонтологического местонахождения Мамонтовый ручей (Луговское, Ханты-Мансийский автономный округ) [14]. Но они единичны. В целом, можно отметить, что имеющиеся в распоряжении по этой проблеме данные, свидетельствуют, о том, что охота на шерстистого мамонта не была распространенным видом деятельности для человека верхнего палеолита. Для хозяйственных нужд, полагаем, значительно более вероятно массовое использование костей из естественных местонахождений или трупов недавно погибших животных [5, 13]. Таким образом, необходимо констатировать, что к сегодняшнему дню, нет прямых доказательств массовой охоты человека на мамонтов. Те факты, которые свидетельствуют о поедании человеком мамонтов, об изготовлении орудий из костей мамонтов, скорее всего, свидетельствуют об утилизационных навыках древних людей, либо

отнимавших добычу у хищников, либо добывавших раненых животных, что не могло приводить к массовым аккумуляциям костей мамонтов [13].

3. Выводы

Массовые скопления костей мамонтов (в том числе, и их бивней) в природе могли формироваться по трем основным причинам: 1. **Воздействие абиотических факторов.** В результате регулярной гибели стад (или части стад) мамонтов в водной среде в определенной местности (или регулярный снос трупов утонувших животных в одно место) (Берелех, Аччыгый Аллаиха, Максунуоха, Селлях). В результате регулярной гибели отдельных особей при попадании в карстовые воронки или термокарстовые трещины. Гибель стада мамонтов в результате невыясненного катастрофического явления (например, пылевой бури или отсутствия доступных источников воды) (возможно, Севск); 2. **Гибель от естественных причин.** Старые и больные животные в период миграций могли погибать в определенных участках миграционных путей, в наиболее труднопроходимых участках, или, наоборот, в наиболее привлекательных участках (солонцы). В течение тысяч лет в этих местах могло скапливаться значительное количество костей мамонтов; 3. **Антропогенный фактор.** В результате целенаправленного сбора костей и бивней мамонтов для хозяйственного использования людьми верхнего палеолита – для строительства жилищ, поддержания огня, совершения ритуальных действий, изготовления орудий, украшений и предметов культа (Межиричи, Костенки, Хотылево, возможно, Мус Хая). Возможны были также случаи массового падежа животных в результате инфекционных заболеваний (биотический фактор).

4. Благодарности

Работа над данной статьей выполнена в рамках Госзадания ИГАБМ СО РАН.

5. Литература

- [1] Vereshchagin, N.K. Why mammoths died out. – Leningrad: Nauka Publ., 1979. – 196 pp. [In Russian].
- [2] Lazarev, P.A. Large mammals of the Anthropogen of Yakutia. – Novosibirsk: Nauka Publ., 2008. – 160 p. [In Russian].
- [3] Vereshchagin, N.K. Berelekh "cemetery" of mammoths // Proceedings of the Zoological Institute Ac. sci. of the USSR. – 1977. – Vol. 72. – P. 5-50 [In Russian].
- [4] Boeskorov, G.G., Mashchenko, E.N. Mystery of the Berelekh cemetery // Science and Life (Nauka i Zhizn. – 2010. – N 3. – P. 16-17 [In Russian].
- [5] Maschenko, E.N., Boeskorov, G.G. Additional data on the composition of the woolly mammoth population of the location of Berelekh // Teriofauna of Russia and adjacent territories. International conf. abstracts of reports. – Moscow: "КМК" Publ., 2011. – p. 306 [In Russian].
- [6] Nikolskiy, P.A., Basilyan, A.E., Sulerzhitsky, L.D., Pitulko, V.V. Prelude to the extinction: revision of the Achchagyi-Allaikha and Berelyokh mass accumulations of mammoth // Quaternary International. – 2010. – Vol. 219. – P. 16-25.
- [7] Pitulko, V. V. Mysteries of Berelekh // Notes of the Institute of Material Culture History of the RAS. – 2008. – Issue 3. – P. 98-117 [In Russian].
- [8] Basilyan, A.E., Anisimov, M.A., Nikolsky, P.A., Pitulko, V.V. Woolly mammoth mass accumulation next to the Paleolithic Yana RHC site, Arctic Siberia: its geology, age, and relation to past human activity // Journal of Archeological Science. – 2011. – Vol. 38. – P. 2461-2474.
- [9] Pitulko, V.V., Nikolsky, P.A., Girya, E.Y., Basilyan, A.E., Tumskey, V.E. Koulakov, S.A., Astakhov, S.N., Pavlova, E.Y. Anisimov, M.A. The Yana RHS site: humans in the Arctic before the Last Glaciation // Science. – 2004. – Vol. 303. – P. 52-56.
10. Plotnikov, V.V., Boeskorov, G.G., Protopopov, A.V. and I.I. Kolodeznikov. New discovery of a mass grave of a woolly mammoth (*Mammuthus primigenius*) in the lower reaches of the Yana River // Science and Education (Nauka i Obrazovanie). – 2014. – No. 2. – P. 55-60.

- [11] Boeskorov G.G., Protopopov A.V., Bakulina N.T., Lazarev P.A. Conditions for the existence of the Maksunuokha mammoth // Science and education (Nauka i Obrazovanie). – 2006. – No. 2. – P. 56-61 [In Russian].
- [12] Plotnikov, V.V., Mashchenko, E.N., Boeskorov, G.G., Protopopov, A.V., Klimovsky, A.I., Kolesov, S.D. Woolly mammoth (*Mammuthus primigenius*) from the Sellyakh locality // Science and Education (Nauka i Obrazovanie). – 2015. – No. 1. – P. 55-60 [In Russian].
- [13] Akhmetgaleeva, N.B., Protopopov, A.V., Mashchenko, E.N., Boeskorov, G.G., Plotnikov, V.V., Pavlov, I.S. Trasnological studies of the mammoth Yuka // Paleoecology and fauna of the Late Pleistocene of Yakutia. Yakutsk: NEFU publishing house. – 2022. – P. 105-115 [In Russian].
- [14] Mashchenko, E.N., Shubina, Yu.V., Telegina, S.N. Lugovskoe. Landscape against the backdrop of glaciers. – Khanty-Mansiysk - Yekaterinburg: Publ. house "Basco", 2006. – 82 p. [In Russian].
15. Plotnikov, V.V., Protopopov, A.V., Klimovsky, A.I., and S.D. Kolesov. Somorsun mammoths (*Mammuthus primigenius* (Blum.)): taphonomic and biological interpretations // Science and Education (Nauka i Obrazovanie). – 2013. – No. 1. – P. 86-93 [In Russian].
- [16] Mochanov, Yu.A. The earliest stages of the settlement of man by Northeast Asia. – Novosibirsk: Nauka Publ., 1977. – 264 p [In Russian].
- [17] Mashchenko, E.N., Gablina, S.J., Tesakov, A.S., and Simakova, A.N. The Sevsk woolly mammoth (*Mammuthus primigenius*) site in Russia: Taphonomic, biological and behavioral interpretations // Quaternary International. – 2006. – Vol. 142/143. – P. 147-165.
- [18] Gavrilov, K. N., Voskresenskaya, E. V., Maschenko, E. N., Douka, K. East Gravettian Khotylevo 2 site: Stratigraphy, archeozoology, and spatial organization of the cultural layer at the newly explored area of the site // Quaternary International. – 2015. – Vol. 359/360. – P. 335-346.
- [19] Soffer, O. Upper Paleolithic connubia, refugia, and the archaeological record from Eastern Europe. In (O. Soffer, ed.). The Pleistocene Old World: Regional Perspectives. – Plenum Press, 1987. – P. 333-348.
- [20] Anikovich, M.V., Anisyutkin, N.K., Platonova, N.I. Man and mammoth in the Paleolithic of Europe: approaches and hypotheses. Issue. 1. Historiography, methodology, main problems. – St. Petersburg: Nestor-Istoriya Press, 2011. – 128 p. [In Russian].

СДВИГОВЫЕ ДУПЛЕКСЫ КАК РУДОКОНТРОЛИРУЮЩИЕ СТРУКТУРЫ РАЗНОТИПНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ОХОТСКО-ЧУКОТСКОГО ВУЛКАНОГЕННОГО ПОЯСА

Антон Глухов, Елена Колова,

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

THE ORE-CONTROLLED STRIKE-SLEEP DUPLEXES ON DIFFERENT TYPE OF OF THE OKHOTSK-CHUKOTKA VOLCANIC BELT

Anton Glukhov, Elena Kolova

North-East Interdisciplinary Scientific and Research Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy
of Sciences, 16 Portovaya st., Magadan, 685000, Russia

Annotation. Described transtension strike-sleep duplexes, controlled localization
epithermal Au-Ag and porphyry Cu-Mo mineralization OCVB.

1. Введение

Сдвиговые структуры являются важным типом рудоконтролирующих структур гидротермальных месторождений цветных и благородных металлов [3]. Наиболее важными в практическом отношении являются участки кулисообразного сочленения сдвигов, характеризующиеся сочетанием деформаций простого сдвига и транстенсии – сдвиговые дуплексы растяжения (далее СДР). Детально изучены в региональном и локальном масштабе СДР орогенных месторождений золота Урала [6]. На Северо-Востоке сдвиговые дуплексы ранее были охарактеризованы на орогенных золоторудных месторождениях Наталка [7] и Бадран [2], относящихся к Яно-Колымскому золотоносному поясу коллизионной природы. В пределах Охотско-Чукотского вулканогенного пояса известны десятки месторождений и сотни рудопроявлений Au, Ag, Cu, Mo, Pb, Zn, структурные аспекты локализации которых исследованы недостаточно полно. Нами были изучены Au-Ag эпитеpмальное месторождение Купол (Анадырский сегмент ОЧВП), Cu-Mo порфиpовые и Au-Ag рудопроявления Кони-Пьягинского района Охотского сегмента пояса: Тальниковое, Лора, Прямое, Рыжик, Крутое. Помимо принадлежности к одной трансрегиональной окраинно-континентальной структуре, их объединяет то обстоятельство, что они приурочены к вулканоплутоническим ассоциациям ОЧВП близкого возраста – 91–94 млн лет [4, 5].

2. Основной раздел

На месторождении Купол рудоконтролирующие СДР выделяются при различных масштабах изучения – и рудного района, и рудного поля. Последнее вмещается дуплексом растяжения, сформированным в зоне Средне-Кайемравеемского регионального глубинного разлома меридионального простиранья. К S-образному изгибу разлома приурочена Главная рудная зона месторождения, образованная адуляр-кварцевыми жилами мощностью до 30 м, протяженностью по простиранью до 1 км и на глубину до 700 м, многочисленные дайки и штоки риолитов, трубки гидротермально-эксплозивных брекчий. В свою очередь, в пределах самой Главной рудной зоны, имеющей протяженность более 5 км, более 50 % запасов сосредоточено на Флексурном отрезке длиной 600 м. Именно здесь расположены наиболее мощные жилы, с высокими (десятки и сотни г/т) средними содержаниями золота, раздувы риолитовых даек и практически все трубки брекчий. За пределами СДР мощности рудных тел не превышают первых метров, средние содержания золота – 10–15 г/т. Формирование СДР месторождения Купол связывается нами со взаимодействием Средне-Кайемравеемского (меридионального) и Имравеемского (северо-восточного) глубинного разломов. При изучении Cu-Mo рудопроявлений Кони-Пьягинского района нами была использована сдвигово-дуплексная модель размещения медно-порфиpовых объектов, разработанная

сотрудником Геологической службы США Л. Дрю [1]. Основные элементы этой модели предусматривают, что медно-порфировые месторождения приурочены к зонам сдвигов глубинного заложения, развивающихся при субдукционных процессах, и субпараллельных окраине континента. Границы СДР и особенно их угловые зоны характеризуются преимущественным развитием разрывов растяжения, благоприятных для внедрения порфировых интрузивных штоков и формирования штокверков. Внутренние части СДР, напротив, характеризуются развитием, главным образом, сдвиговых разрывов, благоприятных для локализации жильного Pb-Zn и Au-Ag оруденения. Тальниковое рудное поле приурочено к локальному СДР, принадлежащему зоне Бабушкинского глубинного разлома СЗ простирания. В пределах рудного поля дайки кварцевых диоритов, диоритовых порфиритов и гранодиорит-порфиров изменяют свое простирание с СЗ на субмеридиональное, увеличиваются их мощности. К этому участку приурочены тела гидротермально-магматических брекчий и штокверки с Cu-Mo минерализацией. Растяжение подчеркивается также субширотной ориентировки сбросом, ко которому южная часть рудного поля опущена на сотни метров. СДР хорошо читается в магнитном поле. На рудопроявлении Лора в магнитном поле также отчетливо выделяется S-образная структура СДР. Однако известные рудные зоны находятся за ее пределами. Близкая картина наблюдается на Cu-Mo рудопроявлении Прямое. Здесь выделение региональных рудоконтролирующих СДР является более сложной задачей. Однако и здесь, с некоторым приближением, выделяются S-образные структуры, связанные со Среднинским глубинным разломом широтного простирания, параллельным палеозоне субдукции. По геофизическим данным (С.А. Шубин, 2005 г.), разлом представляет собою правый сдвиг. В его зоне мы выделяем удлинённый в широтном направлении СДР, размерами 70×50 км. К его границам приурочены все наиболее перспективные Cu-Mo рудопроявления Кони-Пьягинского района, в свою очередь Au-Ag проявления сосредоточены внутри СДР.

3. Выводы

Выявленные нами закономерности могут быть использованы при прогнозировании и оценке Au-Ag и Cu-Mo минерализации также и на других отрезках ОЧВП.

4. Литература:

- [1] Drew L.J. A Tectonic Model for the Spatial Occurrence of Porphyry Copper and Polymetallic Vein Deposits – Applications to Central Europe. Scientific Investigations Report USGS 2005 – 5272. – 2006. –36 p.
- [2] Fridovskiy V.Yu. Strike-slip duplexes Badran deposit (North-East Russia) // Izvestia vyschykh uchebnykh sazedeniy. Geologia I razvedka. – 1999. – № 1. – P. 60-66.
- [3] Kuteynikov E.S. et al. Recognition and mapping of trust-faulted structures. – SPb: VSEGEI, 1994 [In Russian]
- [4] Kolova E.E., et al. The age of Porphyry-copper mineralization of the Okhotsk-Chaun metallogenic Province // Nauchno-metodicheskiye osnovy prognoza, poiskov, otzenki mestorozhdeniy almazov, blagorodnykh I tsvetnykh metallov. – TSNIGRI. – 2022. – P. 101–104/
- [5] Sakhno V.G., Tsurikova L.S., Maksimov S.O. (2019) Geochronological and geochemical features of magmatic gold- and silver-bearing complexes in the Chukotka sector of the Russian Arctic coast. // Litosfera. – 19(6). – P. 861-888. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-6-861-888.
- [6] Znamensky S.E., Znamenskaya N.M. The role of strike-slip duplexes in regional structural control of the Late Paleozoic gold mineralization of Magnitogorsk megazone (Southern Urals) // Lithosfera. – 2009. – № 4. – P. 83–92.
- [7] Yushmanov Yu.P. Gold-bearing stockwork of the Natalka deposit on the structure of a rotational duplex of the Kolyma Tenkinsky fault // Regional Problems. – 2020. – V. 23. – №1. – P. 6-12.

**ПРЕДПОСЫЛКИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ ДЛЯ
ОБНАРУЖЕНИЯ БИВНЕЙ МАМОНТОВ НА ДНЕ ПРЭСНОВОДНЫХ
ВОДОЕМОВ КРИОЛИТОЗОНЫ**

Иван Горохов, Иван Христофоров, Кэнчээри Данилов, Максим Чепрасов, Евгения Петухова
ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, ул. Петровского, 2

**PREREQUISITES FOR USING THE GEORADIOLOCATION METHOD TO
DETECT MAMMOTH TUSKS AT THE BOTTOM OF FRESHWATER BODIES IN
THE CRYOLITHOZONE**

Ivan Gorokhov, Ivan Khristoforov, Kenčeri Danilov, Maksim Cheprasov, Evgenia Petukhova
FRC “The Yakut Scientific Centre of the SB RAS”, 2, Petrovsky str., Yakutsk, 677980, Russia

Annotation. The article presents the results of the georadiolocation survey of freshwater water bodies in the territory of Verkhnekolymsky ulus of the Republic of Sakha (Yakutia). The carried out researches have allowed to establish the dependence of depth measurements on water properties, to reveal technical parameters of the survey allowing to detect local objects on the bottom and in bottom sediments, to offer a technique allowing to define geometrical parameters of the object and to distinguish rectilinear objects (trunks of trees) from curved BM.

1. Введение

В последние годы для поиска и добычи бивней мамонта (БМ) все более широкое применение находит поиск с применением водолазного снаряжения, а также другой специализированной техники, позволяющей обследовать дно пресноводных водоемов криолитозоны. Такой подход не только не противоречит существующему законодательству в части лицензионного поиска, но и значительно увеличивает объемы добычи ископаемой мамонтовой кости (ИМК). Причем подводный промысел ведется не только в летний период, но и в зимний. Для этого создаются майны, над которыми устанавливаются утепленные палатки. Радиус поиска при этом составляет до 40 м от майны. Такой подход существенно увеличивает продолжительность промыслового сезона и, соответственно, объемы добываемого сырья за год. Однако высокая мутность воды, а также наличие рыхлых донных отложений, толщина которых может составлять до 6 м и более, ограничивает возможности водолазного поиска, а также обследования дна с использованием, к примеру, подводных видеокамер, локаторов бокового зондирования, подводных дронов и пр. При обследовании дна, включая донные отложения, высокую эффективность показал метод георадиолокации. Георадиолокационное профилирование пресноводных водоемов суши позволяет обнаружить локальные объекты как на поверхности дна, так и в объеме донных отложений. Безусловно качество поиска будет зависеть от параметров съемки, свойств воды, методики обработки и интерпретации данных на радарограммах. В данной статье показана перспективность ведения поиска БМ на местонахождениях бассейна р. Колыма, в частности на территории Верхнеколымского района Республики Саха (Якутия) (РС(Я)).

2. Результаты георадиолокационного обследования пресноводных водоемов бассейна р. Колыма в Верхнеколымском районе РС(Я)

Полевые геофизические исследования проводились полевым геофизическим отрядом Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» с 16 по 30 августа 2022 года в Верхнеколымском районе. В ходе георадиолокационных работ применялись сертифицированные георадары серии ОКО-3 фирмы ООО «ЛогиС-ГЕОТЕХ» с центральными частотами антенн 50, 250 и 400 МГц.

Профилирование с поверхности воды выполнялось герметизированными при помощи пожарного рукава, полиэтиленовой пленки, стрейч-пленки и клейкой ленты (скотч) георадарами с борта надувной (ПВХ) лодки. Все георадарные профили пройдены с использованием спутникового навигатора GPS с фиксированием меток в программном обеспечении, производящем запись радарограмм, так как применение оптического одометра в заданных условиях было затруднено, а соблюдение прямолинейности съемки и равномерности передвижения являются главными условиями для получения достоверных результатов, позволяющих четко определить местонахождение искомого объекта после интерпретации полученных данных. Обработка георадарных данных производилась в среде GeoScan32 (ООО «Логические системы», г. Раменское) с учетом методик гидроакустической локации, описанных в [1]. При зондировании с поверхности воды установлено среднее значение диэлектрической проницаемости, составившее 81. Накопление сигналов георадара выставлено равным 16, для этого значения оптимизирована постоянная скорость продвижения георадара с расчетом детальности – не менее 20 зондирований на каждый метр. Запись отраженных электромагнитных сигналов происходит на жесткий диск в формате «gr2». При интерпретации данных учитывался также опыт исследований водоемов с поверхности воды, описанный в монографиях и статьях [2-4].

Район работ на р. Колыма условно разделен на шесть участков, расположенных по меандру реки (Рисунок 1). Выполненные работы включают площадные съемки антеннами с центральными частотами 50 МГц, 250 МГц, отмеченные на рисунке участками 1-5, а также экспериментальные измерения по изучению параметров отраженных сигналов от бивней различного диаметра в ближней зоне развертки георадара на руч. Чукучанка на участке 6.



Рисунок 1 – Расположение участков исследований: 1 – площадная съемка АБ 50 МГц; 2 – площадная съемка АБ-50 МГц; 3 – площадная съемка АБ-50 МГц; 4 – площадная съемка АБ-250 МГц; 5 – площадная съемка продольными профилями АБ-250 МГц; 6 – экспериментальные исследования на руч. Чукучанка.

На рисунке 2 представлены характерные для данной местности радарограммы, полученные с использованием антенных блоков с центральными частотами 50 и 250 МГц.

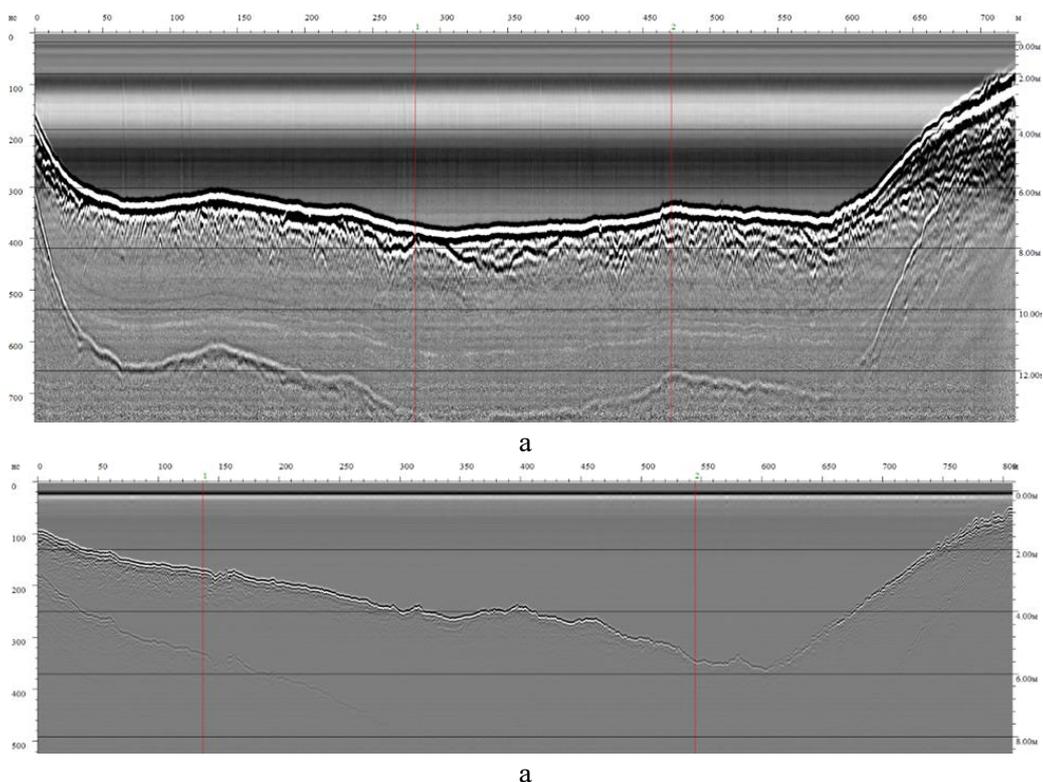


Рисунок 2 – Георадиолокационные разрезы, полученные с использованием антенного блока с центральной частотой 50 МГц (участок 2) (а) и 250 МГц (участок 4) (б).

Применение антенного блока с центральной частотой 50 МГц (рисунок 2, а) позволяет хорошо проследить рельеф дна и его двойное переотражение, выявить некоторые геологические границы и структуру донных отложений. Максимальная глубина полезного сигнала составила 15 м. Обследование водоема с использованием АБ 250 позволяет отчетливо определить рельеф дна и структуру донных отложений до глубины 6 м.

На рисунке 3 представлены фрагменты профилей с найденными локальными объектами на дне р. Колыма при проведении экспериментальной площадной съемки георадарами АБ-50 и АБ 250 МГц.

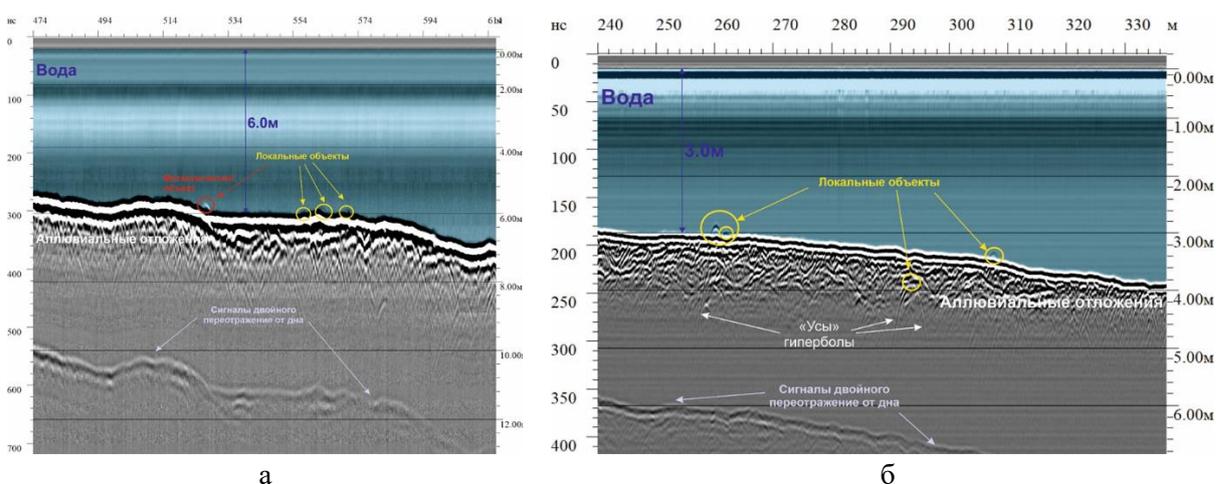


Рисунок 3 – Радарограммы с обнаруженными локальными объектами: а – АБ 50МГц; б – АБ 250 МГц.

Для более точной интерпретации данных на рисунке 3, а представлена радарограмма, полученная с использованием объекта сравнения (обведен красным кружком), в качестве которого использовали металлический предмет. Видно (рисунок 3, а), что в данном случае первая фаза рельефа дна положительна (черного цвета), что означает, что все локальные

неоднородности черного цвета начальной фазы являются отражением от костей, деревьев и пр., тогда как наличие инверсии фазы указывает на металлическую основу обнаруженного объекта (красный круг).

Видно (рисунки 3, б), что на радарограммах, полученных с использованием АБ-250 МГц, проявляются объекты, расположенные в донных отложениях. Судя по характеристикам «усов» гипербола, обнаруженные объекты погружены в донные отложения на небольшом заглублении. Всего за период экспедиционных работ было выделено более 25 локальных объектов. Их идентификацию на данном этапе выполнить не удалось, что обусловлено высокой мутностью воды (видимость не более 1 м) и высокой скоростью течения реки. При использовании подводной камеры, даже с применением груза и стабилизацией положения лодки, снимки сделать не удалось. Положение всех найденных объектов зафиксировано с использованием GPS. Для их идентификации на весну 2023 г запланированы экспедиционные работы, которые позволят произвести видеосъемку через прорубь, когда уровень воды и ее мутность, а также скорость течения реки будут ниже, по сравнению с летним периодом. Кроме того, будут выполнены георадиолокационное обследование водоема для сравнительной оценки качества полученных данных при зондировании с поверхности воды и поверхности льда.

На рисунке 4 представлены результаты модельных исследований по обнаружению и идентификации БМ на дне пресноводных водоемов. Суть исследований заключалась в том, что для интерпретации изогнутой формы бивня при прохождении профилей после обнаружения локального объекта, последующие съемки производились с отклонением на 10-15°, до тех пор, пока радарограмма не приобретет характерный вид с двумя горбами, один из которых будет обозначать кончик бивня, а другой его основание.

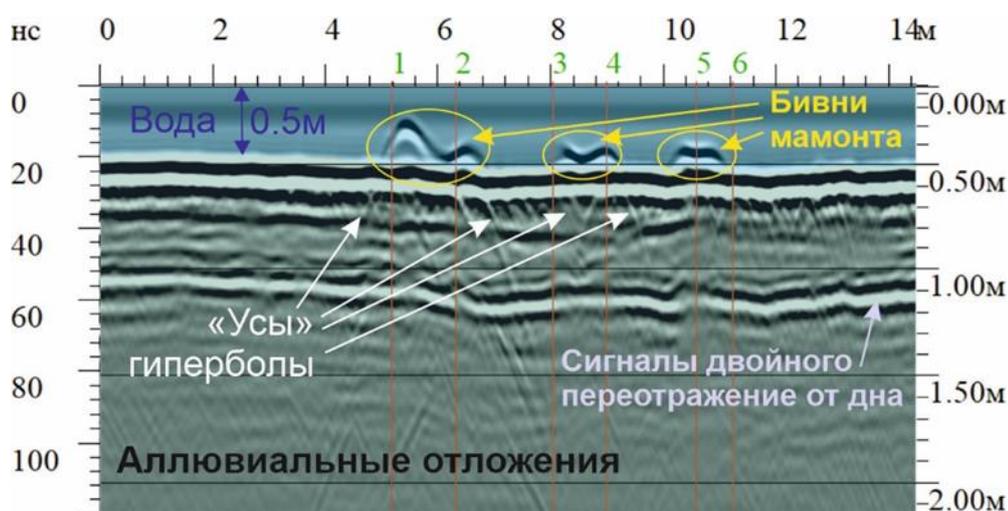


Рисунок 4 – Радарограмма при продольном расположении бивней.

Таким образом, для установления природы обнаруженного объекта, с целью отличить прямолинейные объекты (стволы затопленных деревьев и палеодеревьев) от изогнутых (БМ), после обнаружения объекта георадиолокационные исследования над объектом следует повторить, изменяя направление профилирования.

3. Выводы

Таким образом, на основании результатов экспедиционных работ, выполненных в 2022 г можно сделать следующие основные выводы:

- в зависимости от свойств воды и частоты применяемого антенного блока разрешающая способность метода георадиолокации при обследовании пресноводных водоемов суши составляет от 6 и до 15 м, включая донные отложения толщиной до 6 м;

- предложена и апробирована методика, позволяющая отличить прямолинейные объекты от изогнутых, заключающаяся в многократном профилировании над обнаруженным объектом с изменением угла прохождения на 10-15°;
- разработанная методика георадарного обследования водоемов позволила выявить более 25 локальных объектов на дне р. Колыма, включая донные отложения, на глубине 4-6 м, их идентификация будет выполнена в рамках экспедиционных работ, запланированных на март-апрель 2023 г.

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] Khristoforov I.I., Omelyanenko A.V. Improving the Efficiency of Hydrological Investigations by Submersible Ground Penetrating Radar // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2018. – Vol. 15. – Issue 3. – P. 335-339. DOI:10.1109/LGRS.2017.2786858.
- [2] 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.
- [3] Starovoitov A.V. Interpretation of georadiolocation data. – Moscow: Publishing House of Moscow State University, 2008. – P. 188
- [4] Khakiev Z.B. Some Peculiarities of Amplitude-Frequency Characteristics of GPR Traces in Media with Different Conductivity // Izvestiya Vuzov. North Caucasus Region. Natural Sciences. – 2009. – Vol. №6. – P.41-43

О РАННЕМЕЛОВОМ ОРУДЕНЕНИИ СЕВЕРНОГО ПРИОХОТЬЯ (МАГАДАНСКАЯ ОБЛАСТЬ, РОССИЯ)

Николай Горячев¹, Иван Горячев²

1 ФГБУН «Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН», 685000, Россия, г.Магадан, ул. Портовая, 16
2 ФГБОУ ВО «Иркутский национально-исследовательский технический университет», 664074, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 83

ON THE EARLY CRETACEOUS ORE MINERALIZATION OF THE NORTHERN PRE-OKHOTSK REGION (MAGADAN OBLAST, RUSSIA)

Nikolay Goryachev¹, Ivan Goryachev²

1 North-East Interdisciplinary Scientific and Research Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, 16 Portovaya st., Magadan, 685000, Russia
2 Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov str., Irkutsk, 664074, Russia

Annotation. The mineralogical and geochemical features of the Early Cretaceous ore deposits on the territory of the Northern Pre-Okhotsk region - the southeastern flank of the Yano-Kolyma orogenic belt and the Okhotsk sector of the Okhotsk-Koryak orogenic belt are considered. A review of dating is given and general and distinctive features of different mineralization types are shown. Metallogenic zoning is outlined relative to the edge of the continent. The genetic unity of ore mineralization with Early Cretaceous magmatism and its connection with the processes of formation of the Uda-Murgal magmatic arc are assumed.

Key words: Early Cretaceous mineralization, metallogenic zoning, Uda-Murgal arc, Yano-Kolyma and Okhotsk-Koryak orogenic belts.

1. Введение

Территория Северного Приохотья включает в себя две крупные орогенные структуры коллизионного (позднеюрско-раннемеловой Яно-Колымский орогенный пояс – ЯКОП) и аккреционного (раннемеловой Охотско-Корякский орогенный пояс – ОКОП) типов [1]. Каждая из этих структур характеризуется своей историей, магматизмом и металлогенией. Для ЯКОП главный пик магматической орогенной активности приходится на 150±5 млн лет, для ОКОП отмечается более широкий интервал от 132 до 100 млн лет [1, 2, 3, 4, 5]. И на все это накладываются структуры, связанные с формированием позднемелового Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (ОЧВП) окраинно-континентальной природы. Особенностью рассматриваемой территории является проявление в пределах структур ЯКОП этапа дайкового магматизма и золотого оруденения, с датировками 126-110 млн лет, которые хронологически совпадают с периодом формирования ОКОП. Предлагаемое сообщение посвящено исследованию соотношений рудных производных этого этапа в ЯКОП с рудными производными собственно ОКОП.

2. Тектонический очерк

В пределах рассматриваемой территории рудная минерализация локализована в Куларо-Нерском террейне ЯКОП, Армано-Вилигинском и Кони-Тайгоносском террейнах ОКОП [1, б], которые расположены между двумя кратонными блоками (микроконтинентами) Охотским и Омолонским. Террейны сложены песчано-сланцевыми отложениями перми – средней юры (Куларо-Нерский) и песчано-сланцевыми со значительной примесью вулканогенного материала перми – поздней юры (Армано-Вилигинский), Кони-Тайгоносский террейн при общем в целом сходстве с Армано-Вилигинским отличается от последнего существенно большей вулканогенностью позднеюрско-раннемелового этапа и проявлением блоков с пермским

гранитным магматизмом [7]. В последних двух структурах, важную роль играют магматические комплексы позднеюрско-раннемеловой Удско-Мургальской окраинно-континентальной или островной дуги (УМД), датированные (U-Pb) от 132 до 107 млн лет [4, 5].

3. Данные геологических взаимоотношений и геохронологии оруденения

К сожалению, датировок раннемеловой рудной минерализации ЯКОП не очень много. В основном, это касается валового анализа метасоматитов, серицит-кварцевого агрегата рудных жил и серицита из них. Большинство датировок выполнено K-Ar методом [8], в меньшей степени Ar-Ar [9, 10, 11, 12] и, есть первые даты Re-Os методом самородного золота [13] (табл. 1). Согласно таблице можно выделить несколько групп дат раннемелового интервала 136-138, 131-117 млн лет и 116-114, 106-102 млн лет. Первый и два последних относятся к датировкам оруденения Удско-Мургальской дуги [3].

Таблица 1 – Датировки раннемеловых рудных месторождений Северного Приохотья

| Месторождение (пояс) | Тип | Минерал / порода | Дата, млн лет | Метод | Источник |
|---------------------------|---|----------------------------|----------------|----------------|--------------------|
| Гольцовое (ЯКОП) | Орогенный жильный (Au) | Мусковит | 128.2 | Ar-Ar | [11] |
| Надежда (ЯКОП) | Орогенный дайки (Au) | Серицит Серицит + кварц | 126.5 115.9 | Ar-Ar K-Ar | [10] авторы |
| Ветренское (ЯКОП) | Орогенный жильный (Au) | Серицит | 126 | Ar-Ar | [10] |
| Крохалиное (ЯКОП) | Орогенный дайки (Au-Sb) | Гидрослюда | 128 | K-Ar | [8] |
| Экспедиционное (ЯКОП) | Орогенное жильное, или связанный с гранитоидами? (Au) | Арсенопирит | 117 | Re-Os | [13] |
| Тэутеджак (ОКОП) | Связанный с гранитоидами (Au) | Мусковит + турмалин | 103 | K-Ar | [3] |
| Лора (ОКОП) | Медно-порфировый | Измененный гранит | 102 | K-Ar | Н.Е.Савва, 2004 г. |
| Хакандя (ОКОП) | Молибденит-кварцевый | Кварц + мусковит | 103 | K-Ar | [3] |
| Джультета (ОКОП) | Эпитермальное (Au-Ag) | Адуляр | 136 135.5 | Rb-Sr Ar-Ar | [14] [9] |
| Нявленга (ОКОП) | Эпитермальное (Au-Ag) | Адуляр | 100 | Ar-Ar | [10] |
| Верхне-Сеймчанское (ЯКОП) | Co-Bi-Ag-As | Измененная дайка | 105 | K-Ar | [15] |
| Обход | Co-Bi-As | Рудовмещающие гранодиориты | 122 | U-Pb | [5] |

Большой размах датировок связан со слабой устойчивостью аргоновых изотопных систем к термальным воздействиям и свидетельствует только о наличии раннемеловых эндогенных производных. Определенную достоверность для этого этапа придает совпадение Ar-Ar и K-Ar датировок разных проб с одного месторождения (например, Ветренское, Надежда), достаточно четкие и ровные Ar-Ar плато [10, 11] и согласие их с датировками дорудных и пострудных даек, полученных Rb-Sr и U-Pb методами.

Важной спецификой раннемелового золотого оруденения в ЯКОП является присутствие в его составе золото-сурьмяных проявлений, датировки которых лежат в интервале 127-125 млн лет, а также заметное, по сравнению, с орогенными позднеюрско-раннемеловыми месторождениями, количество серицита в рудах. Кроме того, отмечается ассоциация

оруденения обоих типов с малыми интрузивными телами преимущественно порфиритового состава, отдельные из которых датированы интервалом 126-102 млн лет преимущественно калий-аргоновым методом. Хотя есть и U-Pb дата в 126 млн лет [5]. Возможно, что именно такие тела являются пострудными на Дегдеканском и Наталкинском месторождениях раннего этапа. Еще одним важным фактором специфики раннемелового оруденения является четкая приуроченность золото-сурьмяных объектов и золотых объектов к зонам влияния крупных разломов (Дарпир, Дебинский, Оротукано-Средниканский, Чай-Юрьинский), что подтверждается данными пространственного анализа с использованием геоинформационных технологий [16].

В то же время среди объектов, связанных с ОКОП отмечен широкий спектр типов от эпитермального золото-серебряного (Джульетта, Нявленга) и золото-висмутового, связанного с гранитоидами (Тэутеджак), до медно-порфиривого (Лора) и молибденит-кварцевого (Хакандя), также связанного с раннемеловыми гранитоидами. Кстати, золото-серебряное месторождение Нявленга является одним из немногих, где проявились процессы контактового метаморфизма на глубоких горизонтах и поздняя арсенопирит-молибденитовая минерализация, что подчеркивает его более древний возраст по сравнению с объектами ОЧВП. Сюда же следует отнести золото-висмутовую и золотоносную полиметаллическую минерализацию Ветвистого месторождения [17], для рудовмещающих даек которого известны K-Ag даты в 111-102 млн лет. Оно расположено в южном обрамлении вулканоплутонической структуры вмещающей месторождение Джульетта. Особо следует также отметить кобальт-висмутовую минерализацию, проявленную как в структурах ЯКОП (Верхне-Семчанское), так и ОКОП (Обход).

Анализ пространственного распределения и минералого-геохимических особенностей рассматриваемого оруденения позволяет выделить ряд его особенностей. С одной стороны- мы видим различие типов оруденения между ОКОП (пестрый набор типов, вполне укладывающийся в металлогению связанную с процессами в зоне субдукции УМД) и ЯКОП (золотое и золото-сурьмяное, весьма сходные с орогенным типом). С другой стороны, мы имеем примеры проявления в обоих поясах магматизма гранитоидного и более основного состава близкого по геохимическим характеристикам, в частности по высоким концентрациям Ni, Cr и V, отличающим его от позднеюрско-раннемелового орогенного магматизма ЯКОП (Шпикерман и др., 2016; наши данные по ряду рудных полей в ЯКОП (Экспедиционное, Наталкинское и проч.) и ОКОП (Ветвистое, Обход, Тэутеджак и проч.). Кроме того, известны примеры проявления термальных событий фиксируемые по аргоновым спектрам в ранних орогенных золоторудных объектах (Светлое, Дегдекан и др.) около 130 млн лет [10, 11, 18] локализованных в дайковых ареалах, преимущественно дорудных, но содержащих отдельные дайки более свежего облика с такими же геохимическими характеристиками и иногда с обильными обломками кварцевых жил. Сюда же следует добавить и проявление всегда заметно позднего сурьмяного оруденения, явно наложенного типа, а не «хвостов» орогенного процесса (Гамянин, 2001). Любопытно, что никелевая специфика раннемелового оруденения отразилась в золото-висмутовых объектах не только наличием Ni-содержащего арсенопирита, но и в находке специфических и очень редких минералов, таких как паркерит [19].

4. Заключение

Если исходить из хронологического и пространственного единства рассматриваемой минерализации, то напрашивается предположение ее генетического единства. Об этом, в частности, свидетельствуют закономерности в распределении разнотипного оруденения в пространстве, что позволяет говорить об элементах региональной минеральной зональности относительно края активной окраины континента: внутренняя (приближенная к зоне субдукции) зона эпитермального (Джульетта, Нявленга) и порфиривого (Лора) оруденения; промежуточная зона кобальт-висмутового с золотом (Тэутеджак, Омчан, ВСР) оруденения и внешняя (удаленная) зона золото-кварцевого (Ветренское, Экспедиционное, Надежда, Новая) и золото-сурьмяного (Крохалиное) оруденения. Отсюда следует вывод о генетическом единстве

рассмотренных разнотипных объектов и связи их формирования с процессами субдукции в зоне Удско-Мургальской дуги, для внешней зоны, вероятно, через процессы апвеллинга в верхней мантии в зоне активного клина [20]. Но данный вопрос требует дополнительной проработки, пока это можно рассматривать как предпосылки к модели.

5. Благодарности

Публикация подготовлена в рамках работ по проекту РНФ №23-47-00064.

6. Литература

- [1] Geodynamics, magmatism and metallogeny of the East of Russia (A.I.Khanchuk ed.). In 2 books. – Vladivostok: Dalnauka, 2006. – Book 1– P. 1-572, Book. 2 – P.573-981.
- [2] Akinin V.V., Prokopiev A.V., Toro H., Miller E.L., Wooden J., Goryachev N.A., Alshevsky A.V., Bakharev A.G., Trunilina V. A. U-Pb-SHRIMP-age of granitoids of the Main Batholith Belt (Northeast Asia) // *Doklady RAN.* – 2009. – Vol. 426. – No. 2. – P. 216-221.
- [3] Goryachev N.A. Uda-Murgalskaya magmatic arc: geology, magmatism, metallogeny // In the book. Problems of metallogeny in the ore regions of the North-East of Russia (V.I. Goncharov and V.M. Kuznetsov editors). – Magadan: SVKNII FEB RAS, 2005. – P.17-38
- [4] Goryachev N.A., Akinin V.V., Alshevsky A.V. Different-aged granitoid complexes of the Sredne-Yansky massif (Northern Priokhotye, Russia) // *Petrology of igneous and metamorphic complexes.* Issue. 10. Materials of the X All-Russian petrographic conference with international participation. – Tomsk: Publishing house of Tomsk CNTI. – 2018. – P. 96-102.
- [6] Tectonics, geodynamics and metallogeny of the territory of the Republic of Sakha (Yakutia). (ed. L.M. Parfenov, M.I. Kuzmin). – M.: MAIK «Nauka/Interperiodika», 2001. – 571 p.
- [7] Akinin V.V., Polzunenkov G.O. The first data on Permian granitoids in Northeast Asia (Koni-Taigonos arc) // *Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences.* – 2022. – Volume 505. – No. 2. – P. 170-175
- [8] Berger V.I. Antimony deposits. – L.: Nedra, 1978. – 296 p.
- [9] Layer P.W., Ivanov V.V., Ratkin V.V., Bundtzen T.K. Epithermal gold-silver deposits of the North-East of Russia: the first $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ age determinations of ores // *Doklady RAN.* – 1997. – V. 356. – No. 5. – P. 665-668.
- [10] Newberry R.J., Layer P.W., Gans P.B., Goncharov V.I., Voroshin S.V., Goryachev N.A., Sidorov V.A. Preliminary analysis of the chronology of Mesozoic magmatism, tectonics and mineralization in the North-East of Russia, taking into account $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ dates and data on trace elements of igneous and mineralized rocks. // *Gold mineralization and granite magmatism of the North Pacific. T. 1. Geology, geochronology and geochemistry. Proceedings of the All-Russian Conference.* – Magadan: SVKNII FEB RAN, 2000. – P. 181-206.
- [11] Voroshin, S.V., Newberry, R.J., Layer, P.W. $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ dating of Au–quartz mineralization in the Upper Kolyma region (Magadan Oblast, Russia). In: A.I.Khanchuk, et al. (Eds.), *Metallogeny of the Pacific Northwest. Tectonics, Magmatism, and Metallogeny of Active Continental Margins.* – Vladivostok: Dalnauka, 2004. – P. 568-571. (translated from English).
- [12] Goryachev N.A., Pirajno F. Gold deposits and gold metallogeny on Far East Russia // *Ore Geology Reviews.* – 2014. – Vol. 59. – P. 123-151 <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.11.010> (translated from English).
- [13] Pachersky N.V., Kryazhev S.G., Naumov E.A., Desyatova D.Yu., Dvurechenskaya S.S., Samoilenko M.V. New data on gold-rare metal mineralization of the Central Kolyma gold-bearing region: age, conditions of formation, composition, ore-controlling factors // *Ores and metals.* – 2021. – No. 2. – P. 68–90. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10011.
- [14] Struzhkov S.F., Konstantinov M.M., Aristov V.V. et al., New data on the geology and absolute age of gold and silver deposits of the Omsukchan segment of the Okhotsk-Chukotka volcanogenic belt // *Kolyma.* – 1994. – No. 10. – With. 13-16

- [15] Goryachev N.A., Gamyarin G.N., Prokof'yev V.YU., Savva N.Ye., Velivetskaya T.A., Ignat'yev A.V. Srebro-redkometall'nyy tip mineralizatsii Verkhne-Seymchanskogo rudnogo uzla // *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*. – 2014. – T. 56. – №5. – P. 362-386.
- [16] Goryachev I.N. Mineral prospectivity mapping for forecasting gold deposits and metallogenic zoning of the Central Kolyma region (Magadan region, Russia // *Information technologies for earth sciences and digitalization in geology and mining. ITES-2022: Proceedings of the VI All-Russian Conference, Vladivostok, October 3-8, 2022* Vladivostok: Research Institute of the Far Eastern Federal University, 2022. – P.60.
- [17] Malinovsky M.A. Vetvisty deposit: geochemical characteristics of the main types of ores // *Scientific youth of the North-East of Russia: Materials of the V Interregional Conference of Young Scientists (Magadan, May 22-33, 2014) Issue. 5.* – Magadan: SVKNII FEB RAS, 2014. – P. 7-8
- [18] Akinin V.V., Voroshin S.V., Gelman M.L. et al. SHRIMP dating of metamorphic xenoliths from lamprophyre at the Degdekan gold deposit: on the history of transformation of the continental crust in the Ayan-Yuryakh anticlinorium (Yana-Kolyma folded system) // *Geodynamics, magmatism and minerageny of the continental margins of the North Pacific. Mater. All-Russian Council. (XII) WMO North-East Annual Meeting*). T. 2. – Magadan: SVKNII FEB RAN, 2003. – P. 142-146.
19. Goryachev N. A., Gamyarin G. N., Zayakina N. V., Popova S. K., and Sidorov V. A., The first discovery of antimony parkerite in the North-East of Russia // *Reports of the Russian Academy of Sciences*. – 2004. – V.399. – No. 4. – P. 1-4.
- [20] Zhao, D., Pirajno, F., Dobretsov, N.L., Liu, L. Mantle structure and dynamics under East Russia and adjacent regions // *Russian Geology and Geophysics*. – 2010. – №51.– P. 925-938). (translated from English).

**ЛИТОГЕНЕЗ ДРЕВНИХ ОСАДОЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ
МАЛОБОТУОБИНСКОГО РАЙОНА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ И ИХ
АЛМАЗОНОСНОСТЬ**

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

**LITHOGENESIS OF ANCIENT SEDIMENTARY RESERVOIRS
MALOBOTUOBINSKY DISTRICT OF THE SIBERIAN PLATFORM AND
THEIR DIAMOND POSSIBILITY**

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

Annotation. According to the typomorphic features of diamonds from placers of the Siberian Platform (SP) amazon-bearing sub-provinces, regions, districts and fields are identified, for which root sources. The results of a comprehensive study of diamonds from different ages SP placers allow us to assert the presence for each of the considered diamond-bearing areas of mitomorphic features of the mineral, which should be taken into account in predictive and search work in promising areas.

Key words: diamonds and their typomorphic features, forecasting and prospecting.

1. Введение

На Сибирской платформе (СП) размещено преобладающее количество районов кимберлитового магматизма России. С зонами разломов, приуроченных к границам Непско-Ботуобинской (НБА) и Анабарской (АА) антеклиз с Тунгусской и Вилуйской синеклизами, связано проявление кимберлитового магматизма Малоботуобинского (МБАР) и Далдыно-Алакитского (ДААР) алмазоносных районов. К восточной и юго-восточной частям АА располагаются кимберлитовые тела, соответственно, Средне-Оленекского (СОАР) и Верхнемунского (ВМАР). К восточному склону Анабарской антеклизы и прилегающей территории приурочены Нижне-Оленекское (НОКП) и Куонапское (ККП) кимберлитовые поля. В области сочленения северо-западного склона АА с приплатформенной частью Приверхоянского краевого прогиба расположен Приленский алмазоносный район (ПАР). На западном склоне Анабарского щита установлены кимберлитоподобные породы Алданского района. Общей характерной особенностью всех перечисленных районов и полей является слабая изученность алмазных россыпей, коренные источники для многих из которых не установлены и являются одной из задач проводимых здесь геолого-поисковых работ.

2. Результаты исследований и их обсуждение

В алмазной геологии основным объектом исследований является сам алмаз – очень устойчивый в экзогенных условиях минерал, характеризующийся широким комплексом кристалломорфологических особенностей, отражающих своеобразие термодинамических и геохимических условий его образования и рассматривающихся в качестве типоморфных признаков [1-4]. Учёт последних при поисках алмазов позволяет проводить районирование исследуемых территорий и на этой основе исключать из опоскования те площади, на которых нахождение алмазоносных кимберлитов маловероятно, что показано нами на примере СП. Алмазопроисковые работы на СП ведутся уже на протяжении более 60 лет, в результате чего здесь открыто более 1000 кимберлитовых тел (трубки, дайки, силлы и жилы) и установлено широкое развитие россыпной алмазоносности в разновозрастных коллекторах различных

генетических типов. Кимберлитовые тела распределяются по площади платформы крайне неравномерно, группируясь в 25 кимберлитовых полях. При изучении типоморфных особенностей алмазов применялась их минералогическая классификация по комплексу взаимосвязанных признаков и свойств, предложенная Ю.Л.Орловым (Орлов,1984) и в значительной степени основанная на физических свойствах алмазов. Согласно этой классификации выделяется 11 генетических разновидностей алмазов с дополнительным разделением по габитусу и морфологическим типам, отражающих специфику условий их образования (формы роста, растворения и коррозии). Исследовались кристалломорфологические особенности алмазов (характер скульптур и двойники-сростки), прозрачность, окраска, пигментация, ожелезнение, фотолюминесцентные особенности, изотопный состав углерода, минералогия и химический состав твёрдых включений, сохранность, трещиноватость и механический износ кристаллов. *Центрально-Сибирская алмазоносная субпровинция* (ЦСАСП) занимает центральную часть СП, южнее Маакской излучины р. Оленёк. Здесь проявлены продуктивная россыпная алмазоносность и высокоалмазоносный кимберлитовый магматизм среднепалеозойского возраста [3-5]. В россыпях древнего возраста преобладают алмазы I типа первоисточника: (Малоботуобинский - МБАР, Далдыно-Алакитский - ДААР, Ыгыаттинский - ЫАР, Моркокинский - МАР, Средне-Мархинский - СМАР) алмазоносные районы. Характерно наличие россыпей ближнего, среднего и дальнего сноса. Наиболее широкие масштабы россыпной алмазоносности установлены в МБАР и СМАР. В ДААР обнаружены россыпи алмазов ближнего сноса, непосредственно примыкающие к кимберлитовым трубкам. Округлые алмазы встречаются здесь только на его западном (бассейн р. Алакит) и восточном (бассейн р. Силегир) флангах. В СМАР найдены россыпи алмазов в поздне-триасовых - нижнеюрских отложениях, часть из которых связана с известными трубками Накынского кимберлитового поля (НКП). В ВМАР россыпь Уулаах-Муна приурочена к ореолам эрозионного выноса кимберлитового материала и алмазов из известных на этой территории кимберлитовых трубок. Особенности алмазов отдельных территорий субпровинции является различное соотношение кристаллов октаэдрического и ромбододекаэдрического габитусов при низком (не более 10 %) содержании округлых алмазов уральского типа и кубоидов. На комплексной основе проведено среднемасштабное районирование ЦСАСП, отдельно по всем ее четырём алмазоносным районам. Районирование разновозрастных россыпей МБАР с учетом возраста и местоположения свидетельствует об их полигенности и существовании смешанных ореолов. Значимых отличий алмазов из верхнепалеозойских и мезозойских отложений в пределах одного и того же участка нами не установлено (россыпи *Солур* и *Восточная*). В целом морфологический спектр алмазов из россыпей МБАР близок между собой, но несколько отличается от этих минералов из известных кимберлитовых трубок [6-8]. Суммарное содержание кристаллов октаэдрического и переходного от октаэдрического к ромбододекаэдрическому габитусов в большинстве россыпей на 10 % ниже, чем в кимберлитовых трубках I-II группы (Мир, Интернациональная, Дачная, имени XIII съезда КПСС, Спутник) и одновременно несколько выше количество ламинарных ромбододекаэдров. В ряде россыпей (участки Заря, Искра, Тымтайдахский, Дачный-1, Глубокий и Восточный) установлено присутствие (0,5-1,0 %) так называемых алмазов IIв разновидности удачинского типа, представленных равномерно окрашенными в желтый цвет октаэдрами с занозистой штриховкой и блоковой скульптурой без площадок {100}, ярко-желтой фотолюминесценцией и с азотным центром N+V, для которых установлен легкий ($\delta^{13}\text{C} = -14,7 \text{ ‰}$) изотопный состав углерода, а рентгеноспектральным анализом диагностирован эклогитовый состав включений. Такого рода алмазы не установлены в трубках Мир, Интернациональная и других МБАР. Содержание алмазов с оболочкой IV разновидности колеблется в пределах 0,4-1,7 %, поликристаллических агрегатов VIII разновидности – 0,7-3,1 %, а бесцветных кубооктаэдров, куборомбододекаэдров и тетрагексаэдров I разновидности – 1,3-2,0 % от общего количества кристаллов. В алмазах некоторых россыпей (в частности, участка Восточный), присутствует, в отличие от коренных месторождений, так называемая леденцовая скульптура и отсутствует

мелкий класс, являющийся необходимым атрибутом россыпей ближнего сноса. По этому участку также установлено повышенное содержание включений сульфидных минералов (пирит в форме кубооктаэдров по трещинам), возможно, эпигенетического происхождения. Во многих россыпях (участки Тымтайдахский, Дачный, Искра и др.), по результатам исследований отмечается высокое содержание низкоазотных и безазотных кристаллов, практически отсутствующих в трубках Мир и Интернациональная. Количество алмазов с пониженным содержанием азота составляет в общей сложности до 30 % всех кристаллов. Отличие этих алмазов заключается в том, что, во-первых, количество таких индивидов в россыпях значительно больше, чем в трубках Таежная и Амакинская (не более 10 %); во-вторых, среднее содержание азота в них ниже ($1-2 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$), чем в кристаллах трубки Таежная ($4-5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$) и, в-третьих, эти алмазы в россыпях представлены в основном октаэдрами, в то время как в трубке Таежная основная их масса – ромбододекаэдры. Общей особенностью кристаллов с пониженным содержанием азота является зеленая, реже желто-зеленая фотолюминесценция. На этапе среднемасштабного районирования нами все проявления и россыпи алмазов сгруппированы в три россыпных поля (Ирелях-Маччобинское, с разделением на Центральный и Юго-Западный ореолы, Чуоналыр-Курунг-Юряхское, с разделением на Северо-Западный и Лапчанский ореолы, и Бахчинское). Первое поле охватывает россыпные проявления и россыпи алмазов нижнеюрских отложений, а остальные – верхнепалеозойских, включая только одну мезозойскую россыпь участка Солурский [8-10]. Большинство алмазов из данных россыпей относятся к *Ирелях-Маччобинскому россыпному полю*. По типоморфным особенностям алмазов они достаточно гетерогенны, несмотря на преобладание кристаллов октаэдрического и переходного от октаэдрического к ромбододекаэдрическому габитусов. Содержание кристаллов октаэдрического габитуса колеблется в значительных пределах - от 22,2 % (участок *Нижне-Юлегирский*) до 64,3 % (участки *Лосиха* и *Безрудность ВГ*). Доля ламинарных кристаллов ромбододекаэдрического габитуса для большинства участков (10,5-22,2 %) почти в два раза выше, чем в трубках Мир и Интернациональная. Аналогичным образом наблюдаются заметные (7,1-35,7 %) колебания в содержании двойников и сростков, фотолюминесцентных особенностях, причем по большинству участков количества кристаллов с сине-голубой фотолюминесценцией (13,6-42,8 %) заметно выше по сравнению со этими диатремами. Также наблюдаются резкие (18,8-63,1 %) колебания в содержании целых камней, что может свидетельствовать о своеобразии литолого-фациальных условий формирования этих россыпей. Все это дает возможность выделить в пределах Ирелях-Маччобинского россыпного поля центральную ассоциацию алмазов. Наиболее контрастным ореолом в пределах *Центрального россыпного поля* характеризуется участок *Тымтайдахский* с пониженным (43,5 %) содержанием кристаллов октаэдрического и повышенным – переходного от октаэдрического к ромбододекаэдрическому (35,4 %) и ромбододекаэдрического (11,2 %) габитусов. Здесь отмечено присутствие (3,2 %) желтых ромбододекаэдров II разновидности, высокое (27,4 %) количество двойников и сростков с преобладанием незакономерных сростков, повышенные (25,8 %) концентрации окрашенных камней и кристаллов с зеленой, желтой и оранжевой (в сумме 45,2 %) фотолюминесценцией, преобладающих над индивидами с розово-сиреневым свечением. Характерна также невысокая степень сохранности (целостности) кристаллов при очень низкой (6,5 %) роли камней с механическим износом «выкрашивания» и пониженной содержании примесного азота в форме А-центра. Аномальный характер комплекса минералогических и физических особенностей алмазов россыпи участка Тымтайдахский. В целом для алмазов Юго-Западного ореола Ирелях-Маччобинского россыпного поля характерна значительная дифференциация типоморфных особенностей алмазов отдельных участков. При этом *участок Куранахский* отличается от трубки Интернациональная низким (40 %) содержанием кристаллов октаэдрического и высоким (32,1 %) – индивидов переходного от октаэдрического габитусов I разновидности, при повышенном (1,4 %) содержании алмазов с оболочкой IV разновидности [1-3]. Еще более контрастными по типоморфным особенностям алмазов являются два ореола рассеяния алмазов в пределах верховья р. Улахан-Еленг и в бассейне р. Чуоналыр-Южный. Для первого характерно преобладание кристаллов

октаэдрического (54,7 %) и переходного от октаэдрического к ромбододекаэдрическому габитусов, причем для них, в отличие от трубок Мир и Интернациональная, характерно резкое преобладание индивидов со сноповидной (48,5 %) штриховкой над кристаллами с полицентрически растущими гранями (25,8 %), при фактическом отсутствии (1,9 %) алмазов с занозистой штриховкой. Другими их типоморфными особенностями являются сравнительно высокое (17,5 %) содержание двойников и сростков и очень низкое (4,1 %) количество окрашенных камней, а также индивидов с твердыми включениями (10,3 %). Среди алмазов более половины составляют кристаллы с пониженным содержанием примесного азота в форме А-центра, а также индивиды с однородным распределением центров розово-сиреневой фотолюминесценции, не характерных для трубок Мир и Интернациональная. Все это позволяет утверждать, что алмазы участка *Улахан-Еленгский* характеризуются типоморфными особенностями, близкими для кристаллов богатого типа первоисточника наиболее продуктивной фазы кимберлитового магматизма МБАР. В то же время, по ряду типоморфных особенностей (отсутствие алмазов с занозистой штриховкой, высокое содержание двойников и сростков, небольшое количество окрашенных камней, а также кристаллов с включениями), эти алмазы заметно отличаются от таковых из основных коренных месторождений района. Это может свидетельствовать о нахождении здесь высокоалмазоносного коренного источника, что также подтверждается особенностями распределения кристаллов по granulometрии, характерной для россыпей ближнего сноса. Аномальный для МБАР комплекс типоморфных особенностей характерен также, по предварительным данным, для бассейна р. Чуоналыр (Южный), для которых установлено высокое (5 %) содержание алмазов с оболочкой IV разновидности и поликристаллических агрегатов (5,0 %) VIII разновидности [4-6]. Такого рода индивиды повышенной хрупкости могут сохраняться только в россыпях ближнего сноса. С алмазами участка Улахан-Еленгский изученные кристаллы сближает однородное распределение центров розово-сиреневого свечения и высокое содержание кристаллов с пониженной концентрацией примесного азота в форме А-центра. Коренным источником алмазов, поступающих в россыпи ручьев Улахан-Еленг и Чуоналыр (Южный), могут быть неизвестные кимберлитовые тела, расположенных на водоразделе этих водотоков. Для алмазов отдельных участков *Чуоналыр-Курунг-Юряхского россыпного поля* также отмечается значительная дифференциация типоморфных особенностей алмазов, несмотря на то, что для них в целом характерно преобладание кристаллов октаэдрического и переходного от октаэдрического к ромбододекаэдрическому габитусов. По сравнению с Ирелях-Маччобинским россыпным полем, оно характеризуется пониженным (не более 14,3 %) содержанием ламинарных ромбододекаэдров, при полном отсутствии типичных округлых алмазов, небольшом (8,1-14,3 %) количестве кристаллов с сине-голубой фотолюминесценцией, повышенной (21,6-28,6 %) роли индивидов с желто-зеленым свечением и сравнительно высоком (35,1-43,2 %) числе целых камней. Исходя из типоморфных особенностей, алмазы Чуоналыр-Курунг-Юряхского россыпного поля можно объединить в северо-западную ассоциацию. Следует также отметить повышенное (до 10 %) содержание алмазов с эклогитовой ассоциацией твердых включений по участку Солурский, практически отсутствующих в трубках Мир и Интернациональная. Алмазы этого участка характеризуются аномально высоким количеством кристаллов с эпигенетическими сульфидными включениями, возникающими при гидротермальной минерализации древнего вторичного коллектора, находящегося на площадях, прилегающих к зоне Буордахского разлома. Типоморфные особенности алмазов из верхнекаменноугольных и мезозойских отложений участка Солурский очень близки, что свидетельствует об их сложной экзогенной истории [7-9]. На это также указывает высокий средний вес кристаллов (17,7-19,3 мг), при отсутствии мелких камней класса -1+0,5 мм, причем последние в основном представлены осколками. Вместе с тем для алмазов характерно высокое (40 %) содержание камней с механическим износом «выкрашивания», что может свидетельствовать о нахождении их коренных источников на значительном удалении при существовании сноса с запада. Для алмазов *Бахчинского поля* характерно резкое преобладание кристаллов октаэдрического и переходного от октаэдрического к ромбододекаэдрическому

габитусов при низком (не более 7,7 %) содержании ламинарных ромбододекаэдров, двойников и сростков, окрашенных камней и сравнительно небольшом (не более 23,1 %) количестве кристаллов с сине-голубой фотолюминесценцией, а также превалирование слаботрещиноватых камней. Среднемасштабное районирование МБАР позволяет оконтурить ореол с юга по водоразделам рек Малая Ботуобия и Мурбай, с востока – рек Малая Ботуобия и Виллюйчан, с запада – по р. Большая Ботуобия, с северо-запада и севера – по р. Виллюй. Площади за пределами указанного контура района характеризуются преобладанием округлых алмазов уральского (бразильского) типа, характерных для Южно-Тунгусской области [10].

3. Заключение

Таким образом, результаты комплексного исследования типоморфных особенностей алмазов из россыпей МБАР СП позволяют выделять алмазоносные поля, для которых можно прогнозировать тип первоисточников, уровень их потенциальной алмазоносности, а также качество алмазного сырья. Результаты комплексного минералогического исследования алмазов из разновозрастных россыпей описываемого района и их сравнение с кристаллами из кимберлитовых тел этого региона свидетельствуют о том, что каждый из рассмотренных алмазоносных участков характеризуется определенным комплексом их типоморфных особенностей и набором минералогических ассоциаций. Область развития отдельных макроассоциаций (семейств) в ее пределах обычно ограничивается территориями, в пределах которых развиты комплексы разновозрастных прибрежно-морских и терригенных древних вторичных коллекторов верхнепалеозойского и мезозойского возрастов. В пределах МБАР в отдельных россыпях установлена близость типоморфных особенностей алмазов из отложений верхнепалеозойского и мезозойского возрастов, что свидетельствует о формировании последних за счет размыва более древнего коллектора или коренного источника среднепалеозойского возраста. Миграционная способность алмазов из россыпей, сформированных за счет размыва кимберлитовых тел среднепалеозойского возраста и древних вторичных коллекторов, обычно находится в пределах алмазоносного района, что дает основание рекомендовать здесь дополнительные обобщающе-тематические и ревизионные прогнозно-поисковые работы.

4. Литература

- [1] 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. – P.50-84.(In Russian).
- [2] Kotelnikov D.D., Zinchuk N.N. Features of Clay minerals in sediments of various sedimentary farms // Izv. VUZov. Geologiya and razvedka. – 1997. – №-2. – P.53-63.
- [3] Zinchuk N.N., Melnik Yu.M., Serenko V.P. Apokimberlite rocks // Geology and geophysics. – 1987. – №-10. – P. 66-72.
- [4] Vasilenko V.B., Zinchuk N.N., Kuznetsova L.G. Geodynamic control of kimberlite fields' allocation of central and northern part of Yakutian kimberlite province (petrochemical aspect) // Bulletin of Voronezh Un. Geol. Series. – 2000. – №-3 (9). – P. 37-55.
- [5] Kotelnikov D.D., Zinchuk N.N. Typomorphic phic features and paleogeographic Significance of mica minerals // Izvestiya VUZov. Geologiya and razvedka. – 1996. – №-1. – P. 53-61.
- [6] 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. – P. 1228-1233.

- [7] 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. – P. 576-588.
- [8] Kotelnikov D.D., Zinchuk N.N. Conditions for the accumulation and post-sedimentations transformation of clay minerals in sediments of terrigenous formation // Bull. MOIP. Otdel geological. – 2001. – T.76. – №-1. – P. 45-53.
- [9] 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. – P.1297-1301.
- [10] 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. – P. 576-588.

ДРЕВНИЕ КОРЫ ВЫВЕТРИВАНИЯ И АЛМАЗНАЯ МИНЕРАГЕНИЯ

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

ANCIENT WEATHERING CRUST AND DIAMOND MINERAGENY

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

Annotation. The results of a comprehensive study of ancient weathering crusts (CV) on terrigenous-carbonate rocks, trap formations (tuffs, tuffaceous strata Early Carboniferous and Middle-Late Triassic in the main diamond-bearing regions Siberian platform. The role of redeposited weathering products of various types is assessed. late Devonian dolerites) kimberlite formations formed CV into the basal horizons of the Upper Paleozoic and Mesozoic sedimentary strata and their diamond mineralization.

Key words: ancient weathering crusts, upper Paleozoic and Mesozoic sedimentary strata.

1. Введение

Поиски кимберлитовых трубок в условиях развития пород верхнего палеозоя, мезозоя и трапповой формации осуществляются с помощью комплекса современных геолого-геофизических методов, которые постоянно совершенствуются и дополняются. Характерной особенностью погребенных трубок в ряде районов являются сложные взаимоотношения широко развитых здесь трапповых тел с вмещающими и перекрывающими трубки породами, с одной стороны, и непосредственно с кимберлитами – с другой. При послонных внедрениях долеритов в карбонатные и терригенно-карбонатные породы в верхние отслоенные части разреза (включая и верхние горизонты диатрем, испытывают вертикальные перемещения с амплитудами в десятки метров. Отторгнутые силами траппов отдельные блоки вмещающих и перекрывающих трубки пород и самих кимберлитов могут быть перемещены и в горизонтальном направлении на многие десятки и сотни метров, вплоть до вывода их на дневную поверхность. Таким же деформациям могут быть подвержены осадки фанерозоя, к которым приурочены механические ореолы рассеяния кимберлитовых минералов. При выносе их траппами на дневную поверхность может существенно искажаться фактическая поисковая ситуация. По мере опоскования новых перспективных территорий перечень этих особенностей постоянно расширяется. В отдельных районах Сибирской платформы (СП) присутствуют значительные по своим размерам инъективные структуры, обусловленные нарушением траппами сплошности кимберлитовмещающих пород цоколя, что существенно затрудняет проведение на таких территориях палеогеологических и палеогеографических реконструкций. Выявлены значительные перспективные площади, где траппы залегают непосредственно на породах карбонатного цоколя, усложняя условия поисков. Установлены интенсивные изменения кимберлитов и слагающих их минералов под воздействием дифференцированных трапповых интрузий. Существенно меняются физико-механические и минералогические особенности выходящих на поверхность пород под влиянием гипергенных процессов, понижая возможности существующего комплекса методов поисков алмазных месторождений. Все эти перечисленные задачи не в полной мере исследованы и их дальнейшие исследования важны как в научном, так и практическом аспектам.

2. Результаты исследований и их обсуждение

На древних платформах мира в алмазоперспективных районах широким развитием пользуются древние коры выветривания (КВ) на различных породах [1-3], а также отложения, обогащенные

продуктами их размыва и переотложения в различных фациальных обстановках [4-6]. Сохраняются от размыва элювиальные продукты только при стечении благоприятных факторов преимущественно в понижениях древнего рельефа и в тектонически опущенных блоках. Наиболее детально КВ в алмазоносных регионах изучены в Малоботуобинском (МБАР), Далдыно-Алакитском (ДААР) и Средне-Мархинском (СМАР) районах Сибирской платформы (СП), в которых благоприятные палеогеографические условия для формирования выветрелых толщ существовали в позднедевонское-раннекаменноугольное и средне-позднетриасовое время. Поскольку на рассматриваемой территории в конце девона произошло сокращение морского бассейна [7-9], то на северо-западе и северо-востоке Тунгусской верхнепалеозойской синеклизы (ТВС) сформировались прибрежные низменные равнины, а на юге как этой, так и Вилуйской мезозойской наложенной синеклизы (ВМНС), возникли равнины с континентальным осадконакоплением, которые разделялись более высокими денудационными плато. Выравнивание пенепленизированного рельефа и образование элювия на исходных породах протекало постепенно на протяжении всего периода формирования территории, при котором продукты КВ поступали в коррелятивные толщи равномерно, что связано со незначительными в это время изменениями тектонического режима и палеорельефа. Поэтому отложения нижнего карбона ТВС отражают погребенную поверхность выравнивания на границе девона и карбона и по всему разрезу обогащены продуктами выветривания, представляя тем самым формацию древних КВ [10]. В пределах упомянутых выше основных алмазоносных районов СП, расположенных в пределах Якутской алмазоносной провинции (ЯАП), древние КВ развиты на различных породах: терригенно-карбонатных нижнего палеозоя, долеритах, туфах и туфобрекчиях трубчатых тел, туфогенных образованиях корвунчанской свиты и кимберлитах. В структурном плане древние КВ приурочены преимущественно к конседиментационным палеоподнятиям [1-3], в пределах которых в период формирования перекрывающих их отложений развивались обстановки денудационных и денудационно-аккумулятивных равнин. В конседиментационных палеоподнятиях, служивших местами аккумуляции переотложенного материала КВ были неблагоприятные условия для интенсивного корообразования. В отдельных разрезах устанавливаются верхние горизонты КВ, свидетельствующие о формировании в них полных профилей. Подобные палеогеоморфологические особенности развития и распределения характерны и для средне-позднетриасовые КВ на аналогичных породах, которые в МБАР формировались в двух различных структурно-формационных зонах [5], резко отличающихся условиями развития и сохранения элювиальных продуктов. Одна из них охватывает всю северо-западную половину территории района и в структурном отношении совпадает с северо-западным бортом Ангаро-Вилуйского наложенного мезозойского прогиба (АВНМП), являвшегося на протяжении длительного времени (норий-ранний лейас) денудационной, и только в плинсбахе – денудационно-аккумулятивной поверхностью. Здесь ко времени корообразования были развиты верхнепалеозойские терригенно-вулканогенные отложения, а также породы трапповой формации (долериты, туфы и туфогенные образования) нижнего триаса. Только в полосе шириной примерно 25-30 км вдоль бровки северо-западного борта АВНМП в то время обнажались терригенно-карбонатные породы нижнего палеозоя, подвергающиеся интенсивному корообразованию. Вторая – юго-восточная зона района, совпадающая с центральной частью АВНМП, где в среднем и позднем триасе обнажались терригенно-карбонатные породы нижнего палеозоя, была неблагоприятной для интенсивного корообразования. В процессе выветривания разрушенный материал субстрата сносился в пониженные участки центральной части прогиба. Возможно, на небольших поднятиях в прогибе КВ могла достигать значительной мощности. В ДААР также устанавливается приуроченность КВ к палеоподнятиям и их склонам. Поля развития площадных остаточных КВ на терригенно-карбонатных породах ордовика и силура тяготеют к Чукук-Мархинскому и Верхне-Алакитскому поднятиям и их склонам, на которых устанавливаются фрагменты более мощных (до 15 м) и широких (по площади) элювиальных толщ.

В позднедевонское-раннекаменноугольное время на большей части территории Непско-Ботубинской и Анабарской антеклиз и их склонов, а также почти на всей площади МБАР и ДААР выветриванию подвергались повсеместно обнажавшиеся *терригенно-карбонатные породы нижнего палеозоя*. В средне-позднетриасовое время корообразование на этих породах происходило только в юго-восточной части МБАР. Из-за значительно большего эрозионного среза пород в допозднепалеозойское время, чем в дораннеюрское, сохранность средне-позднетриасовых КВ оказалась здесь значительно лучшей, чем позднедевонских-раннекаменноугольных. Пелитоморфные продукты выветривания этих пород представлены исключительно диоктаэдрическими минералами. На самой ранней стадии выветривания - это первичные минералы (гидрослюды и монтмориллонит-гидрослюдистое смешанослойное образование - МГСО), а на более поздних стадиях и вторичные минералы (типа каолинита). Особенностью глинистой составляющей КВ терригенно-карбонатных пород, независимо от времени их формирования, следует считать повсеместное присутствие в её составе диоктаэдрической гидрослюды $2M_1$ с Al и Fe^{3+} в октаэдрических позициях. Характерным минералом в продуктах выветривания этих пород является также МГСО с различной тенденцией к упорядоченности показывая, что выветривание терригенно-карбонатных пород резко отличается от характера изменения в гипергенных условиях магматических пород региона (долеритов, туфов и туфогенных образований, а также кимберлитов).

Учитывая общие черты в вещественном составе продуктов выветривания *пород трапповой формации (туфов, туфогенных образований и долеритов)*, целесообразно рассматривать их минералого-геохимические особенности совместно, акцентируя внимание не только на отличительных чертах состава, характеристике первичных минералов, но и на некоторых аспектах строения и кристаллической структуры, что подчеркивает главнейшие типоморфные признаки элювиальных продуктов. Характерными минералами легкой фракции выветрелых пород трапповой формации являются в различной степени измененные плагиоклазы (от андезина до битовнита) и гейландит. Вверх по разрезам в породах обычно увеличивается содержание олигоклаза, что связано с меньшей устойчивостью средних и основных плагиоклазов. В слабо измененных зернах плагиоклазов довольно часто наблюдаются полисинтетические двойники. Гейландит в породе представлен мелкими угловатыми пластинчатыми обломками неправильной формы. Довольно характерными для КВ туфов и туфогенных пород можно считать также выделения аллофана. Типоморфным минералом тяжелой фракции пород трапповой формации является ильменит [1-3]. В КВ долеритов обычно доминируют толстотаблитчатые и пластинчатые кристаллы минерала с хорошо развитыми гранями и угловатые обломки с реликтами огранки. В КВ туфов и туфогенных пород зерна ильменита преимущественно неправильной формы со сглаженными краями, реже – остроугольные обломки. Характерна для выветрелых пород трапповой формации значительная концентрация амфиболов, моноклинных пироксенов, эпидота, клиноцоизита, цоизита, турмалина, циркона, дистена и вулканического стекла. Среди тяжелых аутигенных минералов резко доминируют разнообразные выделения гидроксидов железа, что придает им буроватую окраску. Для глинистых минералов из слабо измененных долеритов является Mg- Fe^{3+} -монтмориллонит, ассоциирующий с вермикулитом. Обе фазы являются сегрегированными друг от друга и в структурном отношении представляют механическую смесь. Данное смешанослойное образование характеризуется беспорядочным наложением слоев в структуре и пониженными значениями параметра b (0.894-0.896 нм) элементарной ячейки. Происходящее значительное перераспределение Si и вынос его избытка и железа из структуры первичных минералов обуславливает первоначальное развитие каолинита в средних частях наиболее измененных профилей, а в отдельных трубчатых телах туфогенных пород (Ан-49) и гиббсита. Для установления закономерностей преобразования *кимберлитов* и определения типоморфных особенностей продуктов их выветривания проведено [4] комплексное исследования профилей выветривания СП, Восточно-Европейской платформы (ВЕП) и Гвинеи. Для легких фракций образований КВ кимберлитовых пород характерно постоянное присутствие бледно-оливковых и желтовато-зеленых чешуек флогопита и продуктов его изменения (хлорита и вермикулита),

обломков серпентина, а также глинисто-карбонатных агрегатов, состоящих преимущественно из смеси глинистых минералов, кальцита и доломита. В сильно химически переработанных продуктах выветривания кимберлитов увеличивается количество пирропа, корродированного по кубоидному типу [1]. Нередки в КВ кимберлитов зерна пирропа с белесой рубашкой, столь характерной для древних россыпей района. Как для плотных, так и для выветрелых кимберлитов характерны пирропы с келифитовой каймой. В зависимости от степени выветрелости кимберлитов, отмечены различные следы изменения оливина (вплоть до полной его серпентинизации), пироксенов, хромшпинелидов и пикроильменита. В глинистой составляющей продуктов выветривания кимберлитов, кроме содержащихся в легкой фракции серпентина, хлорита и вермикулита, присутствует также монтмориллонит, МГСО и гидрослюда. Судя по значению $b=0,893$ нм, в октаэдрических сетках структуры разбухающих минералов содержатся в основном Fe^{3+} и Al. В нижних и средних частях КВ кимберлитов эта смешанослойная фаза характеризуется тенденцией к упорядоченному чередованию пакетов. К верхам профилей в ней появляются явные элементы разупорядочения структуры, в лабильных промежутках (как и в монтмориллоните), преобладают Mg и Ca. Во фракции мельче 0,001 мм слабо измененных кимберлитов (преимущественно зона дезинтеграции) серпентин представлен пластинчатой разновидностью, структура которой состоит из слоев типов А и В [2]. Сохраняется минерал вплоть до самых верхов профилей выветривания, где характеризуется только политипом А. При этом для частиц новообразованного политипа (А) вначале характерна округлая глобулярная форма (размер глобул до 0,5 мкм). Глобулы сочленяются в вытянутые червеподобные сростки длиной в несколько микрометров. Вверх по разрезу увеличиваются размеры частиц новообразованного серпентина и его сростков. Свойственный слюде в кимберлите политип 1М обуславливает сравнительно более быстрое накопление в продуктах диоктаэдризации Al, чем выветривание слюды $2M_1$ в терригенно-карбонатных породах.

Продолжительность периодов корообразования, протекающих при теплом влажном климате и относительно хорошем дренаже территории, существенно влияет на мощность элювиальных толщ и на количество алмазов, высвобождающихся из этих толщ при их образовании, либо непосредственно на кимберлитах, либо в продуктах их ближнего переотложения во вторичных коллекторах. Оценивая с этих позиций изложенные выше данные о древних КВ основных алмазоносных районах СП как в целом, так и в наиболее богатых алмазами МБАР и ДААР, можно отметить, что в позднедевонское-раннекаменноугольное и средне-позднетриасовое время здесь существовали благоприятные условия для интенсивного корообразования. Об этом свидетельствуют, в первую очередь, сохранившиеся от размыва мощные коры выветривания с высокозрелыми верхними горизонтами. Непосредственно в КВ россыпи алмазов формируются только над кимберлитовыми трубками, что приводит к ограниченному их размеру [1]. На других породах россыпи не образуются, за исключением случаев, когда субстратом являются вторичные коллекторы алмазов (например, верхнепалеозойские отложения). Поэтому важное значение имеет установление условий размыва и переотложения продуктов КВ при накоплении верхнепалеозойских и мезозойских отложений, детально изученными нами в пределах МБАР, где они одновременно пользуются широким развитием. Следует отметить ситуацию, если формирование этих отложений (и в первую очередь их грубообломочных горизонтов) происходило в условиях накопления делювиально-пролювиальных, пролювиально-аллювиальных и озерных фаций (т.е. за счет преимущественно ближнего сноса местного материала), то тогда вблизи кимберлитовых тел формировались россыпи алмазов. При обильном привносе чуждого региону терригенного материала и развитие аллювиальных фаций происходили при размыве КВ на кимберлитах и приводили к выносу обогащенных алмазами продуктов за пределы локальных участков и сильному разубоживанию их за счет «транзитного» неалмазоносного аллювия. В таких условиях образование алмазных россыпей становилось практически невозможным. Переотложение продуктов выветривания вблизи областей денудации и накопление их в основном в пресноводных континентальных водоёмах, а также небольшая мощность сформировавшихся осадочных толщ и незначительные погружения их определили, в частности, слабое гидрохимическое воздействие среды на аллотигенные

минералы, а также отсутствие наложенных на них процессов катагенетического преобразования. Эти условия привели к тому, что глинистые минералы верхнепалеозойских и мезозойских осадочных толщ основных алмазоносных районов СП, связанные с процессами переотложения различных продуктов выветривания, определенным образом наследуют структурные и кристаллохимические особенности минералов из элювиальных толщ. Это позволяет использовать типоморфные признаки однотипных минералов легкой, тяжелой и глинистой фракций, а также геохимические особенности выветрелых пород для идентификации в осадочных толщах продуктов, поступивших из источников сноса связанных с гипергенными изменениями пород различного химического и минералогического состава.

На протяжении *позднего палеозоя* в МБАР (северо-восточный борт ТВС) унаследованное и некомпенсированное опускание отдельных участков территории привело к образованию ряда конседиментационных депрессий: Ахтарандинской на западе, Улахан-Ботубинской, охватывающей нижнее течение р. Б.Ботубии, и Кюеляхской – в верховье р.Кюелях. Между этими депрессиями располагаются участки, испытавшие относительно замедленное опускание территории. Так, на западе района установлено Чернышевское поднятие, а в районе Улу-Тогинской петли р.Виллой – Улу-Тогинское, совпадающее с осевой линией Улу-Тогинского поднятия. Все это обусловило образование в пределах поднятий и их склонов осадков, обогащенных местным, а в депрессиях – преимущественно чуждым району материалом. Хотя в районе пока не обнаружены кимберлитовые трубки, перекрытые верхнепалеозойскими отложениями, однако находки в базальных горизонтах этих поднятий заметных концентраций алмазов и других индикаторных минералов кимберлитов (ИМК) со специфическими свойствами позволяют предполагать присутствие на этой территории еще неоткрытых коренных источников. В позднедевонское-раннекаменноугольное время неоткрытые пока кимберлитовые диатремы подвергались эрозии и высвободившийся вследствие выветривания кимберлитовый материал формировал россыпи различных генетических типов. Главнейшими образованиями верхнего палеозоя МБАР, в формировании которых значительную роль сыграли позднедевонские-раннекаменноугольные КВ, являлись породы лапчанской (P_1l), ботубинской (P_1bt) и боруллойской (P_2br) свит. Преобладание в базальных горизонтах *лапчанской свиты* крупнообломочного материала из местных источников сноса (известняки, известковистые песчаники, доломиты и др.), полевошпатово-кварцевый (нередко до кварцевого) состав минералов легкой фракции, обедненный комплекс минералов тяжелой фракции (с преобладанием их аутигенных разностей) указывают на преобладание в составе пород лапчанской свиты материала переотложенной КВ на терригенно-карбонатных породах. В разрезах лапчанской свиты, непосредственно залегающих на КВ терригенно-карбонатных пород, в нижних горизонтах отмечены [5] максимальные концентрации каолинита и диоктаэдрической гидрослюда $2M_1$. Однако отмечены случаи, когда в пробах из нижних базальных горизонтов этих толщ указанная гидрослюда отсутствует вообще, подчеркивая неравномерность распределения выветрелого материала данного типа. Для пелитовой составляющей лапчанской свиты свойственна также повышенная концентрация Mg-Fe-хлорита, по структурно-морфологическим особенностям близкого к установленному в КВ терригенно-карбонатных пород. Это, как содержание и состав грубообломочного материала, а также минеральные парагенезисы легкой, тяжелой и глинистой фракций, позволяет утверждать, что в период формирования осадков лапчанской свиты в них преобладали продукты переотложения КВ терригенно-карбонатных пород нижнего палеозоя и кластических образований среднего палеозоя. Значительно меньшую роль играли в этом процессе выветрелые продукты основного и ультраосновного состава. В грубообломочном комплексе образований *ботубинской свиты* отмечено повышенное (до 60%) содержание гальки кварцитов. Отсортирован обломочный материал в базальных горизонтах этой свиты обычно плохо. Как и для лапчанской свиты, в базальных горизонтах ботубинской свиты не отмечены четкие закономерности распределения главнейших минералов легкой, тяжелой и глинистой фракции, что указывает на неравномерное распределение здесь материала древних КВ. Основные порообразующие минералы ботубинской свиты – кварц и полевые шпаты. Весьма типичны здесь минералы группы

эпидота, среди которых, в отличие от лапчанской свиты, преобладает эпидот. Отдельные прослои обогащены чешуйчатыми выделениями биотита, лепидомелана, мусковита и хлорита. Для тяжелой фракции характерно присутствие в различной степени окатанных зерен циркона, турмалина и апатита. В отличие от лапчанской свиты, в нижних горизонтах ботубобинской увеличивается концентрация монтмориллонита, неупорядоченных МГСО и вермикулит-монтмориллонитовых смешанослойных образований (ВМСО), что свидетельствует о возрастании в этих горизонтах роли продуктов выветривания пород основного и ультраосновного составов и уменьшении роли продуктов выветривания терригенно-карбонатных пород. На это указывает также сравнительно меньшие концентрации диоктаэдрической гидрослюды $2M_1$ и каолинита с относительно упорядоченной структурой. Нередко отмечается достаточно высокая концентрация каолинита по всему разрезу свиты, что связано с поступлением его из верхних горизонтов КВ на породах трапповой формации. В грубообломочном материале *боруллойской свиты* увеличивается содержание обломков кварца. Основное отличие пород этой свиты от нижележащих каменноугольно-пермских отложений сводится к присутствию слюдистых минералов (биотита, мусковита и лепидомелана).

В *мезозойское время* в пределах большей части МБАР, территориально совпадающей с АВНМП, существовали две структурно-формационные зоны, которые характеризовались специфическими особенностями строения, наложившими определенный отпечаток на формирующиеся осадки. Материал древних КВ попадал в бассейны седиментации в период формирования здесь континентальных отложений иреляхской ($T_3 - J_{1ir}$) и укугутской (J_{1uk}), а также прибрежно-морских плинсбахского (J_{1p}) и тоарского (J_{1t}) ярусов. В отложениях *иреляхской свиты* псефитовые породы представлены [5] гравелитами, конгломератами, брекчиями, а также рыхлыми галечно-щебеночными отложениями. В основании разреза они обычно образуют линзы и прослои, а по разрезу отмечаются только рассеянные гальки и гравий. Наибольшая мощность прослоев грубообломочных пород отмечена в нижней толще иреляхской свиты в пределах приосевой части АВНМП, где обломочный материал представлен преимущественно (до 80%) сравнительно хорошо окатанными разнообразными (метаморфическими, кислыми, средними, щелочными изверженными и интрузивными) чуждыми району породами. Для иреляхских отложений вдоль отмеченной полосы АВНМП развиты глины с прослоями тонкозернистых песков и алевритов. Полные разрезы свиты сохранились здесь в Иреляхской и Мачобинской депрессиях. Стратотипом иреляхских отложений этого района считаются [4] разрезы древней россыпи, расположенной в локальной впадине на борту Иреляхской мезозойской депрессии. Повышенная концентрация продуктов переотложения древних КВ отмечается в нижних горизонтах свиты. Неравномерно распределяется и выветрелый материал кимберлитов. При этом наблюдается и различная дальность его переноса, что, кроме различного морфологического облика ИМК и самих алмазов, подтверждается и установлены нами [5] присутствием здесь некоторых вторичных минералов, характерных для кимберлитов: Fe-Mg-хлорита, вермикулита и серпентина политипной модификации А. О незначительном переносе этих минералов свидетельствуют их структурно-морфологические особенности и приуроченность к иреляхским алмазоносным россыпям МБАР, сформированным вблизи от коренных месторождений. Отложения *укугутской свиты* в целом характеризуются незначительной концентрацией продуктов переотложения древних КВ. В отложениях *плинсбахского яруса* крупнообломочные породы пользуются ограниченным распространением. Их петрографический состав менее разнообразен, чем в укугутской свите, и обычно тесно связан с составом местных пород. Широко развиты в плинсбахских отложениях псаммитовые образования (аркозовой и граувакковой групп), что характерно и для аналогичных пород *тоарского яруса*. От аналогичных образований укугутской свиты, отложения плинсбахского и тоарского ярусов отличаются более высоким содержанием литоидных обломков и их составом.

3. Заключение

Таким образом, проведенные исследования позволяют утверждать, что позднедевонские-раннекаменноугольные и средне-позднетриасовые эпохи характеризуются активным развитием процессов корообразования, протекающих в условиях теплого и влажного климата, в результате чего образовались соответствующие формации КВ. Сложный многокомпонентный состав исходных пород в древних КВ СП (за исключением терригенно-карбонатных пород), содержащий ди- и триоктаэдрические минералы, в структуре которых есть трех- и двухвалентные породообразующие элементы, обусловил замедленное преобразование первичного материала. В результате формирования разрезов КВ зачастую приостановилось на начальных стадиях. Развитие неполных профилей выветривания вызвано прежде всего слабым выносом двухвалентных катионов из первичных минералов. Поэтому вновь возникающие фазы будут диоктаэдричными и нередко сохраняют смешанный состав структурных катионов. Поскольку в продуктах выветривания преобладает пелитовая составляющая, важнейшими типоморфными признаками глинистых образований в изученных КВ являются: а) повсеместное присутствие диоктаэдрической гидрослюды ($2M_1$) в КВ терригенно-карбонатных пород и её постоянная ассоциация в наиболее зрелых профилях с каолинитом относительно наиболее упорядоченной структуры, чем у каолинита, образовавшегося за счет других пород; б) постоянное наличие в разрезах КВ пород трапповой формации (долериты, туфы и туфогенные образования) наряду с ди- и триоктаэдрическим монтмориллонитом, а также неупорядоченным ВМСО, в той или иной мере неупорядоченного каолинита, ассоциирующего в КВ туфогенных пород с галлуазитом (при полном отсутствии в продуктах выветривания слюдоподобных минералов); в) содержание в КВ кимберлитов совместно с поликатионным монтмориллонитом, значительного количества триоктаэдрического хлорита (пакеты δ' и δ), серпентина (структурные типы А и В) и в значительной степени измененного флогопита, в том числе и связанной с ними гидрослюды 1М. Кроме того, установлено, что в изученных КВ смешанослойным образованиям в зависимости от природы исходных минералов, за счет которых они возникли, свойственны как различные виды переслаивания пакетов, так и неодинаковый химический состав в одном и том же типе указанных фаз, что является их важным типоморфным признаком. В частности, ВМСО развито в породах, в которых отсутствуют минералы слюдоподобного типа, а из трехэтажных разновидностей встречается в основном вермикулит. Соответственно, МГСО приурочены к породам, содержащим минералы трехэтажного типа с К в межслоевых промежутках, т.е. типично слюдистого типа. По кристаллохимическим особенностям указанная смешанослойная фаза в КВ кимберлитов отличается от аналогичной в измененных терригенно-карбонатных породах. Это связано с иными природой и химизмом исходного материала, за счет которых в кимберлитах возникло указанное образование, представленное продуктами диоктаэдризации флогопита и дальнейшей его деградации.

4. Литература

- [1] Nitrov 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. – P. 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. – P. 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. – P. 576-588.
- [4] Afanasiev V.P., Zinchuk N.N., Koptil V.I. Polytypes of diamonds in connection with the problem of primary placers of the north-east of the Siberian platform. – 1998. – T.361. – №-3. – P. 366-369.
- [5] 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. – P. 1-13.

- [6] Zinchuk N.N., Melnik Yu.M., Serenko V.P. Apokimberlite rocks // *Geology and geophysics*. – 1987. – №-10. – P. 66-72.
- [7] Kotelnikov D.D., Zinchuk N.N. Typomorphic phic features and paleogeographic Significance of mica minerals // *Izvestiya VUZov. Geologiya and razvedka*. – 1996. – №-1. – P. 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. – P. 576-588.
- [9] Zinchuk N.N., Zuev V.M., Koptil V.I., Cherny S.D. Diamond management strategy and results // *Gorny vestnic*. – 1997. – №-3. – P. 53-57.
- [10] 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. – P. 50-84.

ГЕОХИМИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПЕРМСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ КРАЕВЫХ ПРОГИБОВ ВИЛЮЙСКОЙ СИНЕКЛИЗЫ

Ираида Зуева, Ольга Чалая, Владимир Каширцев, Сара Лифшиц, Юлия Глязнецова
ФГБУН ФИЦ «ЯНЦ СО РАН» «Институт проблем нефти и газа СО РАН»,
677007, Россия, г. Якутск, ул. Автоторожная, 20

GEOCHEMISTRY OF ORGANIC MATTER PERMIAN DEPOSITS OF MARGINAL TROUGHS OF THE VILYUI SYNECLISE

Iraida Zueva, Olga Chalaya, Vladimir Kashirtsev, Sara Lifshits, Yuliya Glyaznetsova,
Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, 20, Avtodorozhnay str., Yakutsk, 677007, Russia

Annotation. The paper presents the results of a complex geochemical study on organic matter and the composition of bitumoids and their fractions of potentially oil source rocks of Permian deposits of the Predverkhoyansk and Leno-Anabar troughs. The data obtained on geochemistry showed that, according to the set of hydrocarbon-biomarkers, dispersed organic matter of Permian deposits of the marginal troughs corresponded to the initial organic matter of a mixed composition with a predominance of terrigenous components and was capable generating a large amount of liquid hydrocarbons along with gaseous ones. Based on the common genetic type of the initial organic matter of Permian deposits in the Lena-Anabar trough and the Vilyui syncline as the similarity of the composition of bitumoids at the same catagenesis gradations, we can conclude the processes of oil and gas formation in these deposits to be the same direction. All of this allows us to approach the assessment of their oil and gas source potential from a common position. Thus, Permian deposits of the marginal troughs of the Vilyui syncline can be considered as gas and oil source deposits, as well as the central part of the Lena-Vilyui sedimentary basin.

1. Введение

На территории Лено-Виллюйской нефтегазоносной провинции наиболее изученной является Виллюйская нефтегазоносная область (НГО). Степень изученности краевых прогибов и, в частности Предверхоянского и Лено-Анабарского, значительно отстает как по геофизическим исследованиям, так и по глубокому бурению. Соответственно, геохимическая изученность остаётся невысокой и весьма неравномерной.

Целью работы было комплексное геохимическое исследование потенциально нефтегазоматеринских пород пермских отложений Предверхоянского и Лено-Анабарского прогибов в связи с необходимостью возвращения поисково-разведочных работ на бортовые склоны Виллюйской синеклизы.

2. Материал и методы исследования

Объектами исследований послужило рассеянное органическое вещество (РОВ) пород пермских отложений Предверхоянского и Лено-Анабарского прогибов на разных грациях катагенеза.

Методика исследований. Аналитические определения выполнены по общепринятой схеме битуминологических исследований с использованием современных методов анализа [1]. Комплекс аналитических исследований включал определение в породах органического углерода ($C_{орг}$) методом сжигания, горячую экстракцию хлороформных битумоидов (ХБ) из пород, определение группового компонентного и глеводородного 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 $4000-600\text{см}^{-1}$, в кювете с окошками KBr, толщина $33 \times 10^{-6}\text{м}$. Хромато-масс-спектрометрические (ГХ/МС) исследования насыщенных 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 (ТИС) 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, разработанной Г.М. Парпаровой, С.Г. Неручевым и др. [2].

3. Результаты

Для пермского разреза характерно неравномерное чередование песчаников, алевролитов и аргиллитов с преобладанием в отдельных частях разреза тех или иных литологических разностей. РОВ пород имеет смешанную природу с различным по разрезу и площади соотношением аквагенной и террагенной составляющих [3]. Для краевых депрессий характерно преобладание террагенной составляющей. Степень катагенетической преобразованности ОВ изученных образцов изменяется в диапазоне от ПК₃ до МК₄ в соответствии со шкалой катагенеза [2]. Полученные результаты показали (таблица 1), что в целом по геохимической характеристике на начальном этапе мезокатагенеза ХБ пород пермских отложений Лено-Анабарского и Предверхоаянского прогибов достаточно близки с ХБ одноименных отложений Вилуйской синеклизы, РОВ которых достаточно хорошо изучено по многочисленным образцам керна [3,4]. Методами органической геохимии изучен состав синбитумоидов и их генетическая взаимосвязь с природой исходного ОВ континентальных фаций. Для террагенного ОВ верхнепермских отложений выявлены УВ-биомаркеры, которые могут рассматриваться как индикаторы ОВ терригенных, часто угленосных материнских пород, формировавшегося в нейтральной или окислительной обстановке диагенеза [3-6]. На основе анализа и систематизации геохимической информации о составе УВ-флюидов в нефтяных оторочках и ХБ РОВ из разновозрастных отложений были выявлены генетические связи скоплений УВ с потенциально «нефтематеринскими» породами [5,7, 8].

Нижнепермские отложения Лено-Анабарского и Предверхоаянского прогибов характеризуются большими вариациями содержания $C_{орг}$ (0,24-4,32%) и выхода ХБ от низких 0,005% до повышенных значений 0,075% в Лено-Анабарском прогибе. В элементном составе ХБ установлено высокое содержание углерода и низкое водорода, в групповом составе преобладают асфальтово-смолистые компоненты. В химической структуре ХБ по данным ИК-спектromетрии доминируют ароматические циклы (D'_{1600}) при разном участии алифатических структур (D'_{720}), в большом интервале изменяется содержание карбонильных (D'_{1700}), гидроксильных групп (D'_{3300}) и сложноэфирных групп и связей (полосы поглощения - п.п. 1170,1250,1290 cm^{-1}) вплоть до очень высоких значений $D'_{1700} > 1$. Более высокая ароматичность и окисленность ХБ отмечается в образцах из обнажений Предверхоаянского прогиба. В составе УВ преобладают нафтеново-ароматические соединения. В углеводородной части ХБ более половины углерода сконцентрирована в ароматических циклах. Такие особенности состава соответствуют природе смешанного ОВ с преобладанием террагенной составляющей.

Насыщенные УВ характеризуются высоким содержанием н-алканов с преобладанием в их составе относительно высокомолекулярных гомологов с максимумом распределения на $nC_{23,25,27}$, повышенными значениями коэффициента $nч/ч$, низкой долей изопреноидов и преобладанием пристана над фитаном (таблица 1). Состав и характер распределения насыщенных УВ типичен для смешанного типа ОВ с преобладанием террагенной составляющей.

Верхнепермские отложения, как и нижнепермские, характеризуются значительными вариациями в содержании $C_{орг}$, в больших пределах изменяется выход ХБ. По элементному и групповому составу они близки битумоидам РОВ отложений нижней перми (таблица 1).

Таблица 1 – Геохимическая характеристика РОВ и битумоидов пермских отложений на начальных грациях мезокатагенеза.

| Территория | Виллойская синеклиза | Лено-Анабарский прогиб | | Предверхо-янский прогиб |
|---|----------------------|------------------------|---------------|-------------------------|
| Параметры: | верхняя пермь | верхняя пермь | нижняя пермь | нижняя пермь |
| $C_{орг}, \%$ | 0,17 – 4,87 | 1,58 – 2,44 | 2,18 – 3,16 | 0,24 – 4,32 |
| $\alpha_{хб}, \%$ | 0,029 – 0,275 | 0,008 – 0,019 | 0,039 – 0,044 | 0,005 – 0,075 |
| $\beta_{хб}, \%$ | 2,58 – 5,65 | 0,38 – 0,48 | 1,22 – 2,00 | 0,19 – 2,43 |
| Элементный состав, %: | | | | |
| С | 82,98 – 86,40 | 79,69 – 82,70 | 82,15 – 82,52 | 78,55 – 83,61 |
| Н | 7,60 – 9,96 | 8,78 – 10,56 | 8,52 – 8,70 | 8,64 – 9,11 |
| Γ_a | 4,89 – 8,81 | 7,48 – 11,53 | 8,64 – 8,75 | 5,55 – 12,67 |
| Групповой компонентный состав ХБ, % | | | | |
| масла | 24,48 – 49,54 | 24,02 – 25,00 | 27,22 – 30,58 | 38,33* |
| бензолные смолы | 9,32 – 15,35 | 10,00 – 22,35 | 11,08 – 11,92 | 15,12 |
| спирто-бензолные смолы | 14,12 – 32,78 | 37,15 – 40,00 | 30,05 – 36,92 | 18,33 |
| Σ смол | 25,09 – 43,15 | 50,00 – 59,50 | 41,13 – 48,84 | 33,45 |
| асфальтены | 6,55 – 37,45 | 16,48 – 25,00 | 23,94 – 28,28 | 28,22 |
| УВ-состав, % на Σ УВ | | | | |
| М -Н | 24,34 – 47,91 | 71,85 | | 42,08 |
| | () | | | |
| Н-А | 52,09 – 75,66 | 28,15 | | 57,92 |
| Структурно-групповой состав ХБ по данным ИКС, относительные коэф. поглощения, $D'_v = D_v/D_{1460}$ | | | | |
| D'_{720} – длинных метилен. цепей | 0,14 – 0,22 | | 0,17 – 0,18 | 0,07 – 0,19 |
| D'_{1600} – ароматических циклов | 0,40 – 0,70 | | 0,53 – 0,63 | 0,53 – 0,87 |
| Территория | Виллойская синеклиза | Лено-Анабарский прогиб | | Предверхо-янский прогиб |
| Параметры: | верхняя пермь | верхняя пермь | нижняя пермь | нижняя пермь |
| D'_{1700} – карбонильных групп | 0,26 – 0,71 | | 0,51 – 0,78 | 0,88 – 1,39 |
| D'_{3300} – гидроксильных групп | 0,04 – 0,20 | | 0,18 – 0,21 | 0,09 – 0,29 |
| Распределение индивидуальных насыщенных УВ | | | | |
| $\Sigma_{н.к.-nC_{20}}/\Sigma_{nC_{21-к.к.}}$ | 0,61 – 0,90 | 0,20 | 0,71 – 1,15 | 0,08 |
| Максимум н-алканов | nC_{23-27} | $nC_{25,27}$ | $nC_{21,23}$ | $C_{23,25}$ |
| Коэффициент нч/ч | 0,93 – 1,03 | 1,22 | 1,09-1,16 | 1,55 |
| Изопреноиды/н-алканы | 0,09 – 0,16 | 0,004 | 0,10-0,15 | 0,01 |
| Пристан/фитан | 1,29 – 2,50 | 0,25 | 3,35-3,93 | 1,00 |
| Пристан/ nC_{17} | 0,61 – 0,65 | 0,33 | 0,82-0,84 | 0,67 |
| Фитан/ nC_{18} | 0,22 – 0,54 | 0,40 | 0,17-0,22 | 0,23 |

В углеводородном составе преобладают нафтеново-ароматические УВ. Метаново-нафтеновые УВ характеризуются повышенной долей н-алканов, преобладанием относительно

высокомолекулярных гомологов с максимумами распределения в области $n_{C_{21-27}}$, а также низким соотношением изопреноиды/н-алканы, и преобладанием пристана над фитаном. В структурно-групповом составе ХБ, как и в РОВ нижнепермских отложений преобладают ароматические циклы. Установленные особенности состава, химической структуры ХБ и распределения насыщенных УВ хорошо коррелируют с битумоидами нижнепермских отложений.

По изученной коллекции наиболее полно представлен материал по отложениям нижней перми Лено-Анабарского прогиба. РОВ проанализированных образцов охватывает диапазон градаций от МК₁ до МК₄, которые неравномерно представлены по грациям катагенеза. Исходя из полученных результатов предпринята попытка проследить общую направленность изменения геохимических параметров РОВ и ХБ в зоне катагенеза

На начальных стадиях мезокатагенеза (МК₁) содержание $C_{орг}$ в породах составляет в среднем 2,58%, изменяясь в широких пределах от низких 0,13% до высоких значений – 8,27%. Выход ХБ также характеризуется большим разбросом значений от 0,005% до 0,075% и в среднем равен 0,031%. В химической структуре ХБ доминируют ароматические циклы. Следует отметить высокую окисленность ХБ ($D'_{1700} > 1$), что характерно для РОВ на грациях ПК. Доминирование относительно высокомолекулярных н-алканов с максимумом распределения на $n_{C_{25}}$ и низкое содержание изопреноидов, преобладание среди н-алканов гомологов с нечетным числом атомов углерода в молекуле, значение коэффициента нч/ч больше единицы характерно для ОВ низких стадий катагенеза (рисунок 1).

С нарастанием катагенеза от МК₁ к МК₄ уменьшается содержание $C_{орг}$ в породах. Выход ХБ на породу и $C_{орг}$ увеличивается вдвое от стадии МК₁ до МК₂. В элементном составе ХБ возрастает содержание углерода и уменьшается – гетероэлементов. Протекание процессов деструкции ОВ в зоне катагенеза отражает резкое снижение кислородсодержащих групп и связей в химической структуре ХБ, в частности D'_{1700} уменьшаются в 2 раза на стадиях МК₃ и МК₄ в сравнении с МК₁. Изменяется и характер ИК-спектров, в которых отчетливо проявляется поглощение длинноцепочечных алифатических структур в области $720-730\text{ см}^{-1}$, что может быть связано с появлением эпигенетичных битумоидов (микронифти).

На грациях катагенеза со стадии МК₂ до МК₄, наряду с генерацией УВ уже начинают отчетливо проявляться процессы эмиграции генерированных УВ. Наблюдается инверсия в изменении геохимических параметров, что обусловлено появлением в разрезе остаточных битумоидов. Так, содержание ХБ на породу уменьшилось в четыре раза, а на ОВ – в три. В составе ХБ отмечен большой разброс значений в пределах каждой стадии по содержанию масел от 12 - 30% на стадии МК₂ и от 17% до 87% - на МК₃, а также спектральных характеристик по степени окисленности и ароматичности ХБ.

В составе метаново-нафтеновых УВ в процессе созревания ОВ на грациях катагенеза от МК₁ до МК₃ возрастает доля относительно низкомолекулярных гомологов, наблюдается смещение максимума н-алканов с $n_{C_{25}}$ в низкомолекулярную область $n_{C_{17-19}}$, снижается значение коэффициента нч/ч и увеличивается доля изопреноидов (рисунок 1). Ряд биомаркерных параметров изменяется в сторону значений аквагенного ОВ, и они уже теряют генетическую информативность, при этом численные значения становятся типичными показателями для характеристики градаций мезокатагенеза [8,9].

Изменения гопановых УВ в процессе катагенетического преобразования ОВ можно проследить по стереохимическим перестройкам изомеров, отличающихся S или R конфигурацией гомогопанов C_{31-35} . В составе гомогопанов увеличивается отношение S-изомеров к R-изомерам и отношение T_s/T_m неогопана C_{27} к регулярному гопану C_{27} . В составе стерановых УВ повышается коэффициент созревания, т.е. отношение стеранов C_{29} ($14\alpha, 17\beta, 20R+20S/5\alpha 20R$).

Установленная направленность изменений в содержании ХБ и их составе характеризует процессы созревания ОВ, сопровождающиеся генерацией широкой гаммы УВ – сингенетичных битумоидов (микронифти). Катагенетические превращения в составе и химической структуре ХБ РОВ пермских отложений отчетливо проявляются на грациях катагенеза, начиная от МК₁ к МК₂-МК₃ и характеризуют проявление главной фазы нефтеобразования. С нарастанием

процессов генерации УВ происходили процессы эмиграции УВ, на что указывает присутствие в породах сингенетично-остаточных битумоидов. О процессах перераспределения внутри пермской толщи генерированных УВ можно судить по широкому распространению в этих отложениях вторичной битуминозности. Масс-хроматограммы масляных фракции эпибитумоидов из песчаников и синбитумоидов из аргиллитов отражают их сходство по составу и распределению насыщенных УВ, что свидетельствует о их генетической взаимосвязи (рисунок 1).

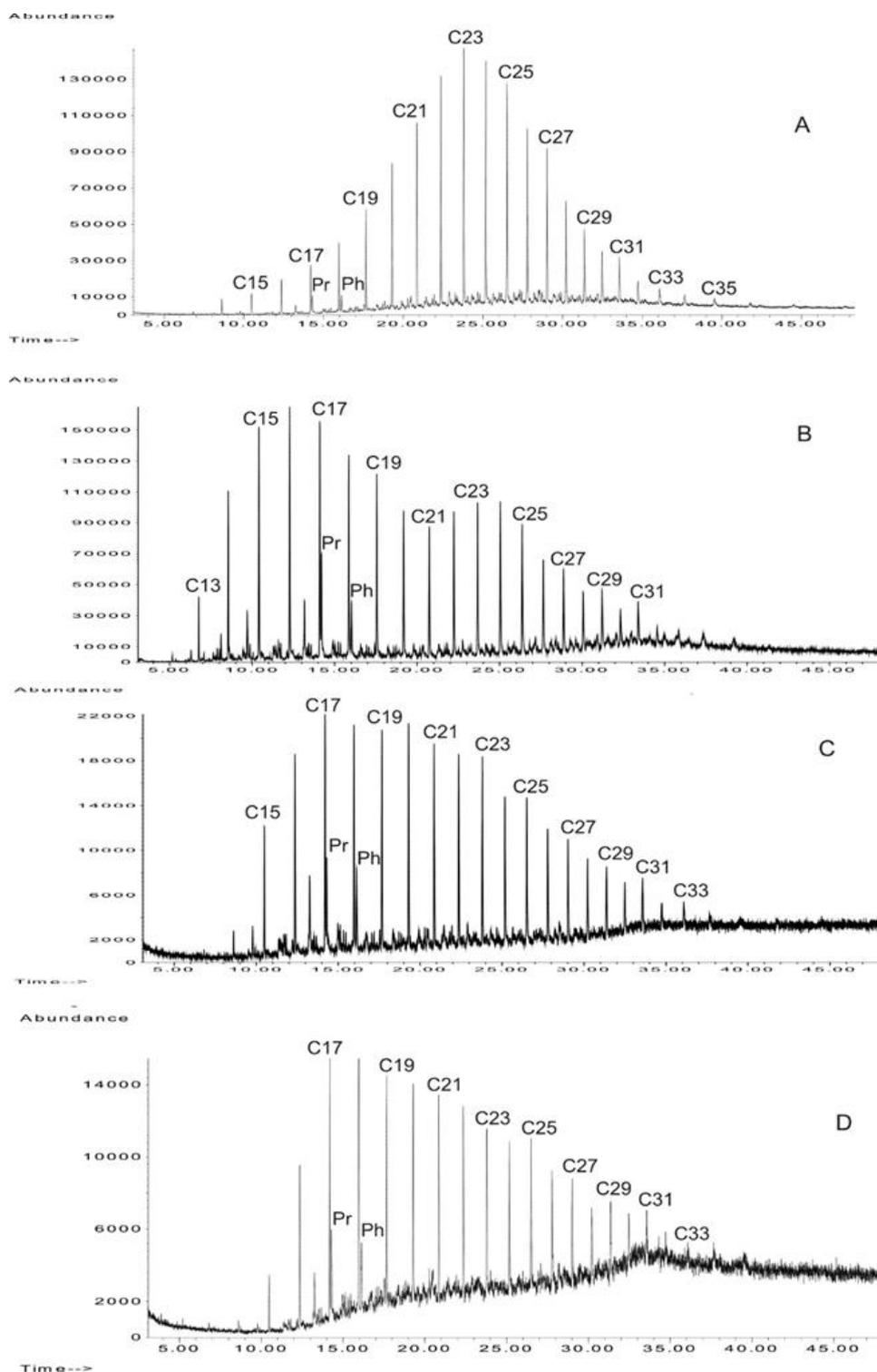


Рисунок 1 – Масс-фрагментограммы по m/z 57 масляных фракции син- и эпибитумоидов. Из зоны мезокатагенеза нижнепермских отложений Лено-Анабарского прогиба: А - синбитумоид, МК₁; В - синбитумоид, МК₃; С - синбитумоид, МК₃; D – эпибитумоид

4. Выводы

Приведённые результаты показывают, что по набору УВ-биомаркеров РОВ пермских отложений Предверхоаянского и Лено-Анабарского прогибов отвечает исходному ОВ смешанного состава с преобладанием террагенной составляющей и способно наряду с газообразными генерировать большое количество жидких УВ.

Исходя из единого генетического типа исходного ОВ пермских отложений в Лено-Анабарском прогибе и Вилуйской синеклизе и близости состава битумоидов РОВ на одноимённых грациях катагенеза, можно сделать вывод об общей направленности процессов нефтегазообразования в этих отложениях, что позволяет с единых позиций подойти к оценке их нефтегазоматеринского потенциала. Это позволяет пермские отложения краевых прогибов рассматривать как газонефтематеринские как и центральной части Лено-Вилуйского осадочного

Полученные результаты по органической геохимии будут использованы для количественной оценки нефтегазоносности изученной территории и выделения наиболее перспективных площадей для поиска залежей углеводородных флюидов.

Особое внимание должно быть уделено Вилуйской синеклизе, на склонах которой нефтематеринские кремнисто-карбонатно-сланцевые породы куонамской свиты достигают глубин, оптимальных для генерации жидких УВ. И, бесспорно, должно быть продолжено исследование пермских отложений, давших основную часть газово-конденсатных залежей для всего разреза синеклизы.

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] Guidance on the analysis of bitumen and dispersed organic matter of rocks. / ed. V.A. Uspensky. K.F. Rodionova, A.I. Gorsky, A.P. Shishkina. – Leningrad: Nedra, 1966 – 316 p.
- [2] Catagenesis and oil and gas potential. – Leningrad: Nedra, 1981. – 240 p.
- [3] Geochemistry of organic matter in oil and gas bearing deposits of Western Yakutia. – Novosibirsk: Science, 1984. – 113 p.
- [4] Izosimova A.N., Chalaya O.N. Relic hydrocarbons in organic matter and oils of Western Yakutia. – Novosibirsk: Science, 1989. – 127 p.
- [5] Kashirtsev V.A. Organic geochemistry of naphthides of the Siberian platform. – Yakutsk: Publishing House of YaF SO RAN, 2003. – 160 p.
- [6] Peters K.E., Moldovan J.M. The biomarker guide. – Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993. – 363 p.
- [7] Safronov A.F., Bodunov E.I., Kashirtsev V.A. Conditions for the generation of hydrocarbons in the Upper Paleozoic and Mesozoic deposits of the northeastern margin of the Siberian platform // Geology and geophysics. – 1979. – No. 1. – P. 3-8.
- [8] Kashirtsev V.A., Dolzhenko K.V., Fomin A.N., Kontorovich A.E., Shevchenko N.P. Hydrocarbon composition of bitumoids of terrestrial organic matter at great depths in the zone of apocatagenesis // Geology and Geophysics. – 2017. – Vol. 58. – No. 6. – P. 869-879. DOI: 0.15372/GiG20170604
- [9] Zueva I.N., Chalaya O.N., Safronov A.F., Kashirtsev V.A. Oil generation potential of the organic matter of the Upper Permian deposits of the Vilyui syneclyse // Science and education. – 2017. – No. 2 (86). – P. 17-21.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ ТРУБКИ ЧУКУКСКАЯ

Дмитрий Иванов¹, Александр Толстов², Вячеслав Иванов¹

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

GEOLOGICAL STRUCTURE AND MATERIAL COMPOSITION OF THE PIPE CHUKUKSKAYA

Dmitry Ivanov¹, Alexander Tolstov², Vyacheslav Ivanov¹

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

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

Annotation. An additional study of the diamond content and the resulting composition of the Chukukskaya pipe was carried out. The morphology and dimensions of the body are specified. It has been established that the pipe has a diamond content close to industrial. It is concluded that in the future, when the condition changes, the kimberlite pipe can be taken into development.

1. Введение

Целью настоящих исследований являлось доизучение особенностей вещественного состава и алмазоносности кимберлитовой трубки Чукукская. Трубка находится в 15 км к северо-востоку от поселка Айхал на бровке долины реки Чукука, в ее истоках. Обнаружена трубка при сгущении поисковой сети до 125x125 м в июне 1993 г скважиной 5070Г.

В районе трубки ранее было пробурено 13 скважин объемом 2028 п. м, в том числе по кимберлитовым породам пройдено 7 скважин объемом 699,5 п. м. Размер поверхности трубки на уровне палеоповерхности карбонатного цоколя составил 160x150 м, площадь – 18900 м². Установлено, что трубка Чукукская полностью перекрыта долеритовой интрузией мощностью 92-94 м [1,2], отторгнувшей терригенные породы каменноугольного возраста, которые были выведены на дневную поверхность и, впоследствии, полностью уничтожены эрозийными процессами. Лишь в центральной части контура трубки непосредственно на кимберлитах сохранился фрагмент базального горизонта терригенных отложений мощностью до 3 м. Над южным флангом трубки в кровле интрузии закартирован отторгнутый блок известняков.

В связи с вышесказанным шлихоминералогическая обстановка, существовавшая на момент внедрения кимберлитовых тел (D₃-C₁), остается неясной. Поиски кимберлитовых тел в данных условиях весьма затруднительны [3,4,5].

По данным предыдущих исследований трубка Чукукская имеет простое геологическое строение. При макроскопическом описании керна выделены две разновидности кимберлитовых пород: порфиновые кимберлиты и автолитовые кимберлитовые брекчии. Предшественниками установлена убогая алмазоносность тела.

В период с 2011 по 2016 гг. в рамках работ по объекту Верхне-Чукукский-2 трубка изучена посредством бурения 11 скважин, 9 из которых вскрыли кимберлитовые породы, две скважины (С-5 и С-8) оказались законтурными. Суммарный объем бурения составил 2428,0 п. м. Скважины вертикальные, проходка по кимберлитам осуществлялась коронками Ø112 мм с расширителями (диаметр керна 90 мм) и Ø172 мм (диаметр керна 140 мм). По скважинам проведены геофизические исследования и необходимый комплекс опробования. Контакты рудного тела с перекрывающими и вмещающими породами корректировались по каротажу. Трубка изучена на глубину 227 м от поверхности рудного тела. По кимберлитам трубки Чукукская пройдено 1200,0 п. м, из которых отобрано 123 керновые пробы суммарным весом 29418,2 кг. Средний вес пробы составил 239,2 кг. Керновое опробование осуществлялось десятиметровыми секциями.

2. Морфология рудного тела

Трубка имеет неправильно-изометричную форму, длинная ось ориентирована в северо-восточном направлении (СВ-60°). Размер поверхности трубки на уровне палеоповерхности карбонатного цоколя, по данным проведенных исследований, составил 180x150 м, площадь – 20866 м², что позволяет отнести ее к классу мелких тел [6,3,7].

В верхней части трубка имеет приповерхностный раструб. Поверхность рудного тела под перекрывающими породами пологоволнистая с перепадом высот до 20-25 м.

3. Внутреннее строение рудного тела

Трубка сложена, в основном, автолитовыми кимберлитовыми брекчиями, в которых иногда отмечаются крупные (до 20-25 м) ксенолиты карбонатных пород ордовика. Гораздо реже отмечаются порфиновые кимберлиты.

В верхней части рудного тела в ряде скважин (5070А/14, С-1) сохранились фрагменты коры выветривания. Породы в этой части разреза представлены желтовато-бурыми, коричневатобурыми, сильно выветрелыми, ожелезненными, местами, дезинтегрированными до дресвяно-щебеночных обломков кимберлитовыми породами, слабо сцементированными карбонатной глиной. Мощность коры выветривания 2-5 м.

Автолитовые кимберлитовые брекчии (АКБ) представляют собой плотную породу голубовато- и зеленовато-серого цвета, автолитовой текстуры, с порфировой структурой связующей массы (рисунки 1 и 2).

Содержание ксеногенного материала в АКБ колеблется от 15-20 % до 40-60%, изредка более. Представлен он преимущественно обломками глинисто-карбонатных пород цоколя: известняками, доломитами и мергелями, значительно реже (1-5%) – обломками метаморфических пород кристаллического фундамента: гранатовыми гнейсами, кристаллическими сланцами, изредка серпентинитами. Размеры обломков пород варьируют от первых миллиметров до 3-5 см.



Рисунок 1– Трубка Чукукская. Скв. 5070А/15, глубина 253,0 м. Автолитовая кимберлитовая брекчия.

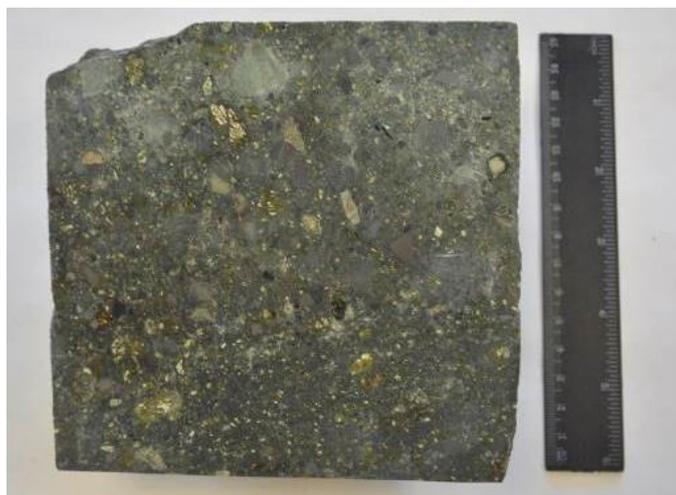


Рисунок 2 – Трубка Чукукская. Скв. С-1, гл. 150,0 м. Автолитовая кимберлитовая брекчия.

Основная масса кимберлитов мелко-тонкозернистая, серпентин-карбонатного состава, с примесью хлорита, тонких табличек флогопита и микрозерен рудного минерала. В ней зачастую присутствуют автолитовые включения округлой и овальной форм. Количество автолитов колеблется от 15-20% до 60%.

Порфировые выделения составляют до 15-25% объема породы, изредка более, и представлены, в основном, псевдоморфозами серпентина и кальцита по оливину размером от первых мм до 3-7 см. Количество псевдоморфоз составляет до 85% объема всех вкрапленников. Помимо этого, вкрапленники представлены минералами-спутниками алмаза – пиропом, пикроильменитом и флогопитом.

По данным микроскопического изучения АКБ содержит автолиты округлой и овальной формы, размером 0,4-10 мм (Рис. 3).

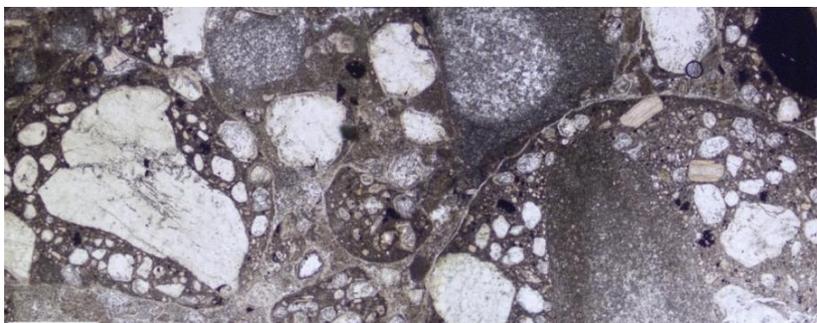


Рисунок 3 – Трубка Чукукская. Скв. С-1, обр.3, гл.120,0 м. АКБ (шлиф, без анализатора).

Автолиты имеют, в основном, четко выраженное ядерное строение. В ядрах автолитов установлены псевдоморфозы по оливину, выполненные преимущественно серпентином, кальцитом, пикроильменитом.

Порфировые кимберлиты (ПК) зеленовато-серого и голубовато-серого цвета. Структура пород порфировая, текстура массивная. Содержание ксеногенного материала в ПК, представленного, в основном, обломками глинисто-карбонатных пород, как правило, не превышает 1-2% от объема породы, изредка повышаясь до 5-7%. В незначительном количестве (до 1-3%) отмечаются обломки метаморфических пород кристаллического фундамента, размером 0,1-3 см, изредка до 7-8 см, представленные гнейсами и сланцами.

Основная масса породы тонкозернистая, серпентин-карбонатного состава.

Порфировые вкрапленники, представленные, главным образом, псевдоморфозами серпентина и кальцита по оливину, иногда с примесью окисно-рудного минерала, составляют до 20-25% объема породы [8]. Их размер колеблется от 0,1-0,7 до 1-1,5 см (рисунки 4 и 5).

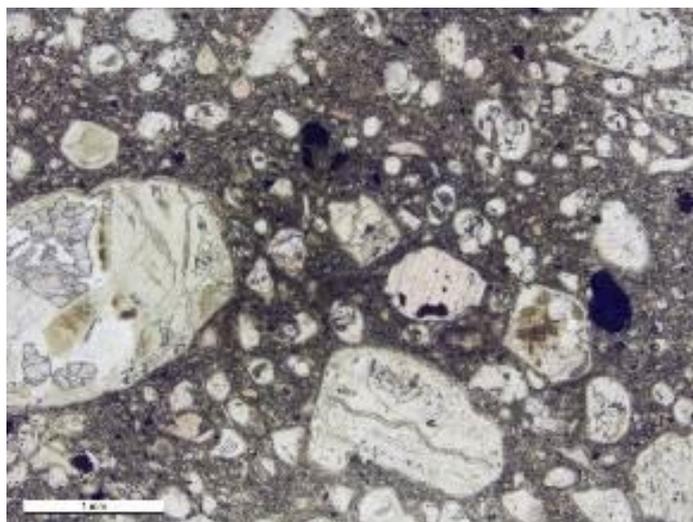


Рисунок 4 – Трубка Чукукская. Скв. С-1, обр.6, гл.180,0 м. ПК (шлиф, без анализатора).

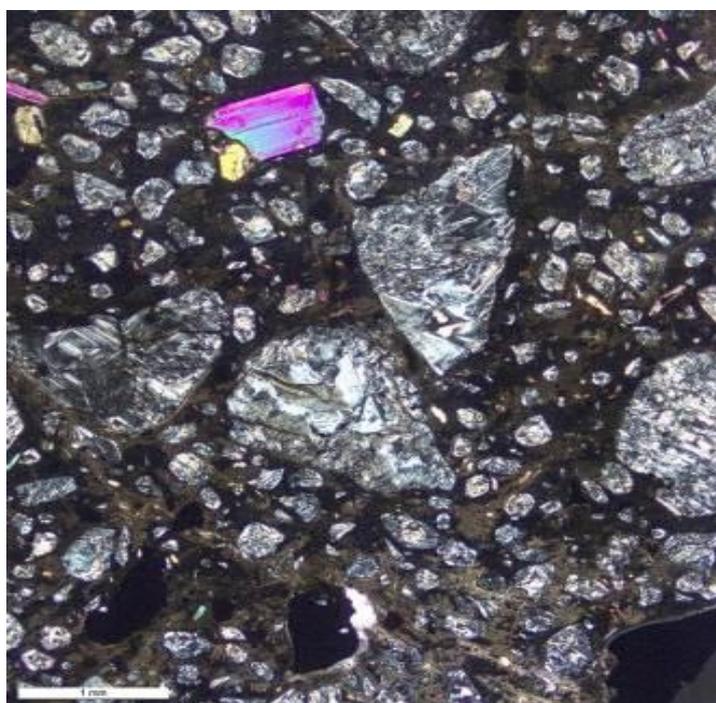


Рисунок 5 – Трубка Чукукская. Скв. 5071Л/2, обр.1, гл.160,0 м. ПК (шлиф с анализатором).

4. Алмазонасность кимберлитов

Из 123 проб общим весом 29418,2 кг, в 62 пробах (50%) обнаружены алмазы. Содержания алмазов по частным пробам в кимберлитовых породах варьируют от 0,00 кар/т до промышленных.

В количественном отношении преобладают алмазы класса $-1+0,5$ мм - 60 кристаллов (50%) и $-2+1$ мм – 56 кристаллов (47%), кроме того, найдены 4 кристалла (3%) из класса $-4+2$ мм. По весу наиболее представлен класс $-2+1$ мм (50,49% от массы коллекции), меньше доля веса алмазов класса $-4+2$ мм (40,25%) и еще меньше (9,26%) - класса $-1+0,5$ мм.

Практически все изученные кристаллы относятся к I разновидности по классификации Ю.Л. Орлова (98%) и только 2 кристалла – к VIII разновидности [9]. Доминируют (52,0%) ламинарные додекаэдры I разновидности по Ю.Л. Орлову. Из других габитусов стоит отметить кристаллы переходных между октаэдрической и ромбододекаэдрической формами (27,0%). В гораздо меньших количествах отмечены кристаллы округлой формы (10,0%), октаэдры (9,0%) и кристаллы, не имеющие четко выраженного габитуса (2,0%).

Скульптуры травления отмечаются на 42,5% всех кристаллов, но наиболее развиты они на кристаллах класса -4+2 мм (75%), реже на кристаллах класса -2+1 мм (42,9%) и -1+0,5 мм (40%). Представлены скульптуры шрамами (20,8% всех зерен), треугольными впадинами (14,2%), кавернами (2,5%), крайне редко фиксируются полосы пластических деформаций (1,7%).

Сохранность алмазов коллекции неплохая. Сумма осколков и обломков алмазов, возникших при техногенном воздействии на кристаллы при обработке, составляет 15%, а целых и поврежденных камней - 85%. На поврежденных камнях наблюдаются поверхности с протоматмическими сколами, причем максимальное их количество фиксируется в классе -1+0,5 мм (83,3%).

В трубке Чукукская 67,5% выборки представлено монокристаллами алмазов (Рис. 6). Из агрегатов наиболее распространены незакономерные сростки (22,5%); вростки и шпинелевые двойники встречаются примерно в равных количествах (5% и 4,2% соответственно).



Рисунок 6 – Алмазы трубки Чукукская: а – класс -4+2 мм, б – класс -2+1 мм

Доля кристаллов без включений составляет 51%. Значительное количество составляют алмазы с включениями (~49%), причем во всех классах размерности содержится примерно по 50% таких кристаллов. Отмечены только графит-сульфидные включения и единичные включения графита (34,2% и 15% соответственно).

Большинство кристаллов алмаза являются прозрачными (43,3%) и полупрозрачными (50%). На долю непрозрачных разновидностей приходится всего 6,7%. Характерно, что при увеличении размерности доля прозрачных кристаллов возрастает, и в классе -4+2 мм она составляет 50% от всех изученных камней данного класса.

В трубке Чукукская 85,8% выборки приходится на бесцветные алмазы. Среди окрашенных разновидностей преобладают серые (6,7%), в меньшем количестве отмечаются дымчатые (4,2%) и лилово-коричневые (2,5%), крайне редко – желтые (0,8%).

Преобладают алмазы с фиолетовым цветом люминесценции (36,6%). Реже отмечаются кристаллы с сине-голубым (21,7%), сиреневым (19,2%), желто-оранжевым (9,2%) и, крайне редко, с белесым (2,5%) свечением. Не светятся 10,8% всех алмазов.

5. Выводы

В результате доизучения трубки Чукукская установлена более высокая ее алмазоносность по сравнению с более ранними исследованиями. И хотя содержания алмазов и их оцененные запасы все еще остаются довольно низкими, судя по высоким содержаниям полезного компонента в отдельных пробах, не исключено наличие в пределах этой трубки рудного столба с промышленной алмазоносностью, в том числе, за счет высокой вероятности находок в изученных кимберлитах более крупных алмазов ювелирного качества. Подобная возможность для слабоалмазоносных трубок Сибирской платформы предполагалась авторами ранее [8,10,11].

Для окончательной оценки перспектив изученного тела целесообразно проведение представительного, в частности, валового, опробования на алмазы. Полученные данные позволят более надежно оценить возможность промышленного освоения трубки Чукукская.

6. Благодарности

Работа выполнена в рамках НИР ИГАБМ СО РАН (№ 0381-2019-0003)

7. Литература

- [1] Belov S.V., Iapin A.V., Tolstov A.V., Frolov A.A. Minerageny of platform magmatism (traps, carbonatites, kimberlites). – Novosibirsk, SO RAN, 2008. – 537 p. (In Russian).
- [2] Tolstov A.V. The main ore formations of the Northern Siberian platform. – М.: IMGRE, 2006. – 212 p. (In Russian).
- [3] Metodicheskie ukazaniya po poiskam korennyh mestorozhdenij almazov na sibirskoj platforme (Yakutskaya almazonosnaya provinciya) [Guidelines for the search for indigenous diamond deposits on the Siberian platform (Yakutsk diamond-bearing province)]. Leningrad, 1989, 64 p. (In Russian).
- [4] Vasilenko V.B., Kuznetsova L.G., Minin V.A., Tolstov A.V. Petrochemical Evaluation of the Diamond potential of Yakutian Kimberlite fields // *Geochemistry International*. – 2010. – Т. 48. – № 4. – P. 346-354. (In Russian).
- [5] Ivanov D.V., Ivanov V.V., Tolstov A.V. Geochemical search for diamond deposits within the Alakit-Markhin kimberlite field // *Voprosy estestvoznaniya*. – Irkutsk, 2018. – P. 44–48.
- [6] Instrukciya po primeneniyu klassifikacii zapasov k korennyim mestorozhdeniyam almazov [Instructions for the application of reserves classification to indigenous diamond deposits]. – Moscow, GKZ, SSSR, 1984. – 22 p. (In Russian).
- [7] Tolstov A.V., Minin V.A., Vasilenko V.B., Kuznecova L.B., Razumov A.N. New body of high-diamond kimberlites in the Nakyn field of the Yakut diamondiferous province // *Geologiya i geofizika – Geology and Geophysics*. – 2009. – Т. 50. – No. 3. – P. 227-240. (In Russian).
- [8] Ivanov D.V., Ivanov V.V., Tolstov A.V. Petrology of kimberlites of the Chukukskaya pipe // *Problems of igneous and metamorphic petrology, geodynamics and the origin of diamonds: International conference dedicated to the 110th anniversary of Academic V.S. Sobolev*. – Novosibirsk, 2018. – P. 117. (In Russian).
- [9] Orlov U. L. Mineralogiya almaza [Mineralogy of diamond]. – М.: Nauka Publ., 1973. – 170 p. (In Russian).
- [10] 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. – Т. 59. – № 10. – P. 1365-1379.
- [11] 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 post flood basalt Diamondiferous Malokuonapskaya Kimberlite Pipe, Yakutia // *Doklady Earth Sciences*. – 2015. – Т. 463. – № 2. – P. 828-832.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ О ПРИМЕСНОМ СОСТАВЕ АЛМАЗОВ И ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ НИХ БРИЛЛИАНТОВ

Михаил Иванов, Семен Леонтьев, Марина Федотова, Дайаана Эверстова
ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова»,
677000, Россия, г. Якутск, ул. Белинского, 58

STATISTICAL ANALYSIS OF DATA ON THE IMPURITIES COMPOSITION OF NATURAL DIAMONDS AND BRILLIANTS MADE FROM THEM

Mikhail Ivanov, Semyon Leontyev, Marina Fedotova, Daiaana Everstova
North-Eastern Federal University, 58, Belinsky str., Yakutsk, 677000, Russia

Annotation. In 60 natural diamond crystals from 3 different deposits and brilliants made from them, the concentrations of N3, H, B2; P1; 490.7; N3V defects were determined. The conducted regression-correlation analysis showed that there is a statistically significant correlation between the concentrations of N3 in diamonds and diamonds made from them for the studied samples from all 3 deposits. There is no statistically significant correlation between B2 concentrations in the studied samples from 3 fields. The coefficients b are determined in linear regression equations, which allow to calculate the concentrations of the same defects in the original diamond crystals from the concentrations of defects in diamonds. The required number of diamonds to identify the source of origin at a confidence level of 95% is at least 384 pieces from obviously one deposit.

1. Введение

Типоморфные свойства минералов обусловлены их генезисом и проявляются в характерных свойствах и признаках [1]. Типоморфные свойства и признаки минералов непосредственно характеризуют условия их образования и особенности минералообразующей среды. К типоморфным свойствам относят: морфологические особенности выделений минералов (габитус кристаллов, двойники, характер агрегатов и др.); вариации химического состава минерала и содержания в нём изоморфных элементов примесей, а также изотопного состава слагающих его элементов; некоторые физические свойства; структурные особенности.

Алмазы Якутской алмазоносной провинции (ЯАП) являются наиболее изученными. Типоморфные свойства алмазов и минералов-спутников ЯАП начали изучать практически сразу после открытия первых трубок. В настоящее время установлены типоморфные свойства (кристалломорфология, цвет, фотолюминесценция, микровключения, примесный состав и т.д.) алмазов множества различных месторождений [2-5].

В работе [6] приведены результаты изучения примесного состава алмазов ювелирного качества из 3-х месторождений ЯАП, полученные методами инфракрасной (ИК), ультрафиолетовой (УФ), рамановской спектроскопии и электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Далее эти образцы были огранены, и указанными методами получены данные о примесном составе изготовленных бриллиантов.

Целью настоящей работы является выявление зависимости между дефектно-примесным составом бриллиантов и исходных алмазов, а также установление возможности определения источника происхождения бриллиантов.

2. Основной раздел

Все исследованные 60 кристаллов алмаза (по 20 шт. для каждого месторождения) относились к категории «ювелирное сырье» высокого качества. Весовая категория 2 Gr, формы Sawables (Z) и Shapes (SH), цвет от 1 до 5, качество от 1 до 4. Масса варьировала от 0,45-0,65 карат. Общий вес составлял 33,76 карат.

В ходе работы получены и проанализированы 780 спектров, полученных методом ИК-спектроскопии (120 образцов, в т.ч. 60 алмазов и 60 бриллиантов). Вычислены концентрации водородных центров (Н) и плейтлети (В2). Содержание Н-центров выше в алмазах трубки Интернациональная, В2-центров – в алмазах трубки Юбилейная.

Зарегистрировано 120 спектров в УФ- и видимой области (120 образцов, в т.ч. 60 алмазов и 60 бриллиантов) и определена концентрация N3-центров, которая имела близкие значения в алмазах трубки Интернациональная и россыпного месторождения Молодо.

Получено 60 спектров ЭПР (30 кристаллов алмаза и 30 бриллиантов) и рассчитаны концентрации P1-, 490.7-, N3V-центров. По содержанию 490.7- и N3V-центров алмазы трубки Юбилейная близки. Концентрация P1-центра выше в алмазах россыпного месторождения Молодо.

Проведен корреляционный анализ [7, 8] для выявления тесноты связи между примесно-дефектным составом образцов в исходном состоянии алмазного сырья и после огранки их в бриллианты. Для обозначения дефектов использованы следующие индексы: Н, В2, N3, P1, 490,7, N3V; а (Юбилейная), m (Интернациональная), aa (Молодо) – обозначения серий образцов, соответствующих месторождениям; ИК, EPR (ERP) – обозначения методов; al – алмаз; br – бриллиант.

Определены корреляционные зависимости в дефектно-примесном составе исследованных образцов. Из данных корреляционной матрицы следует, что наиболее сильная корреляция обнаружена в связях N3aaal-N3aabr (0,772), P1aal-P1abr (0,792), P1mal-P1mbr (0,776), P1aaal-P1aabr (0,730), N3Vmal-N3Vmbr (0,825), N3Vaaal-N3Vaabr (0,941), HaaIKal-HaaIKbr (0,981), 490aEPRal-490aEPRbr (0,988), 490aaEPRal- 490aaEPRbr (1,000).

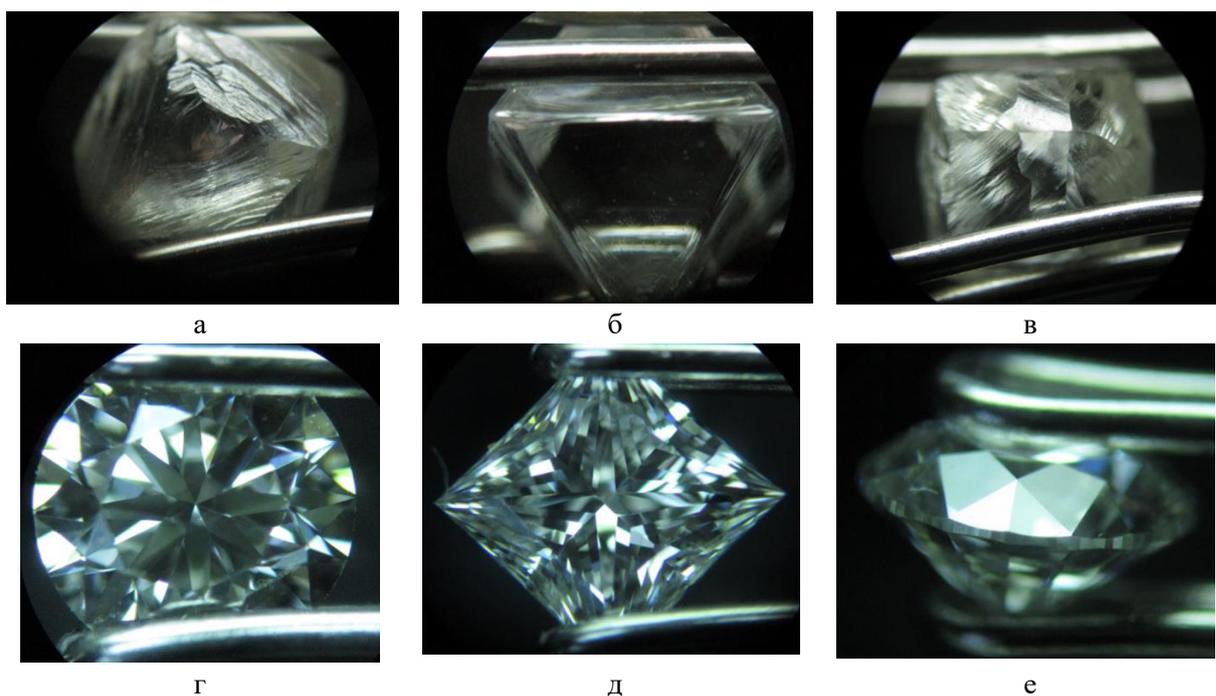


Рисунок 1 – Кристаллы алмаза и изготовленные из них бриллианты: а-в - алмазы; г-е - бриллианты.

Проведенный анализ полученных данных показал, что значимая на уровне 0,01 корреляция, равная $r=0,981$, имеется между содержанием Н в алмазах и бриллиантах из россыпи Молодо. Между концентрациями В2 не имеется значимой корреляции во всех исследованных образцах. Значимая корреляция между концентрациями N3 в алмазах и изготовленных из них бриллиантах имеется для исследованных образцов всех 3-х месторождений. Установленная высокая корреляция, значимая на уровне 0,01, для трубки Интернациональная ($r=0,772$) и россыпного месторождения Молодо ($r=0,642$). На уровне 0,05 для трубки Юбилейная наблюдается слабая корреляция ($r=0,455$). Корреляционная зависимость дефекта N3V,

значимая на уровне 0,01, существует для образцов из трубки Интернациональная и россыпного месторождения Молодо. Высокая корреляционная зависимость для трубки Интернациональная ($r=0,825$) и очень высокая установлена для россыпного месторождения Молодо ($r=0,941$). Также проведен регрессионный анализ. Для образцов из всех 3-х месторождений наилучшей оказалась линейная регрессионная модель без свободного члена, имеющая вид уравнения:

$$y = b \cdot x, (1)$$

где x – концентрация определяемого в алмазе дефекта; y – концентрация определенного вида дефекта в бриллианте, изготовленном из данного алмаза; b – коэффициент регрессии.

Параметр b (1) называется коэффициентом регрессии. Его величина показывает среднее изменение результата с изменением фактора на 1 усл. ед. В данном случае, с увеличением концентрации определенных примесных и структурных дефектов на 1 ppm или 1 усл. ед. доля концентрации дефектов увеличивается в среднем на b %-ных пункта. Получены следующие коэффициенты регрессии:

- для трубки Юбилейная: $b_H=1,873$; $b_{B2}=0,962$; $b_{N3}=0,835$; $b_{P1}=0,794$; $b_{490,7}=1,4$.

- для трубки Интернациональная: $b_H=0,166$; $b_{B2}=0,626$; $b_{N3}=2,548$; $b_{P1}=0,874$; $b_{490,7}=1,4$; $b_{N3V}=0,603$;

- для россыпного месторождения Молодо: $b_H=2,268$; $b_{B2}=1,367$; $b_{N3}=1,961$; $b_{P1}=0,5$; $b_{490,7}=0,750$; $b_{N3V}=0,902$.

Используя коэффициенты регрессии, по измеренным концентрациям дефектов в бриллиантах можно вычислить концентрации тех же дефектов в исходном алмазном сырье и, соотнося их с данными по месторождениям, с определенной высокой степенью вероятности установить источник происхождения алмазов, из которых изготовлены бриллианты.

В ходе исследований установлено, что для обеспечения точности результатов определения месторождения требуется партия бриллиантов. Была применена формула для определения численности простой случайной выборки для доли единиц, обладающих данным признаком в выборочной совокупности. Для определения необходимого объема простой случайной выборки при уровне значимости 5% использовали общепринятую формулу:

$$n = \frac{z^2 p(1-p)}{e^2}, (2)$$

где n – объем выборки; z – нормированное отклонение, определяемое исходя из выбранного уровня доверительности; p – найденная вариация для выборки, где в расчет ввели максимальную величину дисперсии, равную 0,25; e – допустимая ошибка. Результат вычисления по (2) показал, что для обеспечения статистической точности измерений требуется 384 бриллианта из заведомо одного месторождения.

3. Выводы

В ходе исследований методами ИК-, УФ-спектроскопии, а также методом ЭПР получены данные по концентрации следующих дефектов: водородных центров (H); плейтлетса (B2); центра N3, образованного тремя атомами азота и вакансией, а также N3V, его парамагнитного аналога; одиночного азотного атома (P1); центра 490,7; - обнаруженных в 60 кристаллах алмаза из трех различных месторождений (трубок Юбилейная и Интернациональная, россыпи Молодо) Якутской алмазоносной провинции и в бриллиантах, полученных путем огранки данных алмазов.

Проведен корреляционный анализ и построены регрессионные уравнения для концентраций дефектов H; B2; P1; 490,7; N3V в алмазах и полученных из них бриллиантов. Вычислены коэффициенты b в линейных регрессионных уравнениях, позволяющие по концентрациям дефектов в бриллиантах вычислять концентрации этих же дефектов в исходных кристаллах алмаза. Определено, что минимальное необходимое количество бриллиантов для идентификации источника происхождения при доверительном уровне 95 % равно 384 шт. из заведомо одного месторождения.

Таким образом, в результате данной работы показана корреляция дефектно-примесного состава бриллиантов и исходных алмазов, а также впервые установлена принципиальная возможность с

высокой долей вероятности определения источника происхождения бриллиантов, при условии наличия необходимого объема выборки и соответствующей базы данных по наличию и концентрациям дефектов в алмазах различных месторождений.

4. Литература

- [1] Chuhrov F.V. Tipomorfizm – vazhnejshaya problema sovremennoj mineralogii // Tipomorfizm mineralov. – М.: Nauka, 1969. – P. 3-14.
- [2] Bartoshinskij, Z. V. Sravnitel'naya harakteristikaalmazov iz razlichnyhalmazonosnyh rajonov Zapadnoj YAkutii / Z. V. Bartoshinskij // Geologiya i geofizika. – 1961. – № 6. – P. 40–50.
- [3] Samojlovich M.I., Bezrukov G.N., Butuzov V.P., Solodova YU.P. i dr. Tipomorfnye osobennosti prirodnyhalmazov// Izv. AN SSSR. Ser. Geol., 1973. – №8. – P. 3-12.
- [4] Har'kiv A.D., Kvasnica V.N., Safronov A.F., Zinchuk N.N. Tipomorfizmalmazov i ego mineralov-sputnikov iz kimberlitov. – Kiev: Naukova dumka, 1989.
- [5] Hachatryan G.K. Tipomorfizmalmazov YAkutii po dannym IK-spektroskopii// Geologicheskie aspekty mineral'no-syr'evoy bazy AK «Arosa». Sovremennoe sotoyanie, perspektivy, resheniya. – Mirnyj, 2003. – P. 322-326.
- [6] Ivanov M.A., Fedotova M.A., Leont'ev S.P., Protopopov F.F., Alekseev A.A. Raspredelenie primesej valmazah yuvelirnogo kachestva iz trekh razlichnyh mestorozhdenij YAkutskojalmazonosnoj provincii/ Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Severo-Vostoka Rossii. Materialy XII Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Yakutsk. – 2022. – P. 311-313.
- [7] Byuyul' A., Ceffel' P. SPSS: iskusstvo obrabotki informacii. – Spb.: ООО «DiaSoft-YUP». – 2002. – 608 p.
- [8] Nasledov A. IBM SPSS Statistics 20 i AMOS: professional'nyj statisticheskij analiz dannyh. – SPb., 2013. – 413 p.

**РЕДКИЕ СИЛИКАТЫ ЩЕЛОЧНЫХ ПОРОД МУРУНСКОГО МАССИВА:
КРИСТАЛЛОХИМИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ**

Екатерина Канева, Роман Шендрик, Татьяна Радомская, Александр Богданов
ФГБУН «Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН»,
664033, Россия, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1А

**RARE SILICATES FROM ALKALINE ROCKS OF THE MURUN MASSIF:
CRYSTAL CHEMICAL AND OPTICAL FEATURES**

Ekaterina Kaneva, Roman Shendrik, Tatiana Radomskaya, Alexander Bogdanov
Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, 1A, Favorsky st., Irkutsk, 664033, Russia

Annotation. The crystal structures of the rare alkali silicates considered here contain silicon-oxygen anion-radicals of rare types. They are ribbons, tubes, layers of silicon-oxygen rings with wide cavities or channels along one or two crystallographic axes. K or Na cations connect silicon-oxygen chains. The silicate channels are located between chains or walls of polyhedra. From a chemical point of view, it is noted that the minerals from alkaline rocks of the Murun massif contain more F in positions usually occupied by the (OH)-group compared with similar minerals from other alkaline deposits. Optical spectroscopy of the natural complex silicates could make a significant contribution to the development of new promising photonics materials.

1. Введение

Изучение кристаллохимических и оптических особенностей минералов из щелочных комплексов является постоянной актуальной задачей современной минералогии. Особенности их кристаллических структур и связанные с ними свойства указывают на то, что сложные силикаты могут быть использованы в генетической минералогии в качестве индикаторов определенных геологических сред. В то же время, оптическая спектроскопия природных сложных силикатов может дать значительный вклад для развития новых перспективных материалов для фотоники.

2. Кристаллохимический обзор и обсуждение результатов

Мурунский магматический комплекс (Республики Саха (Якутия)) включает в себя два сиенитовых массива [1] – Большой Мурун и Малый Мурун, а также серию массивов меньшего размера и малых интрузий, включающих в себя лампроиты, карбонатиты, лампрофилиты. С этими интрузивами напрямую или опосредованно связаны разные полезные ископаемые; они представляют собой сырье для металлургии, имеют потенциал для добычи редких металлов, а также являются поделочным материалом. В южном экзоконтакте Маломурунского массива [2], помимо этого, выявлены чароититы и чароит-содержащие породы – уникальные и не обнаруженные более ни в одном другом месторождении на Земле. Непосредственно в парагенезисе с чароитом установлено более 50 минералов, большинство из которых содержатся в акцессорных количествах.

С кристаллохимической точки зрения примечательной особенностью пород Маломурунского массива является высокое содержание и большое разнообразие редких силикатов со сложными структурами. По типу и сложности сочленения $[\text{SiO}_4]$ -тетраэдров в структуре минералы подразделяются на несколько групп. Редкие силикаты со сложными структурами, о которых идет речь в докладе, приведенные в Таблице 1.

Таблица 1 – Типы сочленения [SiO₄]-тетраэдров в кристаллических структурах сложных силикатов щелочных пород Мурунского массива

| Название | Формула | Комплекс Si-тетраэдров | Ссылка |
|--|---|--|----------|
| <i>Силикаты с изолированными тетраэдрическими цепочками в структуре</i> | | | |
| Нунканбахит | BaKNaTi ₂ (Si ₄ O ₁₂)O ₂ | Неразветвленная изолированная батиситовая цепочка [Si ₄ O ₁₂] ⁸⁻ | [3] |
| <i>Силикаты с гибридными тетраэдрическими анион-радикалами</i> | | | |
| Тинаксит | K ₂ Ca ₂ NaTi(Si ₇ O ₁₈ OH)O | Гибридная [Si ₇ O ₁₈] ⁸⁻ цепочка = | [4,5] |
| Токкоит | K ₂ Ca ₄ (Si ₇ O ₁₈ OH)(OH,F) | сконденсированные волластонитовая [Si ₃ O ₉] ⁶⁻ и власовитовая [Si ₄ O ₁₁] ⁶⁻ цепочки | |
| <i>Силикаты с трубчатыми тетраэдрическими анион-радикалами</i> | | | |
| Нарсарсукиит | Na ₄ Ti ₂ (Si ₈ O ₂₀)O ₂ | Неразветвленная двойная [Si ₈ O ₂₀] ⁸⁻ цепочка | [6] |
| Агреллит | NaCa ₂ (Si ₄ O ₁₀)F | Разветвленная изолированная [Si ₈ O ₂₀] ⁶⁻ цепочка = две сконденсированные власовитовые [Si ₄ O ₁₁] ⁶⁻ цепочки | [7,8] |
| Франкаменит | K ₃ Na ₃ Ca ₅ (Si ₁₂ O ₃₀)(F,OH) ₄ ·nH ₂ O | Неразветвленная [Si ₁₂ O ₃₀] ¹²⁻ цепочка | [9] |
| Мизерит | KCa ₆ (Si ₈ O ₂₂)(OH,F) ₂ ·nH ₂ O | Неразветвленная [Si ₁₂ O ₃₀] ¹²⁻ цепочка и [Si ₃ O ₉] ⁶⁻ диортогруппа | [10] |
| <i>Силикаты с изолированными тетраэдрическими слоями</i> | | | |
| Даванит | K ₂ Ti(Si ₆ O ₁₅) | Неразветвленный слой [Si ₆ O ₁₅] ⁶⁻ , образованный сконденсированными | [11] |
| Делиит | K ₂ Zr(Si ₆ O ₁₅) | волластонитовыми [Si ₃ O ₉] ⁶⁻ цепочками | [12] |
| Название | Формула | Комплекс Si-тетраэдров | Ссылка |
| Владыкинит | Na ₃ Sr ₄ (Fe ²⁺ Fe ³⁺)(Si ₈ O ₂₄) | Разветвленный слой [Si ₈ O ₂₄] ¹⁶⁻ , дополненный тетраэдрами [Fe ²⁺ ,Fe ³⁺ O ₄] | [13] |
| <i>Силикаты с двойными тетраэдрическими слоями</i> | | | |
| Федорит | (Na,K) ₂₋₃ Ca ₄ Na ₃ (Si ₁₆ O ₃₈)(OH,F) ₂ ·nH ₂ O | Неразветвленный слой [Si ₁₆ O ₃₈] ¹²⁻ | [14] |
| Фторкарлтонит и карлтонит | KNa ₄ Ca ₄ (Si ₈ O ₁₈)(CO ₃) ₄ F·H ₂ O KNa ₄ Ca ₄ (Si ₈ O ₁₈)(CO ₃) ₄ (OH)·H ₂ O | Разветвленный слой [Si ₈ O ₁₈] ⁴⁻ | [15] |
| <i>Силикаты с несколькими типами тетраэдрических анион-радикалов в структуре</i> | | | |
| Денисовит | K _{14+x} (Ca,Na,Mn,Fe) ₄₈ (Si ₆₀ O ₁₆₂)F ₁₆ (O _x ,OH _{4-x})·2H ₂ O | Отдельные неразветвленные ксонотлитовая [Si ₆ O ₁₇] ¹⁰⁻ и [Si ₁₂ O ₃₀] ¹²⁻ цепочки | [16] |
| Чароит | (K,Sr,Ba,Mn) ₁₅₋₁₆ (Ca,Na) ₃₂ [Si ₇₀ (O,OH) ₁₈₀](OH,F) ₄ ·nH ₂ O | Отдельные неразветвленные ксонотлитовая [Si ₆ O ₁₇] ¹⁰⁻ и [Si ₁₂ O ₃₀] ¹²⁻ цепочки и гибридная [Si ₁₇ O ₄₃] ¹⁸⁻ цепочка | [17, 18] |

Перечисленные минералы являются достаточно редкими и детальное исследование их природы окраски и люминесцентных свойств практически не проводилось. Тем не менее, это может иметь важное значение как для поиска новых перспективных материалов для фотоники, так и для понимания условий образования данных минералов.

Использование и комбинирование нескольких методов исследования (классического минералого-петрографического, рентгеноструктурного методов, колебательной и оптической спектроскопии, ЭПР, *ab initio* моделирования и др.) и комплексный анализ данных позволяет осуществлять определение и уточнение моделей кристаллических структур, принципов их высокотемпературного поведения, сравнительный анализ топологически близких минералов из различных щелочных месторождений, выявлять минеральные ассоциации и парагенезисы в щелочных породах, изучать морфогенетические особенности и взаимоотношения минералов, выяснять хронологическую последовательность и стадийность процессов минералообразования, определять наличие в исследуемых минералах редкоземельных и переходных металлов, устанавливать их валентное состояние и структуру их лигандов, оценивать оптическую ширину запрещенной зоны и природу наблюдаемой в данных минералах окраски и люминесценции, определять перспективность исследуемых материалов в качестве фосфоров и люминофоров, делать расчет идеальной геометрии исследуемых минералов, их зонной структуры и положения уровней лантаноидов и переходных металлов относительно уровня Ферми с использованием методов квантовой химии, определять энергии колебаний каркасных и внекаркасных групп методами колебательной спектроскопии и квантовохимических расчетов.

3. Выводы

Многообразие и сложность структур и химических составов минералов щелочных пород Мурунского массива обеспечивает проявление различных механизмов изоморфных замещений. В таких минералах часто содержится значительное количество примесных ионов лантаноидов и переходных металлов, которые обуславливают как окраску минералов, так и их люминесцентные свойства. В то же время интерес к трубчатым, ленточным и слоистым молекулярным структурам связан с развитием нанонауки. Современная наука уделяет большое внимание созданию новых материалов, функциональных структур и устройств нанометрового масштаба. Системы на основе силикатов зачастую используются для создания эффективных люминофоров, а усложнение катионного состава люминофора в ряде случаев приводит к улучшению его люминесцентных характеристик. В этой связи оптическая спектроскопия и кристаллохимическая характеристика природных сложных силикатов может дать значительный вклад в поиск новых перспективных материалов.

4. Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22–27–00183, <https://rscf.ru/project/22-27-00183/>.

5. Литература

- [1] Wang, Y., He, H. and Ivanov, A.V. Age origin of charoite, Malyy Murun massif, Siberia, Russia // *International Geology Review*. – 2014. – Vol. 56 (8). – P. 1007-1019.
- [2] Ivanov, A., Vladykin, N., Demonterova, E., Gorovoy, V. and Dokuchits E. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology of the Malyy (Little) Murun massif, Aldan shield of the Siberian craton: a simple story for an intricate igneous complex // *Minerals*. – 2018. – Vol. 8 (12). – P. 602.
- [3] Uvarova, Y.A., Sokolova, E., Hawthorne, F.C., Liferovich, R.P., Mitchell, R.H., Pekov, I.V. and Zadov, A.E. Noonkanbahite, $\text{BaKNaTi}_2(\text{Si}_4\text{O}_{12})\text{O}_2$, a new mineral species: description and crystal structure // *Mineralogical Magazine*. – 2010. – Vol. 74. – P. 441-450.
- [4] Lacalamita, M., Mesto, E., Kaneva, E., Scordari, F., Pedrazzi, G., Vladkyn, N. and Schingaro, E. Structure refinement and crystal chemistry of tokkoite and tinaksite from Murun massif (Russia) // *Mineralogical Magazine*. – 2017. – Vol. 81. – P. 251-272.

- [5] Kaneva, E. and Shendrik, R. Tinaksite and tokkoite: X-ray powder diffraction, optical, and vibrational properties // *Crystals*. – 2022. – Vol. 12 (3). – P. 377.
- [6] Schingaro, E., Mesto, E., Lacalamita, M., Scordari, F., Kaneva, E. and Vladykin, N.V. Single-crystal X-ray diffraction, EMPA, FTIR and X-ray photoelectron spectroscopy study of narsarsukite from Murun Massif, Russia // *Mineralogical Magazine*. – 2017. – Vol. 81 (2). – P. 339-354.
- [7] Kaneva, E., Shendrik, R., Mesto, E., Bogdanov, A. and Vladykin, N. Spectroscopy and crystal chemical properties of $\text{NaCa}_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}]\text{F}$ natural agrellite with tubular structure // *Chemical Physics Letters*. – 2020. – Vol. 738. – 136868.
- [8] Kaneva, E., Bogdanov, A. and Shendrik, R. Structural and vibrational properties of agrellite // *Scientific reports*. – 2020. – Vol. 10 (1). – P. 1-15.
- [9] Rozhdestvenskaya, I.V., Nikishova, L.V., and Lazebnik, K.A. The crystal structure of frankamenite // *Mineralogical Magazine*. – 1996. – Vol. 60 (403). – P. 897-905.
- [10] Kaneva, E., Lacalamita, M., Mesto, E., Schingaro, E., Scordari, F. and Vladykin, N. Structure and modeling of disorder in miserite from the Murun (Russia) and Dara-i-Pioz (Tajikistan) massifs // *Physics and Chemistry of Minerals*. – 2014. – Vol. 41(1). – P. 49-63.
- [11] Lazebnik, K.A., Lazebnik, Yu.D. and Makhotko, V.F. Davanite ($\text{K}_2\text{TiSi}_6\text{O}_{15}$) – a new alkaline titanosilicate // *Zapiski Vsesoyuznogo Mineralogicheskogo Obschestva*. – 1984. – Vol. 113 (1). – P. 95-97.
- [12] Lazebnik, K.A. and Makhotko, V.F. Dalyite, the first finding in the USSR // *Zapiski Vsesoyuznogo Mineralogicheskogo Obschestva*. – 1982. – Vol. 111. – P. 587-593.
- [13] Chakhmouradian, A.R., Cooper, M.A., Ball, N., Reguir, E.P., Medici, L., Abdu, Y.A. and Antonov, A.A. Vladykinite, $\text{Na}_3\text{Sr}_4(\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+})\text{Si}_8\text{O}_{24}$: A new complex sheet silicate from peralkaline rocks of the Murun complex, eastern Siberia, Russia // *American Mineralogist*. – 2014. – Vol. 99 (1). – P. 235-241.
- [14] Kaneva, E.V., Shendrik, R.Y., Radomskaya, T.A. and Suvorova, L.F. Fedorite from Murun alkaline complex (Russia): Spectroscopy and crystal chemical features // *Minerals*. – 2020. – Vol. 10 (8). – P. 702.
- [15] Kaneva, E., Radomskaya, T., Suvorova, L., Sterkhova, I. and Mitichkin, M. Crystal chemistry of fluorocarletonite, a new mineral from the Murun alkaline complex (Russia) // *European Journal of Mineralogy*. – 2020. – Vol. 32 (1). – P. 137-146.
- [16] Rozhdestvenskaya, I.V., Mugnaioli, E., Schowalter, M., Schmidt, M.U., Czank, M., Depmeier, W. and Rosenauer, A. The structure of denisovite, a fibrous nanocrystalline polytypic disordered very complex silicate, studied by a synergistic multi-disciplinary approach employing methods of electron crystallography and X-ray powder diffraction // *IUCrJ*. – 2017. – Vol. 4 (3). – P. 223-242.
- [17] Rozhdestvenskaya, I.V., Mugnaioli, E., Czank, M., Depmeier, W., Kolb, U. and Merlino, S. Essential features of the polytypic charoite-96 structure compared to charoite-90 // *Mineralogical Magazine*. – 2011. – Vol. 75 (6). – P. 2833-2846.
- [18] Kaneva, E.V., Radomskaya, T.A., Shendrik, R.Y., Chubarov, V.M., Amosova, A.A. and Mitichkin, M.A. FTIR, XRF and powder XRD experimental study of charoite: Crystal chemical features of two associated generations // *In Minerals: Structure, Properties, Methods of Investigation*, Springer, Cham. – 2020. – P. 97-104.

**НОВЫЕ ДАННЫЕ О ГЕОЛОГИЧЕСКОМ СТРОЕНИИ
ГЛУБОКИХ ГОРИЗОНТОВ КИМБЕРЛИТОВОЙ ТРУБКИ МИР**

Олег Килижеков¹, Александр Толстов², Шавкат Яхин¹,
Виктор Симонов¹, Александр Разумов¹

1 Вилуйская ГРЭ АК «АЛРОСА» (ПАО), 678174, Россия, г. Мирный, ул. Вилуйская, 76

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

**NEW DATA ON THE GEOLOGICAL STRUCTURE
DEEP HORIZONS OF THE KIMBERLITE PIPE MIR**

Oleg Kilizhekov¹, Alexander Tolstov², Shavkat Yakhin¹,
Viktor Simonov¹, Alexander Razumov¹

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

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

Annotation. Based on the results of exploration of deep horizons, new data on the geological structure of the Mir kimberlite pipe have been obtained. The material composition of kimberlites to a depth of more than 1500 m varies slightly, but the morphology of the tube with depth has a certain tendency to increase its volume. As a result, a significant increase in the reserves of kimberlite ore and diamonds, amounting to about 40 million carats, was obtained.

1. Введение

Поисковые работы на алмазы в Западной Якутии начаты в 1947 г, а через два года были открыты алмазоносные россыпи в среднем течении р. Вилуей (коса Соколиная), после чего геологические исследования здесь получили широкий размах. Спустя пять лет, в 1954 г партией №128 Амакинской экспедиции установлено повышенное содержание алмазов в россыпях правого притока реки Вилуей р. М. Ботуобия и среднем течении р. Ирелях (Рисунок 1).

В это же время партией №132 под руководством Кинд Н.В. выполнена геологическая съемка масштаба 1:200 000 площади нижнего и среднего течения р. М. Ботуобия и долины р. Ирелях. «Закурили трубку Мира. Табак отличный...». Эта знаменитая телеграмма, отправленная из поселка Новый в Нюрбу, стала крылатой, благодаря множеству публикаций, посвященных открытию якутских алмазов в разных газетах, журналах и книгах. Месторождение алмазов – кимберлитовая трубка «Мир» открыта 13 июня 1955 г геологами Амакинской экспедиции Ю. И. Хабардиным, Е. Н. Елагиной, В. П. Авдеенко по прогнозной карте Н.В. Кинд. Трубка расположена в Мало-Ботуобинском алмазоносном районе. Главными элементами алмазоносного района являются Ботуобинская седловина, восточный борт Тунгусской синеклизы, западный борт Вилуйской синеклизы и наложенный Ангаро-Вилуйский прогиб [1,2,3].

На сегодняшний день кимберлитовая трубка «Мир» - одно из крупнейших и наиболее известных в мире месторождений алмазов в Якутии [2,3]. Разведка его во второй половине XX века позволила отрабатывать карьером на глубину свыше 500 м. Подземный рудник, строительство которого стартовало в 2012 г, продолжал добычу алмазов вплоть до 2017 г, когда в результате техногенной катастрофы и затопления его отработка была приостановлена. В 2020-22 г.г. проведена разведка глубоких горизонтов трубки Мир, а в сентябре 2022 г на полях VII Восточного экономического форума Глава Республики Саха (Якутия) и генеральный директор АК АЛРОСА (ПАО) дали старт началу строительства нового рудника «Мир-Глубокий».

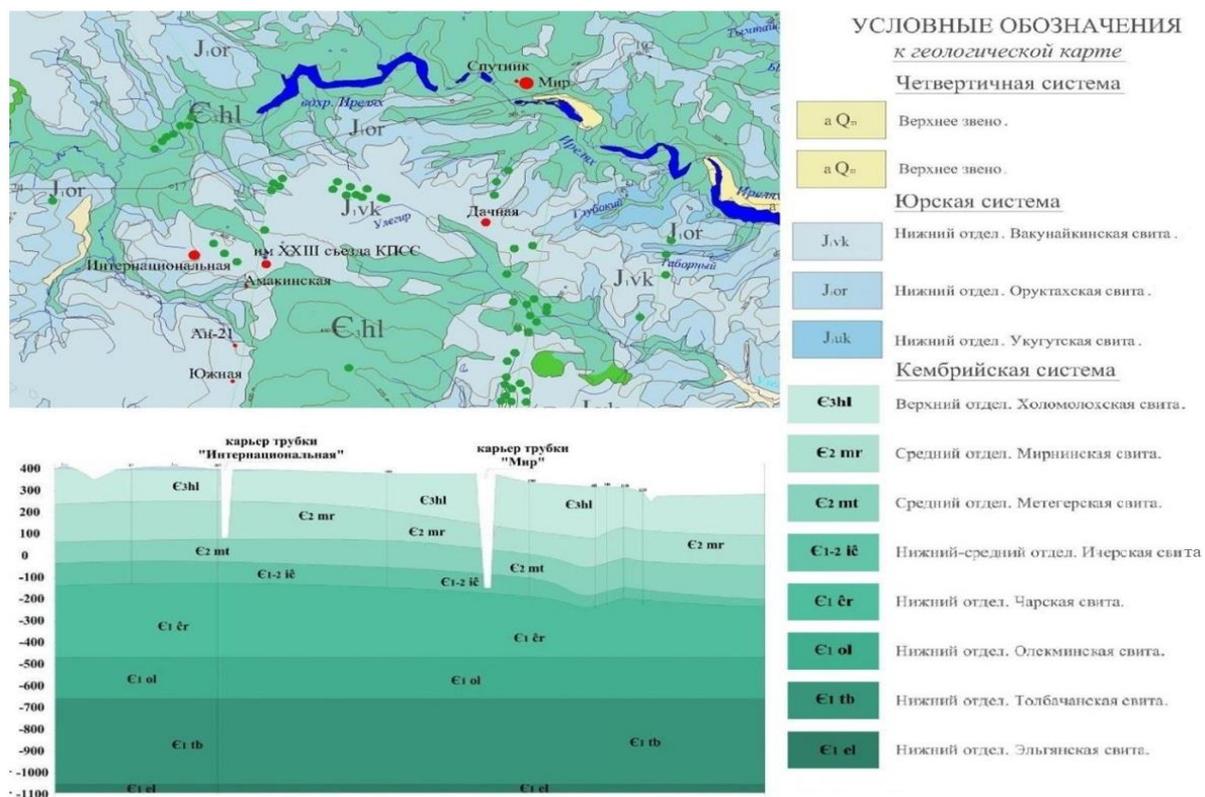


Рисунок 1 – Геологическое строение (карта и разрез) Мирнинского кимберлитового поля.

2. Геологическое строение района и основные этапы изучения месторождения

В геологическом строении района выделяются два структурных этажа.

Нижний этаж, залегающий на глубине 1,9 – 2,4 км (по данным нефтепоисковых скважин), соответствующий кристаллическому фундаменту архейского и раннепротерозойского возраста и сложен глубоко метаморфизованными дислоцированными породами, представленными гранито-гнейсами. Нижняя часть верхнего структурного яруса представлена вендским комплексом мощностью до 440 м, сложенным песчаниками, доломитами с прослоями аргиллитов. Песчаники бюксской свиты (Vbk₂) являются коллектором Ботубинского нефтегазопродуктивного горизонта.

Верхний этаж представлен образованиями осадочного чехла, сложенного карбонатно-терригенными отложениями венда, галогенно-карбонатными, терригенно-карбонатными осадками кембрия [4,5,6]. Общая мощность осадочной толщи изменяется от 2114 до 2206 м. Структурные этажи разделены между собой перерывами в осадконакоплении, угловыми и стратиграфическими несогласиями.

В 1955 году партией №200 проводились работы по оценке алмазности трубки Мир, поисковые и разведочные работы русловых и террасовых россыпей рек Ирелях и М. Ботубоя. Детальная разведка верхних горизонтов трубки Мир производилась в 1955-58 гг., где по результатам разведки были утверждены ГКЗ СССР (протокол № 2621 от 12.03.1959 г) запасы алмазов промышленных категорий до глубины 600 м (абс. отм. -280 м) и в интервале 600-800 м (абс. отм. -480 м) запасы алмазов по категории С₂.

В 1956 г при разведке трубки Мир была открыта кимберлитовая жила, соединяющая трубки Мир и Спутник. Предварительная разведка трубки Спутник, расположенной в 350 м трубки Мир, была завершена в 1959 г. После завершения детальной разведки трубки Мир в 1959-60 гг. в центральной ее части для установления перспектив алмазности пройдена вертикальная скважина № 41 на глубину 1200 м, где по результатам бурения на глубине от 600 м (нижняя граница утвержденных запасов промышленной категории) до 1200 м установлена выдержанность алмазности на глубину. В 1968 году сотрудниками Алмазной лаборатории ЦНИГРИ (позднее НИГП АК АЛРОСА (ПАО)) осуществлена площадная геолого-

петрологическая съемка трубки Мир в масштабе 1:1000 на горизонтах +295 м и, частично, на горизонте +280 м. В 1973-1974 гг. в результате бурения инженерно-геологических скважин № 1, 2 до глубины 1200 м изучен разрез в проектных точках заложения шахтных стволов (южная и северная часть трубки Мир). Эти работы выполнялись Ботубинской геологоразведочной экспедицией ПГО Якутскгеология по договору с объединением НПО Якуталмаз.

В 1978-79 гг. согласно Постановлению СМ СССР от 03.03.77 г объединением Ленанефтегазгеология в 1,8 км на юг от трубки Мир была пробурена параметрическая скважина № 701 глубиной 2165 м до кристаллических пород фундамента. В 1977-1981 гг. месторождение разведано в интервалах глубин 600-1235 м (гор. -280 ÷ -900 м). При разведке было пробурено 30 скважин, одна структурная и четыре гидрогеологических скважин. В результате выполненных работ получены дополнительные данные с увеличением размеров рудного тела на северо-западном фланге, подсчитаны запасы по категории С₁ и С₂, с утверждением запасов ГКЗ СССР (протокол № 8830 от 11.09.1981 г). В соответствии с «Классификацией запасов...» месторождение трубка Мир отнесено ко 2-й группе по сложности геологического строения.

Согласно «Методическим рекомендациям...» месторождение соответствует группе весьма крупных по размерам и запасам полезного ископаемого кимберлитовым трубкам сложной формы. До глубины 300 м трубка «Мир» имеет овальную в плане форму, вытянутую в СЗ направлении воронкообразную диатрему с размерами на поверхности 340x225 м, переходящую с глубиной в канал с субвертикальными бортами. Соотношение длинной и короткой осей горизонтальных сечений трубки возрастает от 1,5 на дневной поверхности до 2,4 на горизонте с абсолютной отметкой – 300 м. В интервалах горизонтов -300- 700м горизонтальное сечение трубки приобретает удлиненно-овальные очертания.

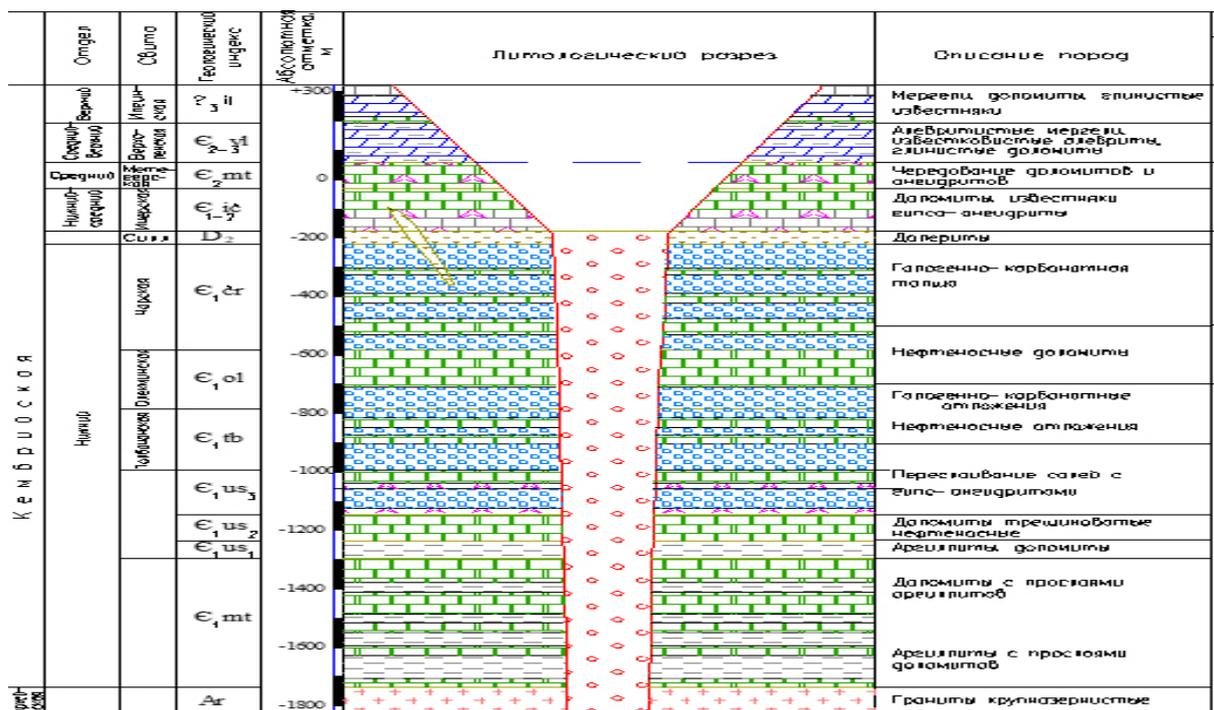


Рисунок 2 – Стратиграфический разрез месторождения трубки Мир.

Разработка месторождения открытым способом была начата в 1959 г и завершена в 2001 г на глубине 525 м (абс. отм. -190 м). На конечной стадии отработки карьер имел глубину 525 м и диаметр 1,2 км на дневной поверхности. За годы разработки открытым способом из месторождения извлечено около 350 млн м³ горной массы. С 2001 г начались работы по консервации карьера и строительству подземного рудника. С 2005 г отработанный карьер трубки Мир поставлен на сухую консервацию (Рисунок 2). В 2001 г начато строительство подземного рудника, а первый пусковой комплекс был введен в эксплуатацию в 2009 г и начата

добыча руды. Проектная мощность рудника по добыче 1 млн. тонн руды в год достигнута в 2016 г. По состоянию на июль 2017 г на подземном руднике добычные работы велись в блоках 6 и 7 в абс. отм. -210 /-410 м. Полностью пройдены и сданы в эксплуатацию гор. -210м, -310м, -410м, в стадии строительства находились горизонты абс. отм. - 510м. и -615м. Однако 04.08.17г. на месторождении трубки «Мир» произошел неконтролируемый прорыв рассолов, скопившихся в чаше карьера, вызвавший затопление шахтных горных выработок. В настоящее время рудник находится в режиме «мокрой» консервации, заключающейся в управляемом подтоплении месторождения с поддержанием уровня воды в карьере «Мир» за счет отвода части дренажных рассолов из карьера по водоотводящей штольне (абс.отм. -152 м), с последующей откачкой их из штольни погружными насосами, расположенными на берме +235 м карьера. Шахтные выработки под рудным целиком (ниже отм. -210 м) полностью затоплены. Это побудило к интенсификации геологоразведочных работ на сопредельных территориях, которые увенчались открытием нового Сьюльдюкарского кимберлитового поля в Ыгыаттинском алмазонасном районе на западе Якутии [6,7,8]. Однако, временная потеря рудника не могла быть окончательной.

Для оценки возможности возобновления добычных работ на месторождении Мир институтом «Якутнипроалмаз» в 2018 г выполнены ТЭС целесообразности инвестиций в строительство нового рудника на месторождении трубки Мир в пределах абс. отм. -565 м ÷ -1300 м. В связи с коммерческим потенциалом проекта Инвестиционным комитетом АК «АЛРОСА» (ПАО) осуществлено финансирование геологоразведочных работ с проведением геологического изучения недр в пределах абс. отм. -900 ÷ -1300 м с рассмотрением результатов для принятия решения о целесообразности инвестиций в строительство подземного рудника. Для поддержания уровня алмазодобычи, принятия решения и проработки вариантов дальнейшей эксплуатации месторождения, во исполнение замечаний и рекомендаций ГКЗ РФ, требований пункта 5 статьи 23 Закона РФ «О недрах» (об обеспечении наиболее полного извлечения из недр запасов месторождения) было принято решение об изучении глубоких горизонтов месторождения с определением их вещественного состава, запасов и морфологии. Проект на геологическое изучение и оценку промышленной ценности глубоких горизонтов месторождения алмазов трубки Мир в рамках лицензий ЯКУ 0294 КП и ЯКУ 06037 КП в 2019-2022 гг. подготовлен геологами ВГРЭ. Геологическое изучение недр проводилось силами ВГРЭ АК «АЛРОСА» (ПАО) с привлечением подрядных организаций. Работы проводились за счёт собственных средств АК «АЛРОСА» (ПАО). Задачи разведки решались путем проходки веера наклонно-направленных скважины из основного (материнского) ствола №308, опробования и обогащения керновых проб. Проходка скважин осуществлялась с юго-западного борта карьера трубки Мир. Бурение осуществлялось подрядчиком ВПТН «Нефтемаш» с применением винтовых забойных двигателей с контролем положения трассы скважины телеметрической системой по гидроканалу.

Разведочные работы на глубоких горизонтах завершены в июле 2021 г, бурение велось со стороны вмещающих пород в сторону рудного тела, до его полного пересечения. Очередность проходки скважин и развитие разведочной сети определялась необходимостью последовательного изучения морфологии рудного тела сверху вниз. При этом полученная информация служила основанием для уточнения параметров заложения следующих выработок с целью более рационального решения основной геологической задачи. Для фиксации границы рудного тела углубка наклонных скважин во вмещающие породы составляла от 28 м до 77 м. Это позволило надежно изучить зоны зкзоконтактов месторождения и избежать ошибочных принятий крупных ксенолитов за границы рудного тела.

По результатам работ контур трубки на горизонте -900 м уточнился и сейчас опирается на данные бурения 7 (семи) скважин, по которым отмечено 10 подсечений контактов рудного тела. Три из них по данным предыдущей стадии разведки 1981 г, семь – по данным современных скважин. Из 10 контактов две пары сближены между собой, расстояния между ними 6,6 м и 15,4 м. Фактически по горизонту имеются 8 подсечений (Рисунок 3). Расстояния по периметру между подсечениями составляют от 42 до 94 м. Контур трубки на горизонте -

1100 м определен по пяти подсечениям контактов рудного тела, а также в трех точках путем внутренней интерполяции между выше и ниже находящимися подсечениями. Контур рудного тела на горизонте -1300 м в юго-восточной части построен по трем подсечениям границ трубки скважинами. Остальная часть трубки определена путем внешней экстраполяции подсечений контактов рудного тела скважинами. Глубины экстраполяции составили 58-128 м.

Минералого-петрографические, геохимические и изотопные исследования являются предметом отдельных исследований геологов ВГРЕ, в целом же они показали относительную выдержанность вещественного состава и алмазности кимберлитов до 1500 м и глубже, хорошо изученных предшественниками ранее [9,10].

Основным видом работ при разведке месторождения являлось керновое опробование на алмазы. Опробование проводилось с целью получения сведений о содержании алмазов в руде и их качестве. Керновые пробы отбирались по всем пересечениям разведочными скважинами рудного тела и экзоконтактам рудного тела во вмещающих породах. Длина крновой пробы кимберлитов изменялась от 10,4 м до 19,7 м, в среднем 15,4 м. Всего отобрано и обогащено 100 крновых проб кимберлитов общим весом 30886,0 кг (1535,2 п.м.). Вес одной крновой пробы кимберлитов, в зависимости от длины пробы, объемной массы и линейного выхода керна, изменяется от 176 до 429 кг, составляя в среднем 308 кг. Алмазность с глубиной выдержана, по отдельным пробам она является ураганной и сопоставима с результатами предшественников.

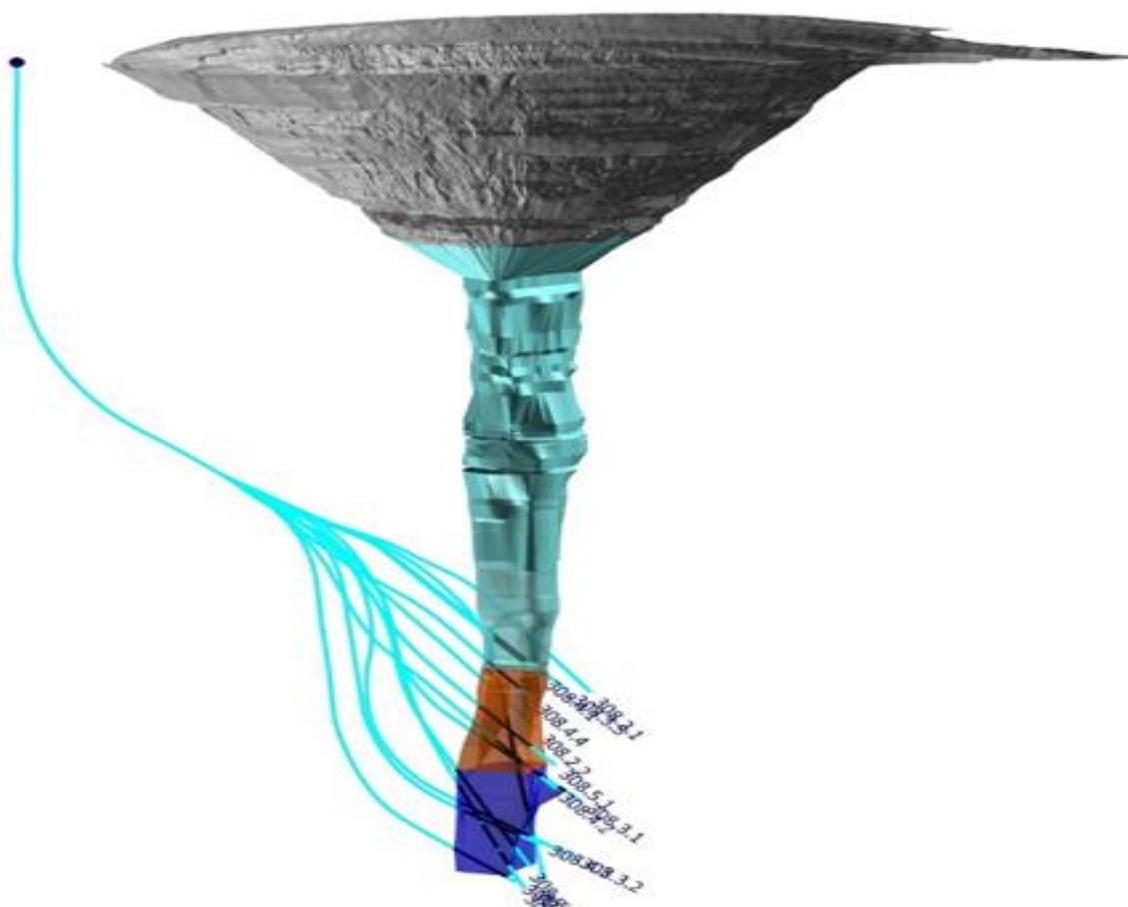


Рисунок 3 – Современная объемная модель месторождения с расположением разведочных скважин.

Геофизические исследования в скважинах (ГИС) проводились с целью решения следующих задач: литолого-стратиграфическое расчленение разрезов скважин, корреляция разрезов по скважинам, выделение контактов кимберлита и вмещающих пород, петрографические исследования и выделение разновидностей кимберлитовых пород, определение физических свойств горных пород в естественном залегании, контроль технического состояния ствола

скважины, определение объемов подготовки тампонажных смесей (КВ) и контроль пространственного положения оси ствола скважины. Поставленные задачи решались с помощью разведочного комплекса ГИС, который включал в себя спектрометрический гамма-каротаж (СГК), каротаж магнитной восприимчивости (КМВ), кавернометрию (КВ) и гироскопическую инклинометрию (ГИ). Оценка алмазоносности кимберлитов трубки производилась по результатам обогащения керновых проб.

3. Выводы.

В результате геологического изучения и оценки промышленной ценности в ходе разведки глубоких горизонтов трубки Мир (в интервале абсолютных отметок -900 ÷ -1300 м) были определены размеры и морфология рудного тела, вещественный и изотопный состав слагающих его породных разновидностей, детально изучены минералого-петрографические, геохимические, изотопные особенности кимберлитов, инженерно-геологические, гидрогеологические и газовые условия залегания кимберлитов на глубоких горизонтах.

В ходе разведки глубоких горизонтов изучены основные петрологические, петрохимические, геохимические и изотопные характеристики разновидностей кимберлитов трубки Мир, аналогичные таковым из верхних отработанных горизонтов месторождения и других кимберлитовых тел Малоботуобинского и Средне-Мархинского районов.

Подтверждены основные параметры алмазоносности месторождения на глубинах 1250-1650 м. Установлено, что в пределах разведанных горизонтов форма рудного тела остается удлиненно-овальной, а не резко переходит в дайкообразную, как предполагалось ранее. Общие запасы руды месторождения значительно увеличиваются, в результате чего ожидаемый прирост запасов алмазов во вновь разведанных блоках составит около 60 млн. карат.

4. Благодарности

Работа выполнена в рамках НИР ИГАБМ СО РАН (№ 0381-2019-0003)

5. Литература

- [1] Emelyanov V.S., Tolstov A.V., Boris E.I. New data on the prospects for the primary diamond content of the Vilyuisko-Markhinskoy fault zone // In: Questions of methods for forecasting and prospecting for mineral deposits. (in relation to the objects of geological exploration work of JSC "ALROSA"). YANIGP TsNIGRI. – Yakutsk, 2004. – P. 115-123.
- [2] 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. – V. 59. – No. 10. – P. 1365-1379.
- [3] Protsenko E.V., Tolstov A.V., Gorev N.I. Criteria for the search for kimberlites and new prospects for the primary diamond content of Yakutia // Ores and metals. – 2018. – No. 4. – P. 14-23.
- [4] Ignatov P.A., Bushkov K.Yu., Shtein Ya.I., Tolstov A.V., Yanygin Yu.T. Geological and mineralogical-geochemical signs of structures controlling diamond-bearing kimberlites of the Nakyn field of Yakutia // Ores and metals. – 2006. – No. 4. – P. 59-67.
- [5] Ignatov P.A., Novikov K.V., Bushkov K.Yu., Tolstov A.V. Reconstruction of the kinematics of faults in closed areas according to the analysis of microdisturbances in the core // News of higher educational institutions. Geology and exploration. – 2011. – No. 3. – P. 55-60.
- [6] Maltsev M.V., Tolstov A.V., Fomin V.M., Starkova T.S. New kimberlite field in Yakutia and typomorphic features of its indicator minerals // Vestnik VGU. Series: Geology. – 2016. – No. 3. – P. 86-94.
- [7] Maltsev M.V., Tolstov A.V., Starkova T.S., Ivanov A.S. Features of the material composition of kimberlites of the Syuldyukar field (Western Yakutia) // Science and education. – 2017. – No. 4 (88). – P. 37-43.

- [8] Maltsev, M.V., Tolstov, A.V., Berezhnev, I.I. Localization conditions and criteria for searching for kimberlites (on the example of the Ygyatta diamondiferous region, Western Yakutia) // *Geology and exploration*. – 2018. – No. 6. – P. 41-49.
- [9] 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. – V. 414. – No. 1. – P. 557-560.
- [10] 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. – V. 45. – No. 12. – P. 1197-1209.

ОРГАНИЗАЦИЯ ПОДЗЕМНОГО ХРАНИЛИЩА В ПЕРСПЕКТИВНЫХ НА НЕФТЬ И ГАЗ ТЕРРИТОРИЯХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ.

Егор Климов, Алексей Сивцев

ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова»,
677000, Россия, г. Якутск, ул. Белинского, 58

ORGANIZATION OF AN UNDERGROUND STORAGE FACILITY IN OIL AND GAS PROSPECTIVE AREAS OF CENTRAL YAKUTIA.

Egor Klimov, Aleksey Sivitsev

North-Eastern Federal University, 58, Belinsky str., Yakutsk, 677000, Russia

Annotation. The existing risks of gas supply to Central Yakutia are outlined. It is concluded that it is necessary to reserve gas supply by organizing an underground gas storage (UGS). The main criteria for choosing a location for UGS facilities are given. It is proposed that it is expedient to search for a small deposit in the promising Jurassic deposits of the Northern Slope of the Yakut uplift for the organization of UGS facilities. The need for accelerated exploration and evaluation of oil and gas on the territory of the Northern slope of the Yakut uplift was noted.

1. Введение

В Центральной Якутии, где сосредоточено почти половина всего населения Республики Саха (Якутия) единственным источником энергоснабжения является газовое сырье из газоконденсатных месторождений (ГКМ) Вилюйской нефтегазоносной области (НГО).

При всей видимой значительности суммарных геологических запасов Вилюйской НГО имеются проблемы, связанные с обеспеченностью активными запасами, несовершенством промыслов и износом локальной газотранспортной системы [1]. В этих условиях весьма актуальной задачей представляется резервирование газоснабжения путем создания подземного хранилища газа (ПХГ) в окрестностях г. Якутска.

2. Постановка проблемы

Организация ПХГ повысит надежность газоснабжения Центральной Якутии и позволит выровнять сезонную контрастность добычи с месторождений. Основными критериями выбора мест планируемого якутского ПХГ являются: близость к основным потребителям (к магистральной трубе), необходимые объемы буферного газа, а также оптимальные глубины. При ежегодном объеме потребления газа в 1,7 млрд. м³ в пределах Центральной Якутии необходим сопоставимый объем буферного газа в ПХГ. Оптимальной является глубина, при которой объем буферного газа составляет более 50% (интервал глубин 1300-1700 м). Большие глубины требуют больших капиталовложений.

Исходя из обозначенных критериев наиболее подходящей средой для организации ПХГ являются юрские отложения, залегающие на северном склоне якутского поднятия. В пористых водоносных пластах терригенных отложений юрской системы может быть организовано ПХГ. Вместе с тем при отсутствии локализованных контрастно выделенных изученных структур вблизи г. Якутска и по расположению коридора магистрального газопровода Средневилуйское ГКМ – Мастахское ГКМ – уч. Бэргэ – Якутск целесообразно поиск места ПХГ совместить с поиском небольшого месторождения в юрских отложениях.

3. Перспективы нефтегазоносности

Впервые о перспективах нефтегазоносности Северного склона Якутского поднятия начали упоминать после бурения Намской опорной скважины, где из юрско-мелового интервала отложений были получены незначительные притоки газа. В частности, в монографии Мокшанцева К.Б. и Черского Н.В. предположено, что между Намцами и Якутском будут найдены месторождения нефти и газа, связанные с юрским бассейном Верхоянья [2]. В

последнее время на рассматриваемой территории были проведены значительные объемы сейсморазведочных работ, которые показали наличие структур выклиниваний в разрезе, в том числе в юрских отложениях. Среди более поздних опубликованных работ о перспективах данной территории можно отметить следующие [3-5].

По результатам последних сейсморазведочных работ, выполненных в пределах северного склона Якутского поднятия [6] здесь выделяются потенциальные литологические ловушки с элементами тектонического экранирования - благоприятное сочетание надстиляющих глинистых отложений нижней юры (сунтарская свита) и разрывных нарушений (Рисунок 1).

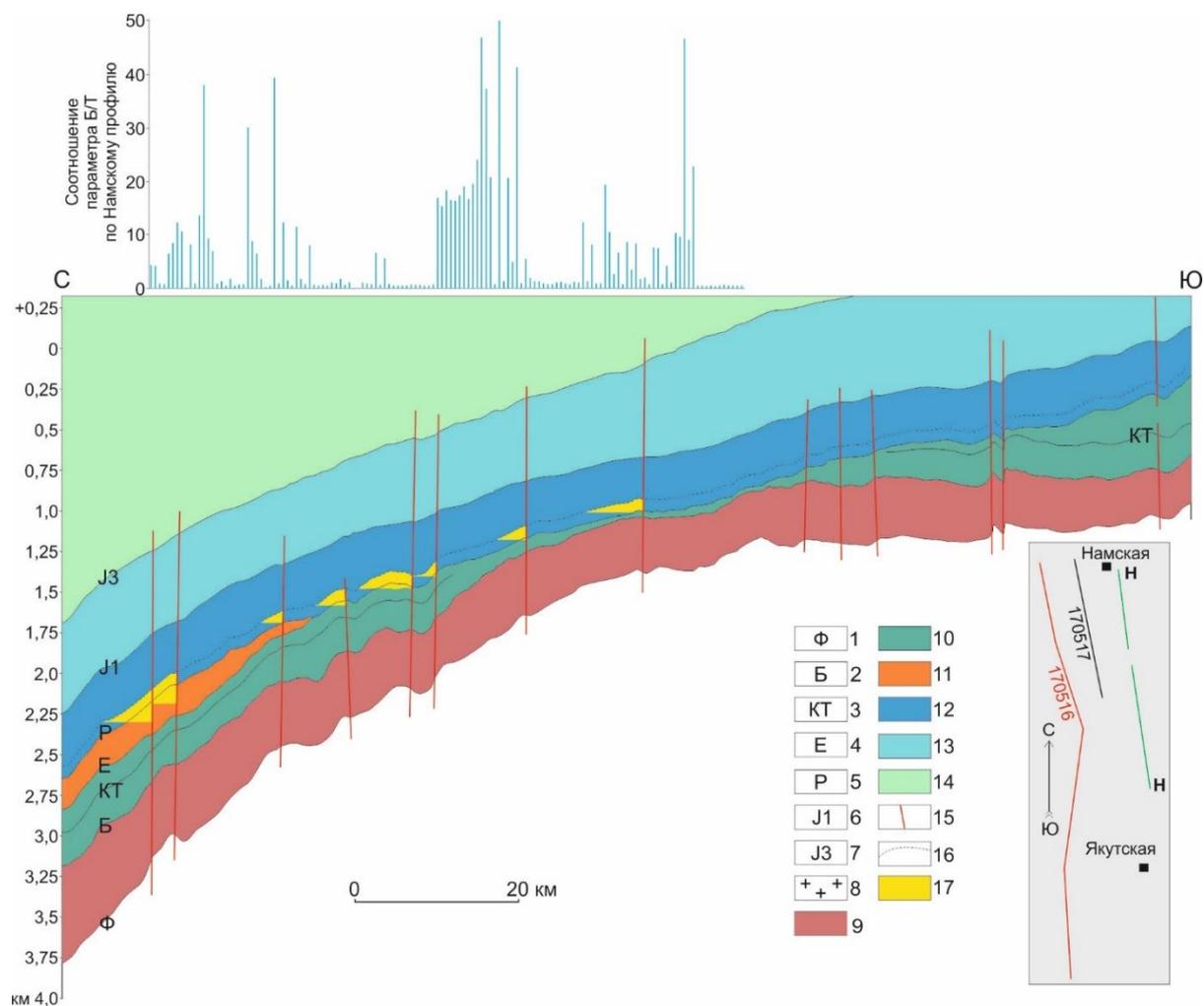


Рисунок 1 – Сейсмогеологический разрез меридианальному профилю №170516 (по данным АО «Росгео», 2018).

Условные обозначения: Отражающие горизонты приуроченные к: 1 – фундаменту, 2 – кровле вендских отложений, 3 – подошве униканской свиты, 4 – кровле кембрийских отложений, 5 – кровле пермских отложений, 6 – кровле нижнеюрских отложений, 7 – кровле верхнеюрских отложений; отложения: 8 – фундамента, 9 – венда, 10 – кембрия, 11 – перми, 12 – нижней юры (возможно присутствие триаса), 13 – средней и верхней юры, 14 – мела и кайнозой; 15 – разрывные нарушения, 16 – условный уровень сунтарской свиты, 17 – потенциальные ловушки. Геохимические показатели Б/Т приспособлены из исследования [5].

Главной проблемой, которая может снизить перспективы нефтегазоносности северо-западного, северного и северо-восточного склонов Якутского поднятия - это опесчанывание сунтарской свиты. Вместе с тем [7] указывают на наличие палеонтологических остатков в отложениях ниже-среднеюрского возраста в пределах изучаемой территории, свидетельствующие об условиях сходных морскому седиментогенезу с Западной Сибирью и с таковыми её складчатого обрамления. В этом случае в отложениях ниже-среднеюрского

возраста могут существовать преимущественно глинистые пласты локального и зонального распространения способные служить достаточно эффективными флюидоупорами.

4. Выводы

Применение ПХГ в схеме газоснабжения в Якутии непременно будет востребовано в будущем. По этому пути повсеместно развивается вся газовая индустрия Мира. С позиций, что ближайшие регионы с наличием источников углеводородного сырья удалены от Центральной Якутии на расстоянии не менее 1000 км, то уверенностью можно говорить о том, что альтернативы резервированию природного газа окрестностях Якутска не существует.

Территорию северного склона Якутского поднятия необходимо поставить в первоочередной, финансируемый федеральным бюджетом, план работ по поисково-оценочному бурению для ускоренного воспроизводства сырьевой базы углеводородов и для возможной организации ПХГ.

5. Благодарности

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (грант № 21-510-22001).

6. Литература

- [1] An Integrated Approach to the Development and Reservation of Gas in Central Yakutia. A I Sivtsev et al 2020 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 459 042096. doi:10.1088/1755-1315/459/4/042096
- [2] Mokshantsev K.B., Chersky N.V. The main features of the structure of the geological structure and the prospects for the oil and gas potential of Eastern Yakutia. – Yakutsk. – 135 p.
- [3] Sivtsev A.A., Chalaya O.N., Zueva I.N. Prospects for the oil and gas content of Central Yakutia as a resource for energy security // Oil and gas business. – 2016. – No. 2. – P. 71-84.
- [4] Kalinin A.I., Sivtsev A.I. Direct gas geochemical searches for aromatic hydrocarbons in the light of the prospects for oil and gas potential of the northern slope of the Yakut uplift // Neftegazovaya geologiya. Theory and practice. – 2017. – T.12. – No. 2. – P. 7–11. – http://www.ngtp.ru/rub/1/23_2017.pdf
- [5] Kalinin A.I., Sivtsev A.I. Prospects for the oil and gas potential of the North-Eastern part of the Aldan anticline // Oil industry. – 2019. – No. 6. – P. 22-27.
- [6] Mosyagin E.V., Shchigoreva N.V., Konstantinova O.L., et al. Integrated geophysical work to assess the prospects for oil and gas potential and localization of predicted hydrocarbon resources in the Yakutsk area of the Republic of Sakha (Yakutia).. – Moscow: JSC ROSGEO, 2018.
- [7] Grinenko V.S., Knyazev V.G. Lower-Middle Jurassic of the Yakut buried arched uplift, the Tukan ledge and the Lungkha-Kelinsky depression: subdivision of sections and their correlation // Otechestvennaya Geologiya. – 2017. – No. 1. – P. 75-84.

МЯУЧАНСКОЕ РУДНОЕ ПОЛЕ – ПРИМЕР СЛАБО ЭРОДИРОВАННОЙ Ag-Pb-Zn МИНЕРАЛИЗАЦИИ «ГОЛЬЦОВСКОГО» ТИПА

Елена Колова, Антон Глухов

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

MYAUCHATHE ORE FIELD – EXAMPLE WEEK ERODED Ag-Pb-Zn MINERALIZATION “GOLTISOVIY”-TYPE

Elena Kolova, Anton Glukhov

North-East Interdisciplinary Scientific and Research Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, 16 Portovaya st., Magadan, 685000, Russia

Annotation. Described Myauchan ore field in Dukat district, that placed to high levels of Ag-Pb-Zn mineralization Goltsovoye deposit and same objects of the OCVB.

1. Введение

Ag-Pb-Zn месторождения и рудопроявления широко распространены в структурах Северо-Востока Азии. По региональной тектонической позиции они разделяются на две группы. Первая – объекты Верхоянского складчато-надвигового пояса, связанные с позднеколлизийными гранитоидами «поперечных рядов» (Мангазея, Менкече, Прогноз); вторая – месторождения ОЧВП, ассоциирующие с кислыми вулканитами и гранитоидами поздней фазы развития пояса (Гольцовое, Тидид, Ветвистое). В их рудах сочетаются текстурно-минералогические и геохимические черты, присущие как эпитермальным, так и более глубинным обстановкам и широкое участие поверхностных (метеорных и морских) вод в формировании рудообразующего флюида (Аникина и др., 2018). Общее количество Ag-Pb-Zn месторождений ОЧВП, сколь-нибудь подробно охарактеризованных в опубликованных источниках, невелико. Поэтому многие вопросы, касающиеся важнейших аспектов их геологического строения и генезиса, остаются открытыми. Мы попытаемся дополнить существующие представления о предмете на примере Мяучанского рудного поля (далее РП) Дукатского рудного района.

2. Основной раздел

Мяучанское РП располагается вблизи восточной границы Омсукчанской зоны ОЧВП – одной из далеко вдающихся в континент и вытянутых ортогонально по отношению к поясу линейных магматических ареалов, сложенных вулcano-плутоническими ассоциациями мелового возраста. Оно сложено триасовыми песчаниками, алевролитами, аргиллитами с прослоями туфогенных песчаников и ракушечниковых известняков. Осадочная толща прорвана дайками и субвулканическими телами риолитов и гранит-порфиров северо-восточного и субмеридионального простирания. Абсолютный U-Pb возраст риолитов 82,5 – 86,3 млн лет (Полин и др., 2021). Разрывные нарушения имеют преимущественно субширотную и северо-западную ориентировку. РП включает рудопроявления Коренное и Малютка, представленные кварцевыми и флюорит-кварцевыми жилами и жильно-прожилковыми зонами мощностью до 10 м, размещение которых контролируется дайками и телами риолитов и гранит-порфиров. Содержания металлов достигают: Au 38,2 г/т, Ag 1215 г/т, Pb 4,3 %, Zn 0,3 %, As 1 %, Sb 0,1 %. Геохимический спектр минерализации As-Sb-Ag-Pb-Au-Bi-Cu-Zn-W. Вмещающие риолиты интенсивно аргиллизированы. Главными рудными минералами являются арсенопирит, пирит, сфалерит, галенит, халькопирит, редко встречаются Ag-тетраэдрит и самородное золото. Минерализация по сравнению с другими месторождениями Северо-Востока России (Волков и др., 2017) обогащена РЗЭ; в их спектре преобладают легкие элементы (Hf/Sm, Nb/La и Th/La < 1). Отношение Co/Ni варьирует от 0,03 до 0,28, значения Y/Ho – от 12,61 до 27,64, среднее 20,62, что близко к показателям рудообразующих флюидов активных гидротермальных

систем задуговых бассейнов Срединно-Атлантического и Восточно-Тихоокеанского рифтов (Вау, 1991).

Рудообразование происходило в неравновесных условиях, при повторявшихся тектонических событиях и в условиях градиентов температур и давлений, на что указывают наличие брекчиевых текстур с друзовыми полостями, катаклиз минералов ранних генераций, резкие изменения концентрации солей в рудообразующем гидротермальном флюиде на фоне снижения температуры. Поступление рудообразующих растворов было многократным, что отразилось в широком распространении в рудах гнездово-вкрапленных и зональных текстур, наличии трех генераций кварца, двух генераций арсенопирита и пирита. По данным изучения флюидных включений (ФВ) в кварце, установлено, что каждая новая порция гидротермального флюида, поступавшая в рудообразующую систему, имела температуру не ниже 250 °С, при этом начальные концентрации солей были крайне низкими, но в процессе достижения равновесного состояния системы «раствор-порода» соленость достигала значений 9 мас. % экв. NaCl. Руды образовались при температурах от 287 до 106 °С. Кристаллизация основной массы жильного материала происходила в температурных интервалах от 240 до 200 и от 180 до 140 °С. Широкое развитие флюорита, может быть объяснено, наряду с существованием глубинных разломов, являвшихся поставщиком F, также заимствованием флюидом Ca из прослоев известняков в рудовмещающей триасовой толще.

Ассоциация с субвулканическими интрузиями риолитов и гранит-порфиров, геохимические спектры руд, высокие концентрации Ag, Pb, парагенезис сфалерита, халькопирита, галенита и Ag-содержащей блеклой руды, позволяют отнести минерализацию Мяучанского РП к Ag-Pb-Zn типу (Кравцова, 2010; Колесников и др., 1999). Основным и единственным минералом серебра является Ag-содержащая блеклая руда. Обращает на себя внимание ограниченное распространение галенита в изученных образцах, отобранных с дневной поверхности. Физико-химические условия формирования минерализации Мяучанского РП наиболее близки Ag-Pb-Zn месторождениям Верхоянского пояса серебро-полисульфидно-оловянного типа (Гамянин и др., 2003). Состав минерализации Мяучанского РП и физико-химические условия их образования аналогичны месторождениям Мангазейское и Купольное Верхоянского пояса (Аникина и др., 2018). Руды Ag-Pb-Zn месторождения Гольцовое (Савва и др., 2021), которое расположено в 50 км к юго-западу, характеризуются меньшими концентрациями солей во флюиде при близких температурном диапазоне формирования и химическом составе растворов (преобладание Na и K над Fe, Ca и Mg). Требуется объяснения полное отсутствие в рудах Мяучанского РП сидерита, который является, наряду с кварцем, главным жильным минералом и Ag-Pb-Zn и месторождений Верхоянья, и месторождения Гольцовое. По нашему мнению, причиной этого является верхнерудное положение Мяучанского РП в вертикальной колонне Ag-Pb-Zn рудной системы. Сидерит здесь, являясь одним из наиболее ранних и высокотемпературных минералов (Кондратьева, Емельянова, 2017), так, температуры его образования на Ag-Pb-Zn месторождениях оцениваются в 570 – 400 °С (Шило и др., 1992). Косвенно на принадлежность Мяучана к верхнерудному уровню указывает отсутствие в рудах минералов Sn, которые есть в рудах всех полиметаллических объектов Омсукчанской зоны. Таким образом, мы считаем, что минерализация Мяучанского РП представляет собою верхний уровень оруденения, аналогичного месторождению Гольцовое. В пользу этого свидетельствует и сопоставление геохимических спектров: на Гольцовом первые позиции в нем, помимо Ag и Pb, занимают Sn и Bi (Кравцова и др., 1996), на объектах Мяучанского РП – As и Sb. На глубине 200 – 300 м от поверхности возможно выявление массивных сульфидных, существенно галенитовых руд, аналогичных Гольцовому. Наличие в рудах Мяучана золота мы объясняем наложением более поздней, возможно, золото-редкометалльной минерализации, связанной с гранитами омсукчанского комплекса, аналогичной месторождению Халали (Савва, 2018).

3. Выводы

Минерализация Мяучанского РП представляет верхний уровень Ag-Pb-Zn рудной системы, аналогичной месторождению Гольцовое. Результаты изучения ФВ наряду с данными по

распределению РЗЭ и рудных элементов указывают на формирование руд в эпитермальной обстановке, в гидротермально-магматической системе, образовавшейся при внедрении субвулканических интрузий риолитов-гранит-порфиров, и вовлечении в зону рудоотложения флюидов разной солености и температур, отделившихся при кристаллизации кислой магмы и образовавшихся в конвективных ячейках при нагревании метеорных и захороненных морских вод. Отложение руд происходило в результате вскипания и смешения флюидов в диапазоне температур 287 – 106°C, при изменениях солености растворов от 0,5 до 9 мас. % экв. NaCl. На глубине 200 – 300 м от поверхности возможно выявление массивных сульфидных руд, аналогичных месторождению Гольцовое, а ниже, на глубинах порядка 0,5 км – олово-полисульфидной минерализации.

4. Литература

- [1] Anikina E.Y., Bortnikov N.S., Klubnikin G.K., Gamyandin G.N., Prokof'ev V.Y. The Mangazeya Ag–Pb–Zn vein deposit hosted in sedimentary rocks, Sakha-Yakutia, Russia: mineral assemblages, fluid inclusions, stable isotopes (C, O, S), and origin // *Geology of Ore Deposits*. – 2016. – V. 58. – № 3. – P. 182-210.
- [2] Bau M. Rare-earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the oxidation state of europium // *Chemical Geology*. 1991. V. 93. P. 219–230.
- [3] Gamyandin G.N., Goryachev N.A., Bortnikov N.S., Anikina E.Yu. Types of silver mineralization in Verkhoyansk-Kolyma mesozones (geology, mineralogy, genesis, and metallogeny) // *Pacific Geology*. – 2003. – V. 6. – № 6. – P. 113-126.
- [4] Kondratieva L.A., Yemelyanova N.N. Typomorphism of endogenous carbonates as an indicator of the formation type of mineralization // *Rudy i metallurgiya*. – 2017. – № 2. – P. 29-39 [In Russian].
- [5] Kravtsova R.G., Zakharov M.N., Ivanov O.N. Complex geochemical studies of Pestrinskiy silver ore field (North-East Russia) // *Ore Deposits Geology*. – 1996. – V. 38. – № 5. – P. 424-436.
- [6] Kravtsova R.G. Geochemistry and genesis of gold-silver systems of the Northern Okhotsk region. – Novosibirsk, Geos, 2010 [In Russian].
- [7] Polin V.F., Khanchuk A.I., Tikhomirov P.L., Travin A.V. The first data of U/Pb and ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of the pre-Dzhugdzhur volcanics: new evidence of time diversity in the formation of individual sectors of the Okhotsk–Chukotka volcanogenic belt // *Doklady Earth Sciences*. – 2021. – V. 497. – № 2. – P. 273–280.
- [8] Savva N.E., Volkov A.V., Lyubimtseva N.G., Prokofiev V.Y., Sidorov A.A., Murashov K.Y., Sidorova N.V. Gol'tsovoe Ag–Pb–Zn deposit (Northeastern Russia): geological setting, mineralogy, geochemistry, and ore formation conditions // *Geology of Ore Deposits*. – 2021. – V. 63. – № 3. – P. 185–211.
- [9] Shilo N.A., Sakharova M.S., Krivitskaya N.N., Ryakhovskaya S.K., Bryzgalov I.A. Mineralogy and genetic peculiarities of North-West part of the Pacific Rim. – Moscow, Nauka. – 1992 [In Russian].
- [10] Savva N.E. Mineralogy of silver in the North-East Russia. Moscow, Triumph, 2018 [In Russian].
- [11] Volkov A.V., Sidorov A.A., Chizhova I.A., Murashov K.Y., Savva N.E., Kolova E.E. The geochemistry of volcanogenic mineralization in the Northwestern segment of the Pacific ore belt: Northeast Russia // *Journal of Volcanology and Seismology*. – 2017. – V. 11. – № 6. – P. 389-406.

ЗОЛОТОНОСНОСТЬ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ВИСМУТА И ТЕЛЛУРА СПОКОЙНИНСКОГО 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

GOLD MINERALIZATION OF BISMUTH AND TELLURIUM OF THE SPOKOININSKY NODE (ALDAN SHIELD)

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

Annotation. The widespread expansion of telluride mineralization and its great importance in the formation of gold mineralization on the Aldan shield is confirmed. The distribution area of bismuth (including tellurium-bismuth) mineralization in the southern part of the Aldan shield, in the zone of influence of the Stanovoy deep fault, has been established.

The conducted mineralogical and geochemical studies show a large industrial prospect of the Maiskoye ore field, less affected by denudation processes, in contrast to the ores of the Spokoinoye ore field, which mostly served as a source of rich gold-bearing placers.

1. Введение

Спокойнинский рудный узел является новым перспективным рудным объектом Алдано-Становой золотоносной провинции, выявленным в ходе поисковых работ в 2020 году. Ранее поиски рудных объектов предпринимались с 1970 годов, но итогом были лишь разрозненные пункты минерализации с неясной структурной позицией и минералогией руд. Территория узла занимает верховья правого притока р. Тимптона — р. Улахан-Тараканда (Бол. Тырканда) и охватывает наиболее продуктивную юго-восточную часть Тыркандинского золотоносного района, известного еще с начала прошлого века богатыми россыпями золота, из которых было добыто более 20 тонн золота. Коренные источники золота, питающие россыпи до сих пор установлены не были.

Ранее проведенными исследованиями выявлены минералы Bi, Te и Ag, определены минеральные типы оруденения и особенности самородного золота [1,2]. В данной работе на основе новых результатов исследований уточнены минеральные типы оруденения и состав типоморфных минералов, а также определены перспективы золотого оруденения.

Минералого-геохимические исследования руд проведены с помощью микронзондового сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6480LV с энергетическим спектрометром фирмы OXFORD (ИГАБМ СО РАН (Якутск, Россия)).

2. Геология Спокойнинского рудного узла

Спокойнинский рудный узел расположен в пределах Майской синклинали структуры, сложенной амфиболовыми, биотит-амфиболовыми гнейсами, с прослоями дупироксеновых, диопсидовых гнейсов кюриканской свиты нижнего архея. Наиболее перспективными являются рудные поля Спокойное и Майское (рис.). Спокойное рудное поле расположено на левобережье нижнего течения рч. Спокойный в северной части узла, а Майское охватывает водораздел ручьев Спокойный, Майский и Таборный на юге.

Спокойное рудное поле приурочено к периклиналичному замыканию Майской синклинали, где отмечается слабая гранитизация гнейсов. Гнейсы инъецированы раннепротерозойскими гранитоидами и прорваны телами мезозойских магматитов (нордмаркитов, сиенит-порфиоров, роговообманковых и биотитовых порфиоров, минетт, спессартитов и вогезитов), образующих штокообразные, залежные тела, дайки и линзующиеся тела с резкими раздувами, приуроченные к осевым частям осложняющих складок.

Разрывные структуры относятся к системам Тыркандинского разлома: сдвиги, сдвиго-взбросы северо-западного простирания и Суннагинского разлома: сбросы, взбросы северо-восточного простирания. Менее проявлены пологие срывы широтного, субширотного простирания, характеризующиеся как взбросо-надвиги. Широтное и северо-западное направления в пределах рудного поля хорошо выражены аномалиями золота, образующими дискретную полосу, наиболее контрастными на пересечении со структурами Суннагинского разлома.

Пологозалегающие зоны рассланцевания широтного, субширотного простирания вмещают золоторудные тела и являются секущими, субсогласными к общему залеганию гнейсов. Линзо-лентообразные залежи кулисообразно сменяют друг друга в широтном направлении при выклинивании по простиранию. Углы падения от менее 10° до 30°, реже 40°. Мощность отдельных залежей варьирует от 0,1-0,5 м, до 1,6-2,5 м.

В отличие от Спокойного рудного поля Майское характеризуется значительно более высокой степенью гранитизации, особенно южной, наиболее возвышенной части участка и отсутствием крупных выходов мезозойских магматитов. В северной, более эродированной части поля рудные зоны вскрыты канавами на контактах с телами сиенит-порфиров, лампрофиров, которые также слабо золотоносны. На юге геохимические аномалии золота трассируют нескрытые интрузивы, предполагаемые по наличию высококонтрастных магнитных аномалий. Основная роль как рудоконтролирующего фактора также принадлежит пологим структурам типа взбросо-надвигов широтного и субширотного простирания. Другим важным фактором является наличие пликативных структур осложняющих Майскую синклиналь. Рудная минерализация локализуется в зонах рассланцевания, кливажа приуроченных к различным элементам складок, изгибам шарниров, поворотам крыльев и прочих осложняющих элементов. Рудные тела образуют полого и крутозалегающие залежи с углами падения от 10°-20°, до 70°. Рудные интервалы с золотым оруденением составляют 2,0-5,0 м, 7,0-10,0 м.

В целом, для Спокойнинского рудного узла предложена модель золотого оруденения объемного, нелинейного типа, связанного с элементами пликативных структур и взбросо-надвиговой тектоники во вмещающих гранитизированных метаморфических породах фундамента, представленной комбинацией залежеобразных тел с прожилково-вкрапленным сульфидно (пирит)-кварцевым типом оруденения. Оруденение локализуется в березитах по гнейсам и гранито-гнейсам с прожилково-вкрапленной пирит-кварцевой золоторудной минерализацией и связано с мезозойскими магматитами субщелочных формаций [3].

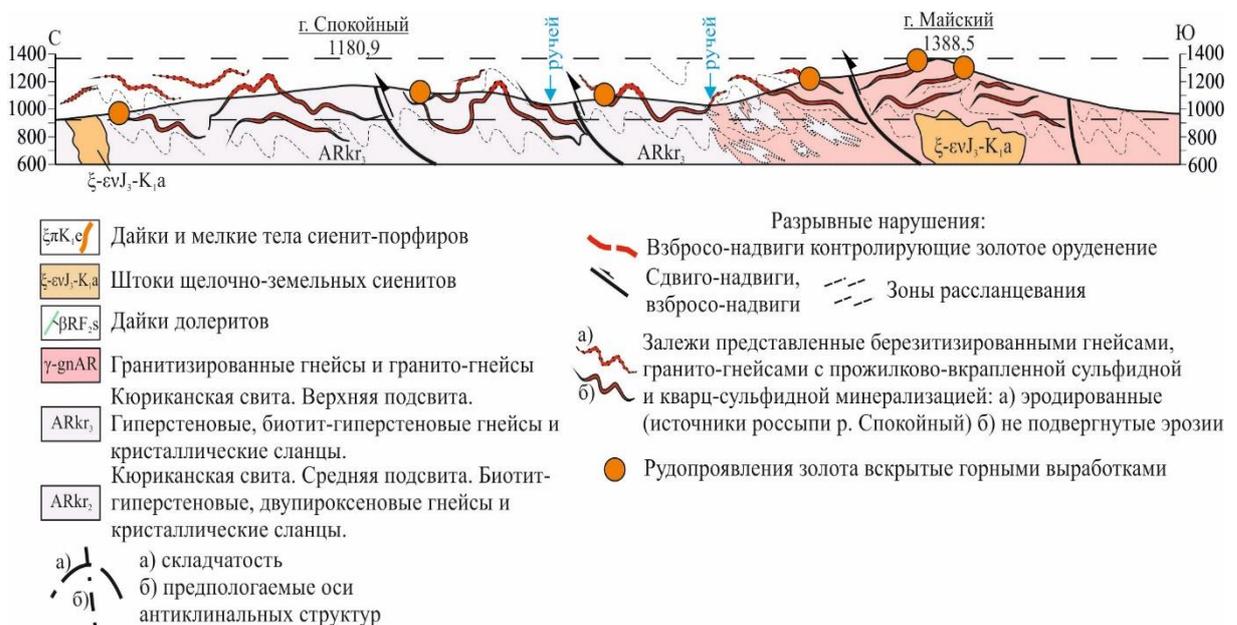


Рисунок 1 – Геологическая модель золотого оруденения Спокойнинского рудного узла, продольный разрез [3].

3. Результаты исследований

Золотоносность Спокойнинского рудного узла связана с золото-висмутовым (Au-Bi) и золото-серебро-теллуридным (Au-Ag-Te) оруденением, наложенным на раннюю полисульфидную минерализацию. Пирит наиболее распространенный минерал, часто является матрицей для поздней минерализации.

Золото-висмутовый минеральный тип развит ограниченно. Типоморфными минералами выступают самородный висмут, висмутин (BiS), теллуровисмутит (Bi_2Te_3), бурсаит ($\text{Pb}_5\text{Bi}_4\text{S}_{11}$), матильдит (AgBiS_2) и новые минералогические находки – купробисмутит ($\text{Cu}_8\text{AgBi}_{13}\text{S}_{24}$) и вторичные минералы висмута – смирнит (Bi_2TeO_5) и бисмоклит (BiOCl) (таблица 1, рисунок 2). Минерализация висмута преимущественно выявлена в рудах Майского рудного поля. Теллуровисмутит образует вытянутые кристаллы в пирите, бурсаит таблитчатые кристаллы в кварце. Самородный висмут в сростании с матильдитом заключен в пирите, с ними также выявлены матильдит со значительным содержанием в составе Te (7,11 мас.%), а также неясная кислородсодержащая фаза с губчатой поверхностью, в которой концентрация Te достигает 23,25 мас.%. Купробисмутит и смирнит наблюдались в самородном золоте: смирнит представлен дезинтегрированной массой в виде каймы, а купробисмутит в реликтовых зернах. В Спокойном рудном поле из минералов висмута выявлены матильдит и бисмоклит. Матильдит наблюдался в самородном золоте в тесном сростании с галенитом в виде каймы и микровключений в нем. Бисмоклит вторичный минерал висмута, обнаружен в каверне кварца в виде тетрагонального кристалла с усеченными под 45° гранями. Минералы висмута характеризуются присутствием значительной примеси Ag в бурсаите (3,96 мас.%) и купробисмутите (4,95 мас.%). Примеси Fe и/или Si в составе бисмоклита и смирнита обусловлены влиянием фоновой матрицы кварца и гидроксидов железа.

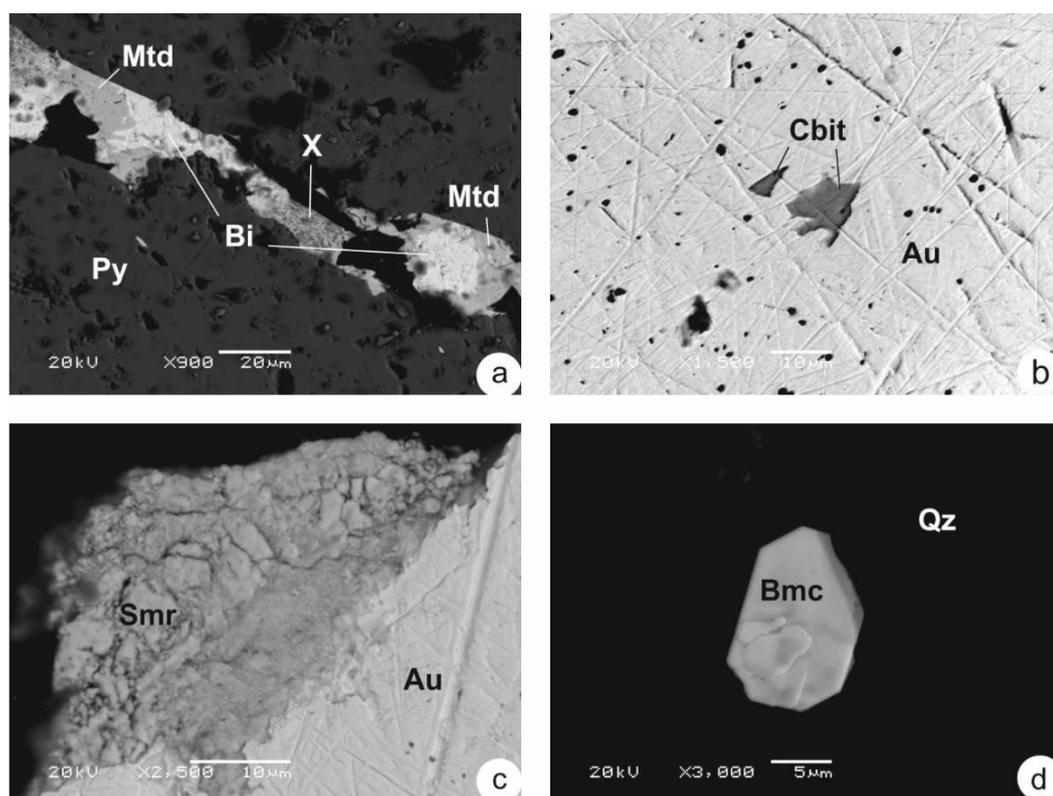


Рисунок 2 – Золото-висмутовая минерализация Спокойнинского рудного узла: а – висмут-матильдитовый (Bi, Mtd) прожилок с неустановленной фазой (X) в пирите (Py), б – реликты купробисмутита (Cbit) в самородном золоте (Au), с – дезинтегрированная масса смирнита (Smr) на краю самородного золота (Au), d – кристалл бисмоклита (Bmc) в кварце (Qz).

Таблица 1 – Химический состав висмутовых минералов, масс. %.

| Минерал | Bi | Te | Ag | Cu | Cl | Pb | S | Si | Fe | O | Сумма |
|-----------------|--------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|--------|
| Самородный Bi | 100,33 | | | | | | | | | | 100,33 |
| Теллуровисмутит | 51,43 | 47,89 | | | | | | | | | 99,32 |
| Висмутин | 81,50 | | | | | | 17,5 | | | | 99,01 |
| | | | | | | | 1 | | | | |
| Бурсаит | 36,63 | | 3,96 | | | 44,9 | 14,4 | | | | 99,92 |
| | | | | | | 2 | 1 | | | | |
| Матильдит | 56,32 | | 27,09 | | | | 15,3 | | | | 98,75 |
| | | | | | | | 3 | | | | |
| Купробисмутит* | 60,36 | | 4,95 | 12,28 | | | 16,3 | | | | 93,93 |
| | | | | | | | 4 | | | | |
| Бисмоклит* | 71,59 | | | | 11,8 | | | 2,00 | 2,13 | 11,5 | 99,13 |
| | | | | | 7 | | | | | 5 | |
| Смирнит* | 66,79 | 19,13 | | | | | | | 1,86 | 12,3 | 100,16 |
| | | | | | | | | | | 8 | |

Примечание. * отмечены впервые установленные минералы

Золото-серебро-теллуридный тип представлен петцитом (Ag_3AuTe_2), гесситом (Ag_2Te), кервеллеитом (Ag_4TeS), самородным серебром и акантитом (Ag_2S). Кроме того в рудах установлены новые минералы: теллуриды Au и Ag – креннерит-калаверит ($AuTe_2$) и сильванит ($(Au,Ag)_2Te_4$), полибазит $[Ag_9CuS_4] [(Ag,Cu)_6(Sb,As)_2S_7]$ и ютенбогаардтит (Ag_3AuS_2) (таблица 2, рисунок 3). Золото-серебро-теллуридный тип, также как и золото-висмутовый, более развит в Майском рудном поле. Минералы петцит-гесситового парагенезиса и полибазита образуют овальные и неправильной формы зерна в пирите. Теллуриды группы креннерита наблюдались в виде включений в гессите и петците, тяготея к центральным частям зерен. Имеют место случаи сростания гессита с теллуровисмутитом. В рудах Спокойного поля определены акантит, самородное серебро и ютенбогаардтит, а гессит-кервеллеитовый парагенезис развит в виде округлых микронных включений в самородном золоте. Наряду с кервеллеитом стехиометричного состава, встречается кервеллеит со значительной примесью меди до 5,92%. Ютенбогаардтит выявлен в ассоциации с акантитом, реже самородным золотом в гидроксидах железа по пириту. Ютенбогаардтит характеризуется переменным составом, в нем постоянно присутствует железо, заимствованное из матрицы.

4. Обсуждение

Золото-висмутовая минерализация ограниченно развита на месторождениях Алданского щита. Минерализация висмута установлена в рудах месторождений, сближенных со Становой плутоногенной областью в районах проявления даек и малых интрузий кислого состава: Алтан-Чайдах (гранодиориты, диоритовые порфириды, дациты) и Бодороно (диоритовые порфириды) [4,5]. Данные месторождения, также как и Спокойнинский узел, приурочены к зоне Тыркандинского разлома. Кроме того, висмутовая минерализация развита в рудах Лебединского узла, расположенного в центре магматогенной структуры, где проявлен наиболее интенсивный магматизм в Центрально-Алданском рудном районе. Наличие висмутовой минерализации в рудах Спокойнинского узла позволяет предположить влияние кислой магмы. Теллуридная минерализация широко проявлена на многих золоторудных месторождениях Алданского щита [6], где она является поздней, наложенной на раннюю пирит-кварцевую минерализацию. Выделяются Au-Bi-Te, Au-Ag-Te и смешанный типы теллуридной минерализации, в распределении которых установлена зональность. На севере Алданского щита доминирует Au-Ag-Te тип. На юге золотое оруденение месторождений Бодороно и Алтан-Чайдах, несущее разнообразные теллуриды висмута, отнесено к Au-Bi-Te типу. Руды Спокойнинского узла характеризуется присутствием смешанной Au-Bi-Ag-Te минерализации. К Bi-Te минералам относятся теллуровисмутит и смирнит, к Au-Ag-Te – теллуриды группы

креннерита, гессит, петцит и кервеллеит. Тогда как гессит, петцит и теллуровисмутит являются распространенными минералами теллура Алданского щита, теллуриды золота группы креннерита установлены в ограниченном числе месторождений, а кервеллеит обнаружен только в рудах Спокойнинского узла.

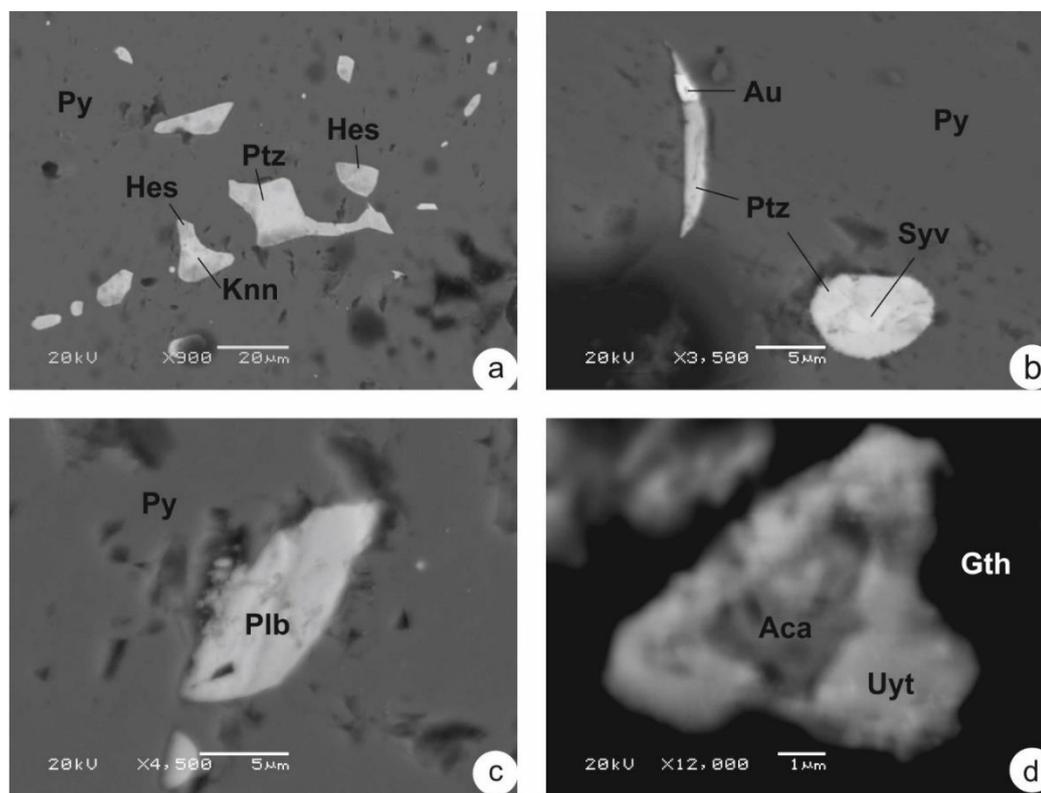


Рисунок 3 – Золото-серебро-теллуридная минерализация Спокойнинского узла: a-b – парагенезис креннерита (Knn), сильванита (Syv), петцита (Ptz), гессита (Hes) и самородного золота (Au) в пирите (Py), c – полибазит (Plb) в пирите (Py), d – акантит (Aca) с каймой ютенбогардтита (Uyt) в гидроксидах железа (Gth).

Таблица 2 – Химический состав минералов Au, Ag и Te, масс.%.
 * – отмечены впервые установленные минералы

| Минерал | Ag | Au | Sb | Te | Cu | As | S | Fe | Сумма |
|--------------------------|-------|-------|------|-------|------|------|-------|------|--------|
| Самородное Ag | 99,98 | | | | | | | | 99,98 |
| Сильванит* | 7,08 | 28,34 | | 63,08 | | | | | 98,50 |
| Креннерит* | 3,71 | 42,60 | | 52,17 | | | | 2,41 | 100,89 |
| Гессит | 62,33 | | | 38,40 | | | | | 100,73 |
| Петцит | 43,17 | 21,71 | | 35,60 | | | | | 100,48 |
| Кервеллеит | 68,23 | | | 25,12 | | | 5,07 | | 98,42 |
| Си-содержащий кервеллеит | 66,14 | | | 24,14 | 5,92 | | 5,38 | | 101,58 |
| Полибазит* | 64,57 | | 6,81 | | 8,36 | 2,26 | 16,28 | 2,26 | 100,53 |
| Ютенбогардтит* | 56,45 | 28,53 | | | | | 11,79 | 4,33 | 101,10 |
| Акантит | 88,16 | | | | | | 8,12 | 2,91 | 99,19 |

Примечание. * отмечены впервые установленные минералы

Преимущественным распространением как висмутовой, так и теллуридной минерализации на площади Спокойнинского узла характеризуются руды Майского поля. Причиной, по-видимому, является с одной стороны, большая гранитизация вмещающего комплекса, наличие нескрытых массивов, а также более высокий гипсометрический уровень золотого оруденения. С другой стороны в Спокойном поле значительная часть руды, несущей минерализацию Вi и Те подверглась денудации, и вероятно послужила источником россыпного золота. В рудах

наблюдался вторичный бисмоклит, а матильдит, гессит и кервеллеит сохранились лишь в виде реликтов в самородном золоте.

Огромное значение висмутовой и теллуридной минерализации в формировании золотого оруденения рассматривалось и экспериментально доказано многими исследователями. В частности, модель поглощения самородного золота жидким висмутом показана в работе [7], Bi/Te контроль процессов минерализации золота в исследовании [8], замещение Au-Ag теллуридов самородным золотом в процессе растворения-повторного осаждения в экспериментах [9,10].

5. Выводы

Подтверждается широкое развитие теллуридной минерализации и ее большое значение в формировании золотого оруденения на Алданском щите. Установлен ареал распространения висмутовой (в том числе теллур-висмутовой) минерализации в южной части Алданского щита, в зоне влияния Станового глубинного разлома.

Проведенные минералого-геохимические исследования показывают большую промышленную перспективу Майского рудного поля, менее затронутую денудационными процессами, в отличие от руд Спокойного рудного поля, большей частью послуживших источником богатых золотоносных россыпей.

6. Благодарности

Исследование выполнено за счет государственного задания ИГАБМ СО РАН.

7. Литература

- [1] Anisimova, G.S., Kondratieva, L.A., Kardashevskaya, V.N. Mineral types of gold mineralization of the Spokoyninsky ore node of the Tyrkandinsky district // Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference “Geology and mineral resources of the North-East of Russia”. – Yakutsk, 2022. – P. 161-165.
- [2] Kondratieva, L.A., Anisimova, G.S., Kardashevskaya, V.N., Sokolov E. P., Khalgaev E. U. Typomorphic features of native gold of the Spokoyninsky node (Aldano-Stanovoy shield) // Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference “Geology and mineral resources of the North-East of Russia”. – Yakutsk, 2021. – P. 176-179.
- [3] Sokolov, E.P., Babkina, T.G., Makogonov, I.V., Linnik, I.A., Khalgaev, E.U., Shmatkova, L.E., Anisimova, G.S., Kondrat'eva, L.A., Kardashevskaya, V.N. A new type of gold mineralization in the basement of the Aldan-Stanovoi gold-bearing province // Ores and metals. – 2022. – № 2. – P. 122-140.
- [4] Anisimova, G.S., Sokolov, E.P. Altan-Chaidakh—Promising object of the Southern Yakutia // Otechestvennaya Geol. – 2015. –No. 5. – P. 3-10.
- [5] Anisimova, G.S., Sokolov, E.P., Kardashevskaya, V.N. Gold-rare-metal (Au-Mo-Te-Bi) mineralization of the Upper-Algominsky gold-bearing region (Southern Yakutia) // Otechestvennaya Geol. – 2017. – No. 5. – P. 12-22.
- [6] Kondratieva, L.A., Anisimova, G.S., Kardashevskaya, V.N. Types of Tellurium Mineralization of Gold Deposits of the Aldan Shield (Southern Yakutia, Russia) // Minerals. – 2021. – No. 11. – 698 p.
- [7] Douglas, N., Mavrogenes, J., Hack, A., England, R. (2000) The liquid bismuth collector model: An alternative gold deposition mechanism // 15th Austral Geol Conv Abstr 59:135
- [8] Haoxuan Feng, Ping Shen, Rixiang Zhu, Andrew G. Tomkins, Joël Brugger, Ge Ma, Changhao Li, Yang Wu. Bi/Te control on gold mineralizing processes in the North China Craton: Insights from the Wulong gold deposit // Mineralium Deposita. – 2023. – 58. – P. 263-286.
- [9] Zhao, J., Brugger, J., Grundler, P.V., Xia, F., Chen, G., Pring, A. Mechanism and kinetics of a mineral transformation under hydrothermal conditions: Calaverite to metallic gold // Am. Miner. 2009. – 94. – P. 1541-1555.
- [10] Zhao, J. and Pring, A. Mineral Transformations in Gold–(Silver) Tellurides in the Presence of Fluids: Nature and Experiment // Minerals. – 2019. – 9(3). – 167 p.

АНАЛИЗ ПРИРОДЫ ТЕРМО- И ПЬЕЗОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПО ДАННЫМ АНИЗОТРОПИИ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ

Константин Константинов^{1,2}, Иннокентий Константинов¹, Александр Черемных²,
Илья Декабрёв², Галина Орлова²

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

2 ФГБУН «Институт земной коры СО РАН», 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128

ANALYSIS OF THE NATURE OF THERMO- AND PIEZO-REMANETIZATION OF ROCKS BASED ON THE DATA ANISOTROPIES OF THE MAGNETIC SUSCEPTIBILITY

Konstantin Konstantinov^{1,2}, Innokenty Konstantinov¹, Alexander Cheremnykh²,
Ilya Dekabryov², Galina Orlova²

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

2 Institute of the Earth Crust, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
128 Lermontov str., Irkutsk, 664033, Russia

Annotation. Studies of the anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) of sedimentary and igneous rocks that have experienced the impact of dynamo and contact metamorphism as a result of the intrusion of intrusive bodies (mafic rocks, kimberlites). Such zones of epigenetic changes in rocks are petromagnetic heterogeneities (PMH). Depending on the physical impact from the side of intrusive bodies in the form of temperature and pressure, it is advisable to name the PMH, respectively, «burning» and «stress». Universal diagnostic features of the classification of these PMH, which may be associated with specific types of mineral deposits, do not yet exist in the practice of petrophysical studies. The paper shows that the type of AMS of the studied PMH does not always correspond to the primary lithological and petrographic structure of rocks. It has been experimentally confirmed that, compared with temperature, the influence of pressure (stress) on the host rocks of the endocontact is reflected in the values of the AMS parameters most contrastingly. In the course of laboratory experiments on the impact on samples of temperature and pressure, regularities were established in changing the values of AMS parameters, which are advisable to use as a petrophysical search criterion when interpreting a wide range of geological and geophysical data in order to search for mineral deposits.

1. Введение

Петромагнитные неоднородности (ПМН) представляют собой петрофизические таксоны, которые испытали в течение времени изменения первоначальных магнитных значений (скалярные, векторные) горных пород в результате воздействия физико-химических процессов [1]. Первоначально ПМН во вмещающих породах были установлены в ходе поисковых геолого-геофизических работ на коренные месторождения алмазов (трубки Белая, Комсомольская, Нюрбинская и др.) и, в последующем, подтверждены на других объектах Восточной Сибири. В работе рассматриваются два типа ПМН: «обжига» (ПМН 2 типа) и «стресса» (ПМН 5 типа), формирование которых может происходить за счет процессов динамо- и контактового метаморфизма: в зоне контакта вмещающих пород с магматическими телами (кимберлиты, базиты и т. п.), а также в процессе тектонических деформаций (складчатость, дробление и др.). Этим типам ПМН будет отвечать определенная природа намагниченности, соответственно – термоостаточная I_{nt} и пьезоостаточная (динамическая, деформационная) I_{np} . Мощности ПМН

могут меняться в широких пределах, что зависит от энергии, размеров и формы магматического тела, проницаемости вмещающих горных пород и пр. Согласно [2]: «... универсального диагностического признака I_{nt} пока не существует». Логично предположить, что для I_{nr} , которая по сравнению I_{nt} менее изучена, оценочные критерии тем более отсутствуют. Между тем с той или иной природой намагниченности (I_{nt} или I_{nr}) вмещающих пород может быть связан петрофизический поисковый критерий ряда месторождений полезных ископаемых [3]. Поэтому, актуальность настоящих исследований заключается в стремлении определения однозначных универсальных диагностических признаков классификации векторов ЕОН температурной I_{nt} и динамической I_{nr} природы, которых пока в практике палеомагнитного метода не существует.

Таким образом, целью настоящих исследований современной намагниченности рассматриваемых ПМН 2 и 5 типов является установление количественных признаков их классификации и доказательства генетической связи с конкретными тектоно-магматическими процессами. Основными задачами исследований являются:

1. Обобщение и анализ имеющегося материала по петро- и палеомагнетизму горных пород из разных геологических объектов Восточной Сибири и установление на их основе закономерностей изменения магнитных свойств ПМН 2 и 5 типов;
2. Экспериментальное подтверждение полученных в п. 1 выводов и разработка качественных и количественных критериев диагностики ПМН 2 и 5 типов, от которых зависит корректность интерпретации геолого-геофизических материалов при поисках рудных месторождений.

Объекты исследований представляют собой коренные выходы (естественные и искусственные обнажения) разновозрастных осадочных и магматических (базальты, долериты, кимберлиты) горных пород. Отбор ориентированных образцов проводился в современной системе координат [4]. Дополнительно изучался ориентированный к забою керн поисковых, разведочных и гидрогеологических скважин, для оценки характера изменения значений параметров АМВ горных пород в объеме верхней части разреза. С каждого образца выпиливалось по 2 - 3 кубика с ребром 20 мм. По одному из них проводились исследования анизотропии магнитной восприимчивости (АМВ) [5] на каппа-мосте KLY-3S (AGICO, Чехия). Давление создавалось с помощью гидравлического пресса ВМ-3.4 (ВЗ «Эталон», Россия) вдоль меридиональной оси кубика N. Нагрев образца осуществлялся в экранированной электропечи ММТД-80 (Англия). Обработка полученных данных выполнена в программах Anisoft42 [6].

2. Аналитические и экспериментальные работы

Для решения поставленных задач выбран метод изучения АМВ, который может быть востребован для измерения петроструктуры горных пород с целью определения их происхождения и эволюции [2, 5]. В силу своего формирования и преобразования величина магнитной восприимчивости χ в разных направлениях может существенно различаться. Сказывается анизотропия среды P_2 . Более наглядно АМВ можно представить в виде эллипсоида, где она достигает наивысшей интенсивности вдоль длинной оси K_1 , а наименьшей – вдоль короткой оси K_3 . Кроме того, имеются многочисленные параметры величины АМВ для определения формы эллипсоида: например, линейности P_1 (L), плоскости P_3 (F), формы T и др. В ходе многолетних палеомагнитных исследований разных структурно-вещественных комплексов (СВК) Восточной Сибири, включающих также рудные месторождения, собран уникальный материал по АМВ, который был проанализирован в рамках поставленных задач (см. выше). В результате обработки большого количества петрофизических, геологических, и др. данных мы, согласно [5], выделяем два основных типа первичных структур АМВ, которые с высокой степенью вероятности описывают осадочные и магматические образования и связанные с ними геологические процессы: «осадочный» (ОАМВ) и «даечный» (ДАМВ) [3]. Для ОАМВ эпигенетически стерильных (сохранивших первичную структуру) осадочных пород плоскость магнитного расслоения (ПМР) субгоризонтальная, параметр формы T стремится к 1, а $F \gg L$ (рис. 1 А). ОАМВ присущ как излившимся покровам базальтов так и силлам долеритов, но значения параметров F, L и T из-за особенностей их становления могут несколько

отличаться от осадков (рис. 1 В). Для ДАМВ - ПМР субвертикальная и совпадает с простираем тела (рис. 1 Б). По осям K1 и K2 можно оценить относительную скорость движения магмы (базиты, кимберлиты и др.).

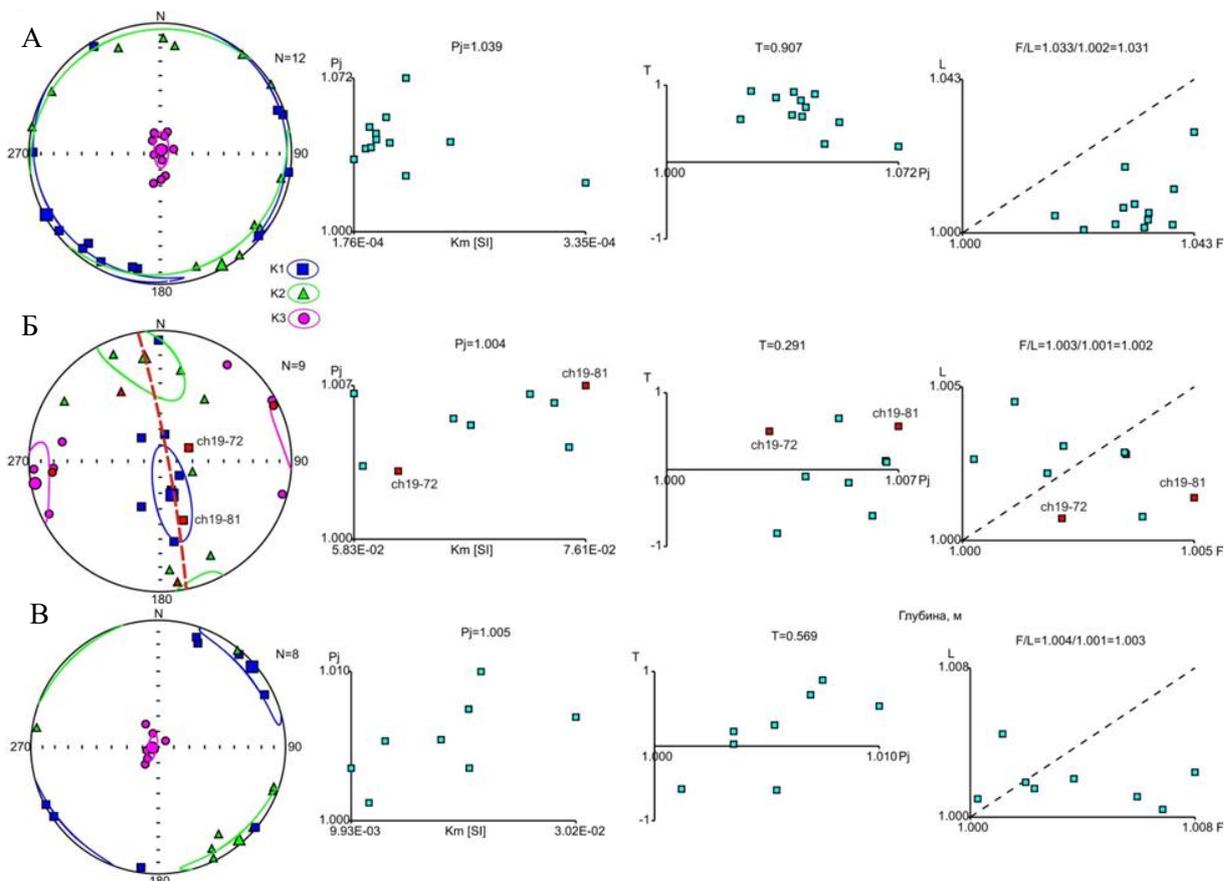


Рисунок 1 – Основные типы АМВ горных пород. А – «осадочный» (ОАМВ) песчаников р. Лена обн.12-40; Б – «даечный» (ДАМВ) дайки долеритов р. Чуна обн. 19-8; В - базальтах аппаинской свиты р. Ыгыатта обн. 10-23. Красная штриховая линия – плоскость магнитного расслоения, образованная главными осями K1 и K2. Остальные пояснения в тексте.

В процессе изучения АМВ горных пород и руд получен материал [7], который не укладывается в прокрустово ложе классических стандартов [5]. Имеющиеся примеры требуют логического объяснения характера изменения магнитных свойств в зависимости от воздействия на них термодинамических процессов. Например, на участке р. Ыгыатта изучены четыре обнажения (с обн.10-24 по обн.10-27), сложенные алевропесчаниками аппаинской свиты позднего девона [8]. Видимых интрузивных образований в их пределах не установлено, хотя не исключено их более широкое развитие на территории в пошлом. Тем не менее, в обн.10-24 установлен классический ОАМВ: $T \rightarrow 1$, $F \gg L$ (рис. 2 А); в обн.10-25 - ОАМВ сохраняется, но показатели (Т, F и L) ниже (рис. 2 Б); в обн.10-26 – классический ДАМВ с северо-западным простираем плоскости магнитного расслоения (рис. 2 В); в обн.10-27 – ГАМВ (рис. 2 Г). Возможно, что anomalous поведение АМВ в районе обн.10-26 образовано магнитоупругим (сейсмамагнитным) 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.

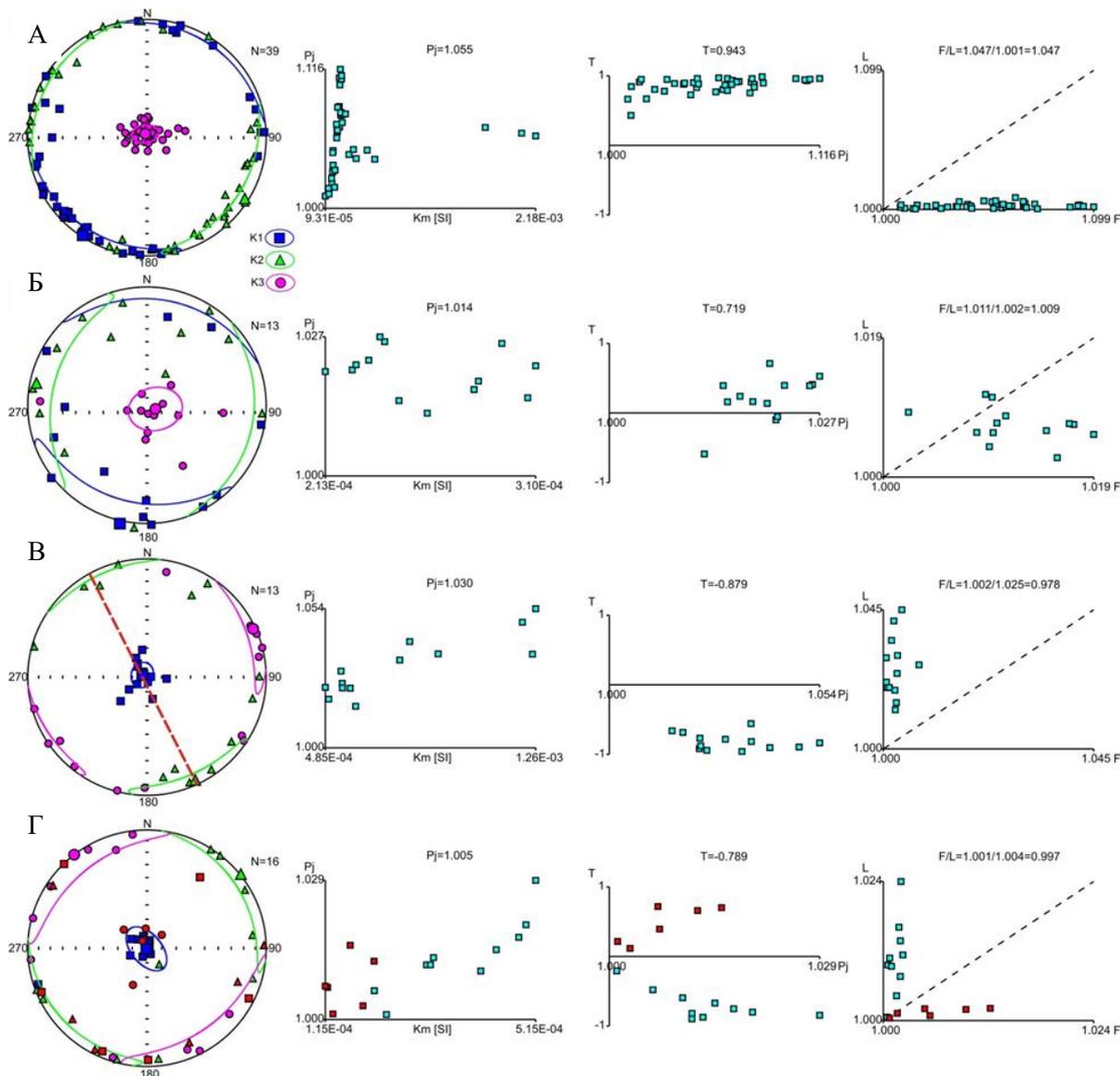


Рисунок 2 – Изменения типа АМВ алевропесчаников аппаинской свиты р. Ыгыатта, ЯАП. А - обн.10-24, Б – обн.10-25, В – обн.10-26, Г - обн.10-27.

Приведенных парадоксальных примеров по изучению АМВ, гистерезисных параметров и векторов ЕОН горных пород, вполне достаточно для того чтобы выдвинуть рабочую гипотезу: «Влияние давления на АМВ вмещающих пород на много значительнее, чем температуры». Для доказательства этого тезиса сопоставлялись основные характеристики АМВ, полученные в ходе экспериментов по воздействию на эпигенетически стерильные (соответствующие первоначальному типу АМВ) горные породы температуры и давления (рис. 3).

Для экспериментов использовались образцы осадочных и магматических горных пород с характерными первичными (ненарушенными) магнитными текстурами эллипсоида АМВ. Они подвергались пошаговому физическому воздействию температурой и давлением с последующими измерениями тензоров АМВ.

На термоанализ были взяты образцы из юрских алевропесчаников р. Лена, п. Жиганск (обн.12-40, рис. 1 А), которые характеризуются ОАМВ. С увеличением температуры степень анизотропии Р, форма Т и пр. параметры не меняется, если не происходит роста значения магнитной восприимчивости из-за химических превращений. Нагрев дайки долеритов обн. 8 р. Чуна (обн.19-8; рис. 1 Б) тоже не сказывается на изменении типа АМВ – ДАМВ сохраняется (рис. 2 А).

Для постановки эксперимента с давлением взяты базальты аппаинской свиты ДЗар обн.16-15 р. Вилюй, п. Крестях, характеризующиеся ОАМВ. Но в отличие от осадков они обладают

большей вязкостью, что необходимо для надежности эксперимента. В ходе эксперимента (рис. 3 Б), мы видим, что оси эллипсоида АМВ стремятся занять оптимальные направления относительно приложенного давления (силы). Идет рост степени анизотропии Р без изменения величины магнитной восприимчивости. Тип стереограммы сохраняется (поскольку в эксперименте приложенная сила совпадает с максимальной осью эллипсоида АМВ), в то время как скалярные параметры АМВ изменяются: форма Т – с положительной на отрицательную, и с плоскостной F на линейную L.

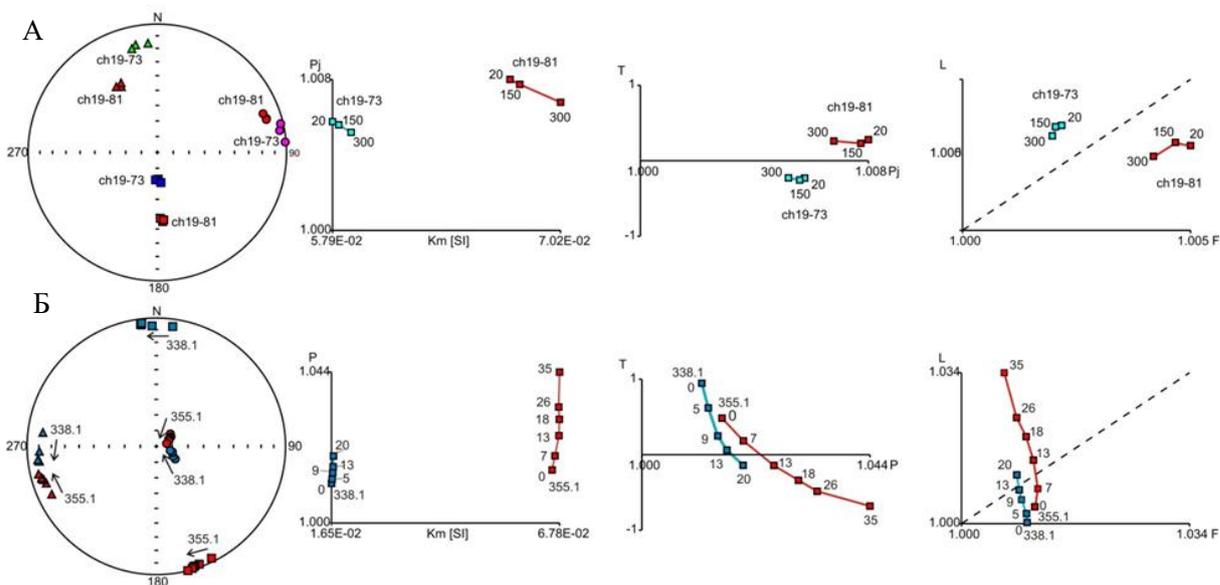


Рисунок 3 – Эффект изменения параметров АМВ под действием температуры (А) и давления (Б), соответственно для долеритов и базальтов.

3. Выводы

Термо- и бародинамические процессы по-разному отражаются на характере АМВ вмещающих пород. В результате проведенных петромагнитных исследований, можно сделать вывод, что на исходную АМВ вмещающих пород не влияет тепловое воздействие интрузий, способных, в тоже время, полностью или частично изменять направление векторов характеристической ЕОН. В тоже время, АМВ вмещающих пород в большей своей степени зависит от количества механической энергии, выделяемой в процессе внедрения интрузий и складкообразования, способной вызвать деформацию в доменном строении ферромагнитных минералов (пьезоэффект). На основе наблюдений можно сделать ряд выводов, которые целесообразно использовать для практического применения:

1. Роль петро- и палеомагнитных методов, в силу их специфики, может оказаться значимой в решении широкого круга геологических задач, когда отсутствуют явные признаки изменения минералогического и химического состава вмещающих пород под действием температуры и давления.
2. По положению ПМР эллипсоида АМВ в современной системе координат можно установить элементы залегания горных пород, у которых в коренном обнажении отсутствуют явные признаки напластования или структуры течения, что весьма важно для введения тектонической поправки в векторы характеристической ЕОН.
3. По сравнению с температурой, влияние давления (стресса) на АМВ вмещающих пород наиболее контрастное. Характер тектонических напряжений более всего отражается на:
 - изменении ориентировки образующих осей (тензоров K1, K2 и K3) эллипсоида АМВ, направления которых зависят от приложенной силы;
 - значения скалярных параметров, таких как: «степень» P2, «форма» Т, «линейность» L и «плоскость» F.

4. Соответствие типа АМВ (например, осадочный) генезису горных пород (например, терригенно-осадочные) не является строгим доказательством первичности природы векторов ЕОН.

5. В пределах экзоконтакта интрузий по характерным признакам АМВ возможно установить температурную I_{nt} или динамическую I_{nr} природу метакристаллической ЕОН вмещающих пород.

Полученные выводы целесообразно использовать для определения местоположения эпицентров и картирования зон повышенной проницаемости (пористости, трещиноватости и т. п.), связанных с внедрением кимберлитовых трубок. В этом случае, в результате стресса вокруг трубок формируются ореолы эпигенетически измененных вмещающих пород, которые могут отражаться не только на минералогические, химические, но и, естественно, на физические свойства вмещающих пород. Поэтому, такие зоны динамического влияния следует рассматривать в качестве петрофизических неоднородностей (плотностные, электрические, магнитные и т. п.), которые будут определяться соответствующими петрофизическими поисковыми критериями. Возможны отражения таких «петрофизических ореолов рассеивания» (петрофизических неоднородностей) связанных конкретными месторождениями полезных ископаемых, и в наблюдаемых геофизических полях. Например, некоторые кимберлитовые трубки начинают «светиться» на планах изотроп разных параметров АМВ [3]. Это повышенные значения R_2 и отношение L/F в сочетании с низким показателем формы T . Качественную интерпретацию по оконтуриванию зон эпигенеза можно провести и по стереограммам АМВ. Дополнительно к стереограммам, можно анализировать и графики зависимости параметров АМВ. В этой связи рекомендуется постановка метода АМВ по изучению вмещающих горных пород с целью разработки петрофизического поискового критерия разных типов месторождений полезных ископаемых на основе изучения петрофизических неоднородностей.

4. Благодарности

Работа проводилась в рамках государственного задания ИЗК СО РАН (проект №21050400020-9). Исследования выполнены в ЦКП ИЗК СО РАН.

5. Литература

- [1] Konstantinov K.M., Mishenin S.G., Tomshin M.D., Kornilova V.P., Kovalchuk O.E. Petromagnetic inhomogeneities of the Permo-Triassic traps of the Daldyn-Alakit diamond-bearing region (Western Yakutia) / *Litosfera*, 2014. – No. 2. – P. 77-98.
- [2] Pechersky D.M., Sokolov D.D. Paleomagnetology, petromagnetology and geology. Dictionary-reference book for neighbors in the specialty. – M. IFZ, 2010. (<http://paleomag.ifz.ru/>).
- [3] Konstantinov K.M., Artyomova E.V., Konstantinov I.K., Yakovlev A.A., Kirguez A.A. Possibilities of the magnetic susceptibility anisotropy method in solving geological and geophysical problems of prospecting for primary diamond deposits // *Geophysics*. – 2017a. – No. 1. – P. 67-77.
- [4] Khramov A.N., Goncharov G.I., Komissarova R.A., Pisarevsky S.A., Pogarskaya I.A., Rzhnevsky Yu.S., Rodionov V.P., Slautsitais I.P. Paleomagnetology. Ed. Khramova A.N. – L.: Nedra, 1982. – 312 p.
- [5] Tarling D.H., Hrouda F. The magnetic anisotropy of rocks. – London, Chapman&Hall, 1993. – 217 p.
- [6] Jelínek V. Measuring anisotropy of magnetic susceptibility on a slowly spinning specimen – Basic theory. Agico Print, № 10, Brno. 1997. 27 p.
- [7] Konstantinov K.M. Magnetism of kimberlites and traps of the junction zone of the Vilyui and Tunguska synclises of the Siberian platform. Abstract of the dissertation of Dr. geol.-min. Sciences. Irkutsk. – Irkutsk State University, 2014. – 34 p.
- [8] Konstantinov K.M., Tomshin M.D., Ibragimov Sh.Z., Khuzin M.Z., Konstantinov I.K., Yakovlev A.A., Artyomova E.V. Petro- and paleomagnetic studies of basalts of the Upper Devonian Appain Formation (Western Yakutia) // *Geodynamics and Tectonophysics*. – 2016b. – T. 7. – No. 4. – P. 593-623. doi:10.5800/GT-2016-7-4-0224.

САМОРОДНОЕ ЖЕЛЕЗО ГОРНЫХ ПОРОД И МЕТЕОРИТОВ

Альбина Копылова

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

NATIVE IRON OF ROCKS AND METEORITES

Albina Kopylova

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

Annotation. The comparison of the mineralogical composition of the native phases of meteorites with related formations from rock deposits has been conducted. The distinct iron association of meteorites with intermetallic compounds of nickel, cohenite, carbonaceous matter, and troilite is a characteristic feature of the terrestrial native metal. Variations in the content of nickel admixtures distinguish meteoric iron from terrestrial iron. Both in meteorites and in terrestrial settings, nickel-iron exhibits signs of crystallization from high-temperature melts. The contents of Au, Ag, and PGE and other siderophile elements in the metallic phase of terrestrial mafic rocks and in iron meteorites are quite similar.

1. Введение

На территории Якутии зафиксировано 8 находок железных метеоритов и падение одного хондрита. В пределах Сибирской платформы известны трапповые интрузивы, в которых самородное железо формирует крупные скопления. Сотрудниками Геологического музея была исследована часть якутских метеоритов и изучены проявления самородного железа в базитах Сибири и Якутии. На основании собственных данных в работе проводится сравнение вещественного состава металлического железа земного и космического происхождения. 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. Основная часть

Сравнительное изучение земного самородного железа и железных метеоритов показало, что парагенезисы, свойственные метеоритам, распространены и в земных условиях и основное отличие земного и метеоритного железа в содержании никеля. Железные метеориты состоит главным образом из двух модификаций никелистого железа, представленного камаситом и тэнитом [1]. Камасит в метеоритах имеет форму балок, а тэнит образует тончайшие удлиненные частицы в сростках с камаситом. Содержание никеля в камасите в среднем 6,6 %, в тэните 27,6 %. Для высоконикелистого железа метеоритов характерными являются видманштеттеновые структуры распада [2]. В условиях Земли металлическое железо формирует желвакообразные скопления различных размеров вплоть до крупных глыб весом несколько тонн. Железо занимает в подобных образованиях от 10-20 до 70% объема желвака, остальная его часть занята высокожелезистыми силикатами. Часто по периферии обособлений железа наблюдается оторочка из акцессорной сульфидной минерализации, сложенная пентландитом, халькопиритом, борнитом. Такие обособления на территории нашей страны известны на севере Красноярского края (Джалтулский и Маймечинский массивы) и в Якутии вблизи пос. Айхал (Айхальский силл) [3, 4]. Как правило, металл в горных породах Земли в основном представлен ферритом, выделения камасита и тэнита наблюдаются крайне редко. Содержание Ni в феррите находится в пределах от десятых долей до 1-2 %.

С никелистым железом как в метеоритах так и в земном железе постоянно ассоциируют карбиды, сульфиды и самородная медь. Карбид железа представлен когенимом (Fe_3C), сульфид

троилитом (FeS). По составу когенит метеоритов не отличается от земного, но он более широко распространен в земных условиях, где его максимальное содержание может достигнуть 25%. Часто единичные обособления когенита встречаются на границе самородного железа с силикатами, или с расплавленными включениями. В когените из метеоритов и из земного металлического железа обычно присутствует невысокая, но стабильная примесь Ni и Co.

Троилит (FeS) в парагенезисе с ферритом в земных условиях встречается в разных морфологических разновидностях. Он образует обособленные каплевидные выделения или располагается на границе железа с силикатной породой, часто с прерывистой каймой когенита. Иногда сульфид встречается в виде ксеноморфных зерен среди породообразующих минералов, находящихся внутри желвака. Хотя в железных метеоритах троилит является наиболее распространенным сульфидом, содержание его здесь невелико (1,4 %). Троилит редко содержит примеси других элементов.

Самородная медь (Cu) является одним из самых распространенных самородных металлов на земле, а в метеоритах она встречается редко, чаще всего в хондритах и представлена мелкими зернами, включенными в железо-никелевую фазу. В теллурическом железе никелистая медь в объеме 0,1-0,3% формирует сферулы мельчайших эмульсионных выделений как самостоятельных, так и в ассоциации с троилитом или когенитом.

Таблица – Средний состав металлического железа в метеоритах и земных породах, мас.%, г/т

| Объект | Fe | Ni | Co | Cu | P | Ga | Ge | Ir | Au | Ag | Pt | Pd |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|-----|--------|------|------|------|------|
| Железные метеориты | 91,4 | 7,60 | 0,52 | 0,02 | 0,17 | 28,0 | 110 | 3,0 | 1,20 | 0,52 | 11,2 | 4,77 |
| Fe ^o в земных породах | 98,0 | 1,27 | 0,58 | 0,54 | 0,02 | 26,3 | 232 | 0,0015 | 2,24 | 0,35 | 2,91 | 8,39 |

Геохимическое исследование самородных фаз метеоритов и земных пород показало, что диапазон содержаний и средние значения у них близки. Особенно это относится к значениям Au Ag и PGE. Земное железо содержит на несколько порядков меньше высокотемпературного иридия (Ir), а количество серебра в нем выше чем в метеоритах. Кроме благородных металлов в металлической жидкости базитов и в железных метеоритах активно концентрируются элементы, проявляющие четко выраженные сидерофильные свойства. Медь практически не растворима в Fe^o и образует в нем мельчайшие эмульсионные выделения.

3. Заключение

Проведенный сравнительный анализ показал, что парагенезисы, свойственные железным метеоритам, распространены и в земных условиях в уникальных проявлениях металлического железа в горных породах. Диапазон содержаний сидерофильных элементов и их средние значения в земном и космическом металле достаточно близки. Присутствие самородных металлов в ассоциации с когенитом, троилитом, самородной медью, редкими интерметаллидами в геологических образованиях Земли свидетельствует о том, что в результате длительных сложных геологических процессов формирования горных пород в них создаются условия для образования высоковосстановительной среды.

4. Литература

- [1] Yudin I.A., Kolomensky V.D. Mineralogy of meteorites. – Sverdlovsk. UC AN USSR, 1987. – 200 p.
- [2] Мейсон Б. Метеориты. Мир. 1965. – 306 с.
- [3] Oleinikov, B.V., Okrugin, A.V., Tomshin et al. Native Iron Formation in Platform Basic Rocks. – Yakutsk. – 1985. – 188 p.
- [4] Tomshin M.D., Salikov R.F., Matushkin A.I., Makovchuk I.V., Kopylova A.G., Vasileva F.E. Native iron in the dolerites of the Aikhal sill (the first discovery in Yakutia)/ Arctic and Subarctic natural resources. – 2019. – Vol.24. – №.3. – P. 50-63.

КОРРЕЛЯЦИЯ КИМБЕРЛИТОВОГО, БАЗИТОВОГО И КАРБОНАТИТОВОГО ВУЛКАНИЗМА В ПРЕДЕЛАХ СИБИРСКОГО КРАТОНА

Сергей Костровицкий^{1,2}, J. Sun³

1 ФГБУН «Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН»,
664033, Россия, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1а

2 ФГБУН «Институт земной коры СО РАН», 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128

3 College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing, 102249, China

CORRELATION OF KIMBERLITE, BASIC AND CARBONATITE VOLCANISM WITHIN THE SIBERIAN CRATON

Sergey Kostrovitsky^{1,2}, J. Sun³

1 Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, 1a, Favorskogo str., Irkutsk, 664033, Russia

2 Institute of the Earth's Crust SB RAS, 128, Lermontova str., Irkutsk, 664033, Russia

3 College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing, 102249, China

Annotation. Based on the analysis of the spatial and temporal relationship between kimberlites, mafic rocks and carbonatites, the following conclusions were made: 1) there is no such relationship between kimberlites and traps; 2) there is a connection between kimberlites of the 2nd epoch of kimberlite volcanism (369-344 Ma) and alkaline mafic rocks; 3) such a relationship between kimberlites and carbonatites is found only in the north of the Yakutian province near the Anabar shield.

1. Введение

Обобщение представительного числа литературных данных по определению возраста кимберлитов U-Pb методом по цирконам и перовскитам из разных полей Якутской кимберлитовой провинции (ЯКП) подтвердили ранее сделанное заключение о происходившей в пределах Якутского кратона 4-х этапной активности кимберлитового вулканизма - 1) силур-девонский - 429-408 Ma, 2) девон-карбонный - 369-344 Ma, 3) триассовый - 228-217 Ma, 4) юрский - 175-147 Ma [1, 2]. Анализ литературных данных показал, что ни один из 4-х этапов кимберлитового вулканизма в пределах Сибирского кратона не сопровождался трапповым магматизмом. Отсутствие пространственно-временных связей кимберлитового и траппового вулканизма ставит под сомнение роль плюмов в формировании кимберлитов в пределах ЯКР [1, 3, 4]. В то же время, для кимберлитов 2-го этапа (369-344 Ma) существует четкая временная и пространственная связь со щелочными базитовыми породами (Рисунок 1). Более того, разломы, по которым происходило внедрение средне-палеозойских базитовых даек, стали контролирующими пространственное размещение и кимберлитовых тел в Мирнинского и Накынского полей. Корреляция щелочно-базитового и кимберлитового вулканизма является типичной и проявляется в разных кимберлитовых провинциях. Наличие такой корреляции и некоторые общие вещественные особенности пород (одинаковая Sr-Nd систематика, наличие гранат-содержащих ксенолитов и минералов низко-Sr мегакристной ассоциации) предполагают существование определенных генетических взаимосвязей между кимберлитами и щелочными базитами, которые, следует признать, остаются до конца неизученными.

2. Основная часть

Авторы полагают, что вопрос генетической связи между кимберлитами и карбонатитами для ЯКП следует решать отдельно - для классических алмазоносных кимберлитов, получивших развитие в центральной части Сибирского кратона, и для неалмазоносных (или с убогой алмазоносностью) кимберлитов, расположенных в пределах северной окраины Сибирского кратона. Если в южной части ЯКП типичные карбонатитовые тела отсутствуют, то его северная часть изобилует ими. В непосредственной близости кимберлитовых полей, находящихся около

Анабарского щита, расположено пятнадцать массивов ультра-щелочно-карбонатитовых массивов [5]. Более того, в Староречинском и Орто-Ыаргинском кимберлитовых полях наряду с кимберлитовыми трубками находятся и карбонатитовые [6, 7], возраст которых, соответствующий верхнеюрскому, практически совпадает. Таким образом, пространственная и временная связь между кимберлитами и карбонатитами на юге ЯКП отсутствует, а на севере – явно обнаруживается.

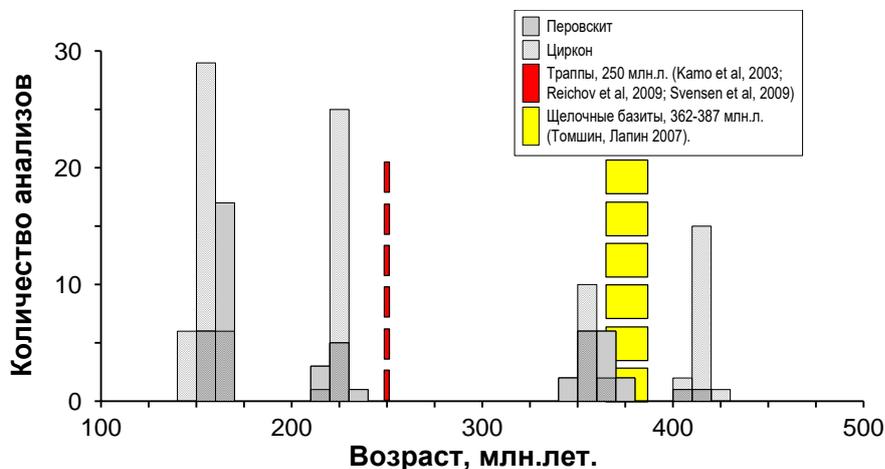
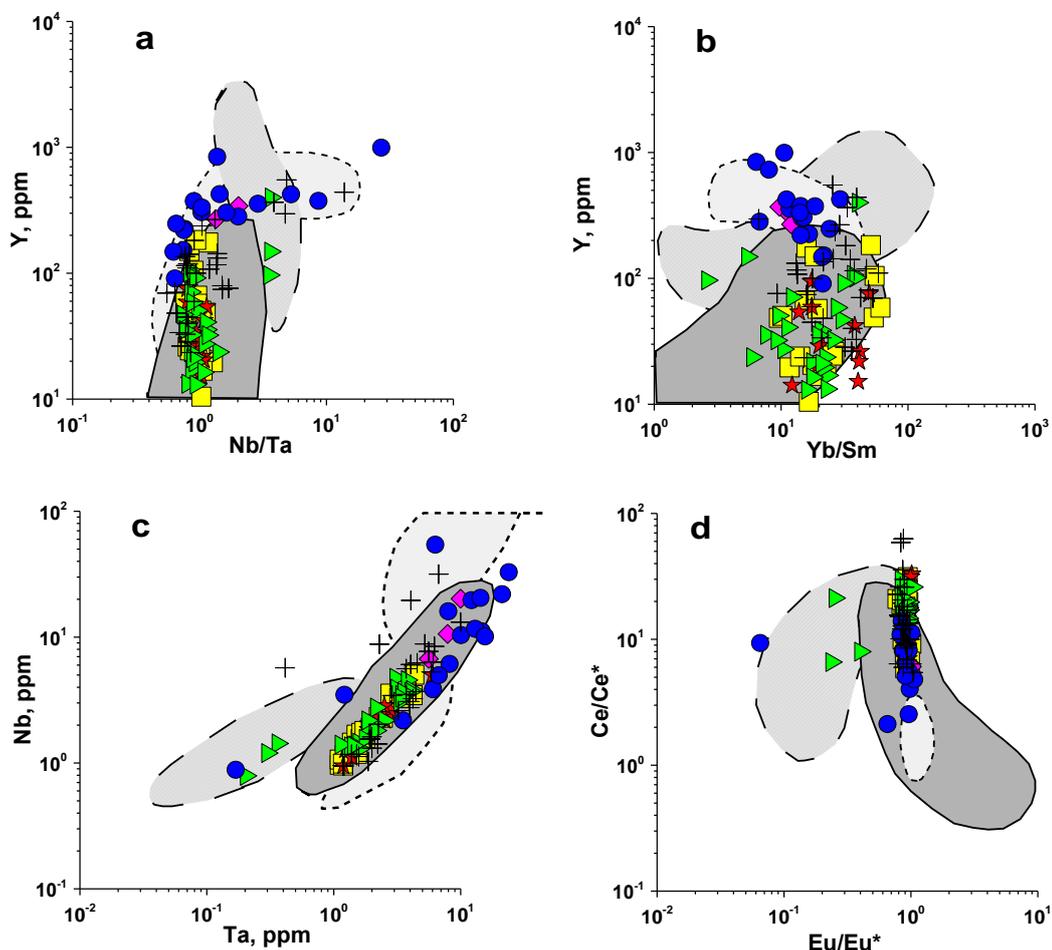


Рисунок 1 – Гистограмма распределения возрастов кимберлитов, траппов и щелочных базальтов.

Сравнение спайдерграмм для некогерентных элементов, построенных для кимберлитов и родственных пород из разных кимберлитовых полей со спайдерграммами для цирконов из этих же пород, подтверждает вывод о возможном существовании генетической связи на севере ЯКП между кимберлитами и карбонатитами. (Рисунок 2).



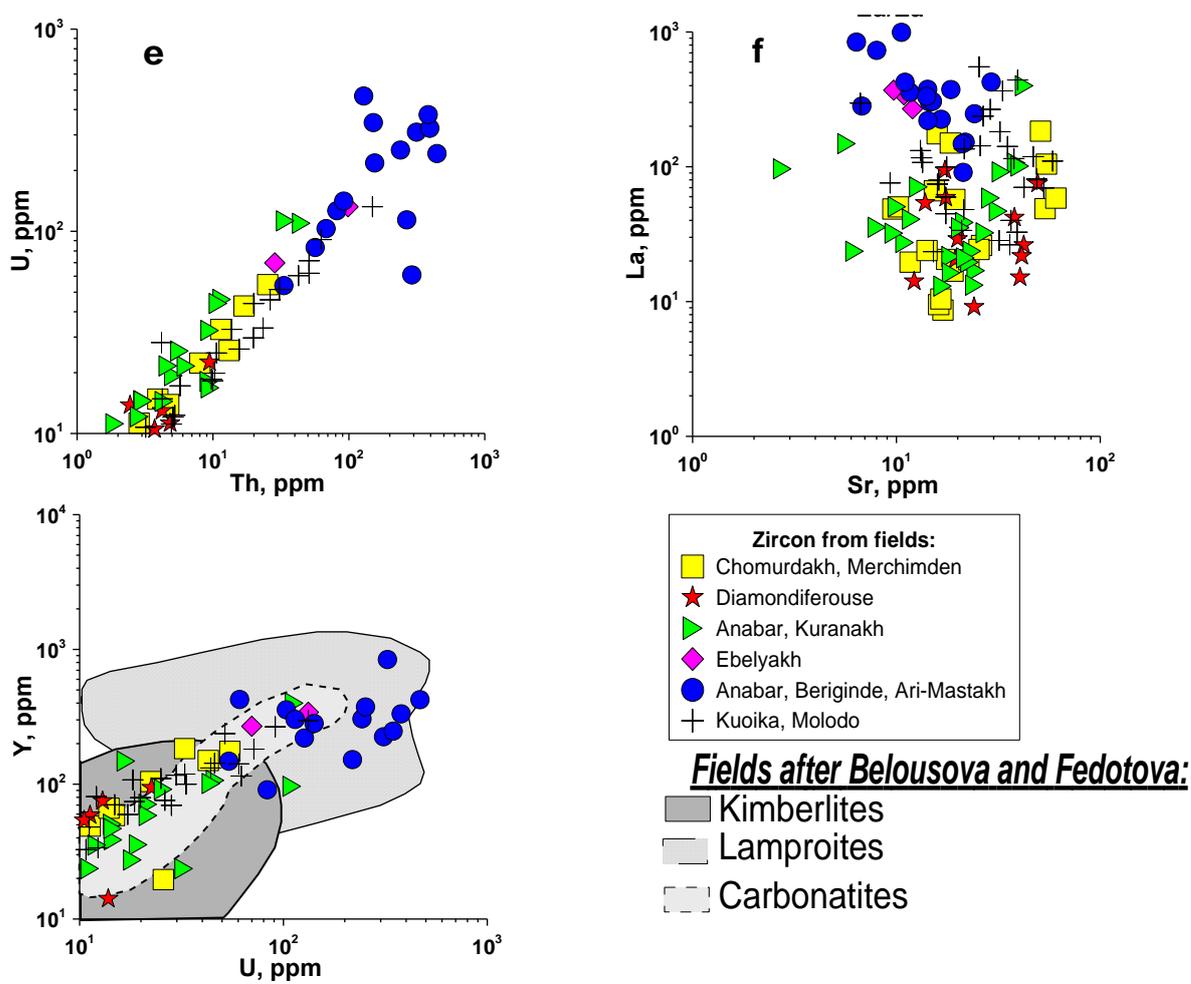


Рисунок 2 – Дискриминантные бинарные графики для цирконов из разных кимберлитовых полей ЯКП. Фигуративные точки состава циркона из анабарских полей (синие кружки), в основном, легли в поля состава циркона, выделенные для карбонатитов и лампроитов [8].

3. Выводы

Приуроченность разновозрастных кимберлитовых полей к одной линейной структуре – коридору, совпадение времени активизации кимберлитового вулканизма в разных провинциях, пространственная и временная связь кимберлитового и щелочно-базитового вулканизма являются ключевыми фактами для выяснения причин возникновения вулканизма. Одновременная активизация кимберлитового вулканизма в разных провинциях указывает на существование общей глобальной причины нарушения равновесных условий в верхней мантии, инициировавшей кимберлитовый вулканизм, как прорыв астеносферного расплава-флюида на земную поверхность. Причинами нарушения равновесных условий в астеносфере могли служить, как внутри земные процессы, перечисленные в предыдущем разделе, так и внешние силы космического, возможно, импактного происхождения.

4. Литература

- [1] Sun J., Liu C.-Z., Tappe S., Kostrovitsky S. I., Wu Fu-Yuan, Yakovlev D., Yang Yue-Heng, Yang Jin-Hui., 2014. Repeated kimberlite magmatism beneath Yakutia and its relationship to Siberian flood volcanism: insights from in situ U-Pb and Sr-Nd perovskite isotope analysis // *Earth and Planetary Science Letters*. – V. 404. – P. 283-295.
- [2] Sun, J., Kostrovitsky, S.I., Tappe, S., Liu, C.-Z., Skuzovatov, S.Yu., Matsyuk, S., Wu, F.-Y., 2018. Mantle sources of kimberlites through time: a U-Pb and Lu-Hf isotope study of zircon megacrysts from the Siberian diamond fields // *Chemical Geology*. – Vol. 479. – P. 228-240.

- [3] Tappe, S., Brand, N.B., Stracke, A., van Acken, D., Liu, C.-Z., Strauss, H., Wu, F.-Y., Luguét, A., Mitchell, R.H., 2017. Plates or plumes in the origin of kimberlites: U/Pb perovskite and Sr–Nd–Hf–Os–C–O isotope constraints from the Superior craton (Canada). *Chem. Geol.* 455. – P. 57–83.
- [4] Tappe, S., Smart K., Torsvik T., Massuyeau M., De Wit M., 2018. Geodynamics of kimberlites on a cooling Earth: Clues to plate tectonic evolution and deep volatile cycles. *Earth and Planetary Science Letters.* – V. 484 –P. 1-14
- [5] Фролов А.А., Толстов А.В., Белов С.В. Карбонатитовые месторождения России. – М.: НИИ. Природа, 2003. – 494 с.
- [6] Ковальский В.В., Никишов К.Н., Егоров О.С. Кимберлитовые и карбонатитовые образования восточного и юго-восточного склонов Анабарской антеклизы. – М.: Наука, 1969. – 288с.
- [7] Маршинцев В.К. Карбонатитовые образования восточного склона Анабарского сводового поднятия. – Якутск: Кн. изд-во, 1974. – 119 с.
- [8] Belousova E.A., Griffin W.L., Pearson N.J. Trace element composition and cathodoluminescence properties of southern African kimberlitic zircons // *Mineral. Mag.* – 1998. – V. 62. – N 3. – P. 355-366.

ГИДРОТЕРМАЛЬНО-ОСАДОЧНЫЕ СУЛЬФИДЫ КАК ВОЗМОЖНЫЙ ИСТОЧНИК ЗОЛОТА В ОРОГЕННЫХ РУДООБРАЗУЮЩИХ СИСТЕМАХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ КОЛЫМЫ

Сергей Кряжев, Светлана Двуреченская

ФГБУ «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов», 117545, Россия, г.Москва, Варшавское шоссе, 129, к. 1

HYDROTHERMAL-SEDIMENTARY SULFIDES AS A POSSIBLE SOURCE OF GOLD IN OROGENIC ORE-FORMING SYSTEMS OF CENTRAL KOLYMA REGION

Sergey Kryazhev, Svetlana Dvurechenskaya

Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals, 1-129, Warshawskoe ch., Moscow, 117545, Russia

Annotation. New data on the composition of sedimentary-diagenetic pyrite from carbonaceous-volcanogenic-terrigenous strata of the Central Kolyma region are presented. Pyrite is enriched with submicroscopic gold (20-90 g/t), as well as As, Sb, Pb and other base metals. The sedimentary-exhalative origin of sulfide mineralization is proved by the homogeneous isotopic composition of sulfur ($\delta^{34}\text{S} = -4 \pm 1\%$). The initial high gold content in sulfides is confirmed by the presence of fragments of gold-sulfide ores in overlapping layers. At the orogenic stage, due to the local redeposition of gold-bearing arsenic pyrite and the concentration of ore matter in the form of arsenopyrite and native gold, rich ore bodies were formed.

1. Введение

Зоны развития гидротермально-осадочных сульфидов, в том числе золотоносных, являются закономерным элементом строения рудоносных углеродисто-терригенных комплексов большинства металлогенических провинций. В последние годы такие зоны были выявлены и в Центрально-Колымском регионе [1]. Они представлены вкрапленностью и конкреционными линзовидными скоплениями осадочно-диагенетического пирита, приуроченными к определенным литолого-стратиграфическим уровням. Целью данной работы служит определение минералого-геохимических особенностей конседиментационных образований и исследование их возможного влияния на состав орогенной жильной минерализации. В процессе исследований авторами были изучены шлифы и аншлифы, выполнены рентгенофазовые анализы рудовмещающих пород. Химический состав пород, руд и минералов определен методом ICP-MS на приборе "Elan 6100" в ЦНИГРИ. Анализ изотопного состава S, C, O и микротермометрические анализы флюидных включений выполнены авторами по стандартным методикам. Состав флюидных включений определен методом водных вытяжек по методике [2].

2. Результаты исследований

Содержания золота в изученных пиритовых конкрециях достигают десятков г/т (Таблица 1). В пирите концентрируются также все цветные металлы (особенно Pb), а также As и Sb. Осадочно-диагенетические сульфиды наиболее распространены в верхнепермских отложениях, выделенных в атканскую свиту. Данный литолого-стратиграфический уровень изучен наиболее детально в пределах Верхне-Хатыннахского рудного поля.

В нижней части разреза золотоносные образования представлены темно-серыми массивными однородными мелко-тонкозернистыми породами без отчетливой слоистости (макроскопически они неотличимы от обычных алевролитов). Исследования показали, что состав данных пород весьма своеобразен. На 75–80 % они сложены альбитом ($\text{An}_{0.5}$), 15–20% приходится на Mg-Fe карбонаты (доломит-анкерит и Mg-сидерит, $d_{1014} = 2,78 \text{ \AA}$, $\delta^{13}\text{C} = -8.5 \text{ ‰}$, $\delta^{18}\text{O} = +13.0 \text{ ‰}$).

Кварц практически отсутствует. Содержание органического углерода ($\delta^{13}\text{C} = -21\dots-23 \text{ ‰}$) составляет 1–2 %.

Карбонат-альбитовые метапороды определены нами как измененные вулканиты (вероятно, туфы) среднего-основного состава. Их золотоносность связана с вкрапленностью и конкрециями пирита (Рисунок 16). Золото в пирите субмикроскопическое ($< 1 \text{ мкм}$).

Мощность пиритизированных золотоносных вулканитов достигает 50–100 м.

Таблица 1 – Результаты минералого-геохимических исследований

| Рудное поле | Верхне-Хатыннахское | | | | Дегдеканское | | Дражное | |
|--|---------------------|---------------|-------------------|------------|--------------|-------|---------|-------|
| | с426/ 178м* | с407/ 197м | с407/ 204-225м | с407/260 м | | у-166 | у-174 | с-126 |
| Материал | AsQ | R | R+AsQ | R | Pу | Pу | Pу | Pу |
| Содержание минералов в пробе, масс. % | | | | | | | | |
| Альбит | - | 76 | 60 | 78 | - | - | - | - |
| Доломит | - | 14 | 6 | 4 | - | - | - | - |
| Mg-сидерит | - | 3 | 9 | 15 | - | - | - | - |
| Пирит | - | <1 | 2,8 | 2 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Арсенопирит | - | - | 0,2 | Следы | - | - | - | - |
| C _{орг} | - | 2 | 1 | 1 | - | - | - | - |
| Кварц | 100 | <1 | 6 | <1 | - | - | - | - |
| Мусковит | - | 5 | 15 | <1 | - | - | - | - |
| Содержание основных элементов, масс. % | | | | | | | | |
| Na | 0,28 | 5,91 | 4,88 | 6,14 | 0,12 | 0,04 | 0,05 | 0,02 |
| K | 0,12 | 1,12 | 1,34 | 0,39 | 0,10 | 0,13 | 0,11 | 0,16 |
| Ca | 0,01 | 2,23 | 1,98 | 1,06 | 0,09 | 0,04 | 0,10 | 0,07 |
| Mg | - | 1,39 | 1,63 | 1,28 | 0,27 | 0,07 | 0,13 | 0,09 |
| Fe | - | 1,81 | 5,50 | 5,83 | 45,71 | 46,52 | 45,83 | 46,16 |
| Mn | - | 0,06 | 0,07 | 0,04 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Ti | - | 0,36 | 0,41 | 0,30 | 0,09 | 0,09 | 0,07 | 0,28 |
| Содержание примесных элементов, г/т | | | | | | | | |
| Au | 0,5 | <0,5 | 3,0 | 0,7 | 89,6 | 19,5 | <0,5 | 41,0 |
| As | 150 | 32 | 2490 | 1208 | 5919 | 525 | 325 | 3142 |
| Sb | 50 | 7 | 12 | 37 | 564 | 112 | 17 | 176 |
| Co | - | 37 | 15 | 75 | 622 | 351 | 166 | 18 |
| Ni | - | 17 | 101 | 83 | 712 | 453 | 290 | 88 |
| Cu | - | 9 | 18 | 56 | 830 | 161 | 18 | 41 |
| Zn | - | 75 | 168 | 230 | 752 | 187 | 53 | 88 |
| Pb | - | 8 | 37 | 63 | 1367 | 3479 | 533 | 214 |
| Bi | - | 0 | 1 | 1 | 14 | 4 | 10 | 4 |
| Mo | - | 1 | 3 | 52 | 214 | 2,6 | 2,5 | 1,0 |
| Ag | - | 0 | 1 | 2 | 22 | 12 | 8 | 2 |
| Rb | 2 | 16 | 41 | 6 | 4 | 5 | 4 | 6 |
| Sr | - | 581 | 764 | 447 | 46 | 9 | 15 | 36 |
| Ba | - | 295 | 309 | 158 | 81 | 21 | 52 | 53 |
| Li | 180 | 3 | 22 | 4 | 4 | 2 | 2 | 5 |
| B | 1600 | 19 | 43 | 11 | 1 | 8 | 20 | 24 |
| Изотопный состав серы сульфидов | | | | | | | | |
| $\delta^{34}\text{S}, \text{ ‰}$ | - | - | -4,4 | -4,9 | -4,9 | -4,7 | -8,5 | -1,5 |

Примечания. Материал проб: AsQ – золото-арсенопирит-кварцевые прожилки, R – карбонат-альбитовые метапороды, Pу – конкреции пирита линзовидной формы. Для пробы с426/178м приведены содержания основных и примесных элементов в водном растворе флюидных включений.

Сера сульфидов во всем разрезе туфогенной толщи изотопно-гомогенна ($\delta^{34}\text{S} = -4 \pm 1\%$, 70 определений), что указывает на ее гидротермально-эксталяционную природу. Увеличение доли легкого изотопа серы в разрезе ($\delta^{34}\text{S} = -14 \dots -19\%$), обусловленное преобладанием биогенного источника сероводорода, сопровождается снижением золотоносности пород до фонового уровня.

В верхней части разреза породы представлены углеродистыми ($C_{\text{орг}} 1-2\%$, $\delta^{13}C_{\text{орг}} = -22,5 \dots -24,6\%$) карбонатсодержащими (анкерит-доломит) алевролитами слюдисто-полевошпат-кварцевого состава с характерными для атканской свиты маломощными горизонтами диамиктитов (т.н. «рябчиков»). В составе обломков наряду с измененными вулканитами обнаружены фрагменты конкреций и карбонат-альбитовых пород с обильной пиритовой минерализацией и самородным золотом (Рисунок 1а).

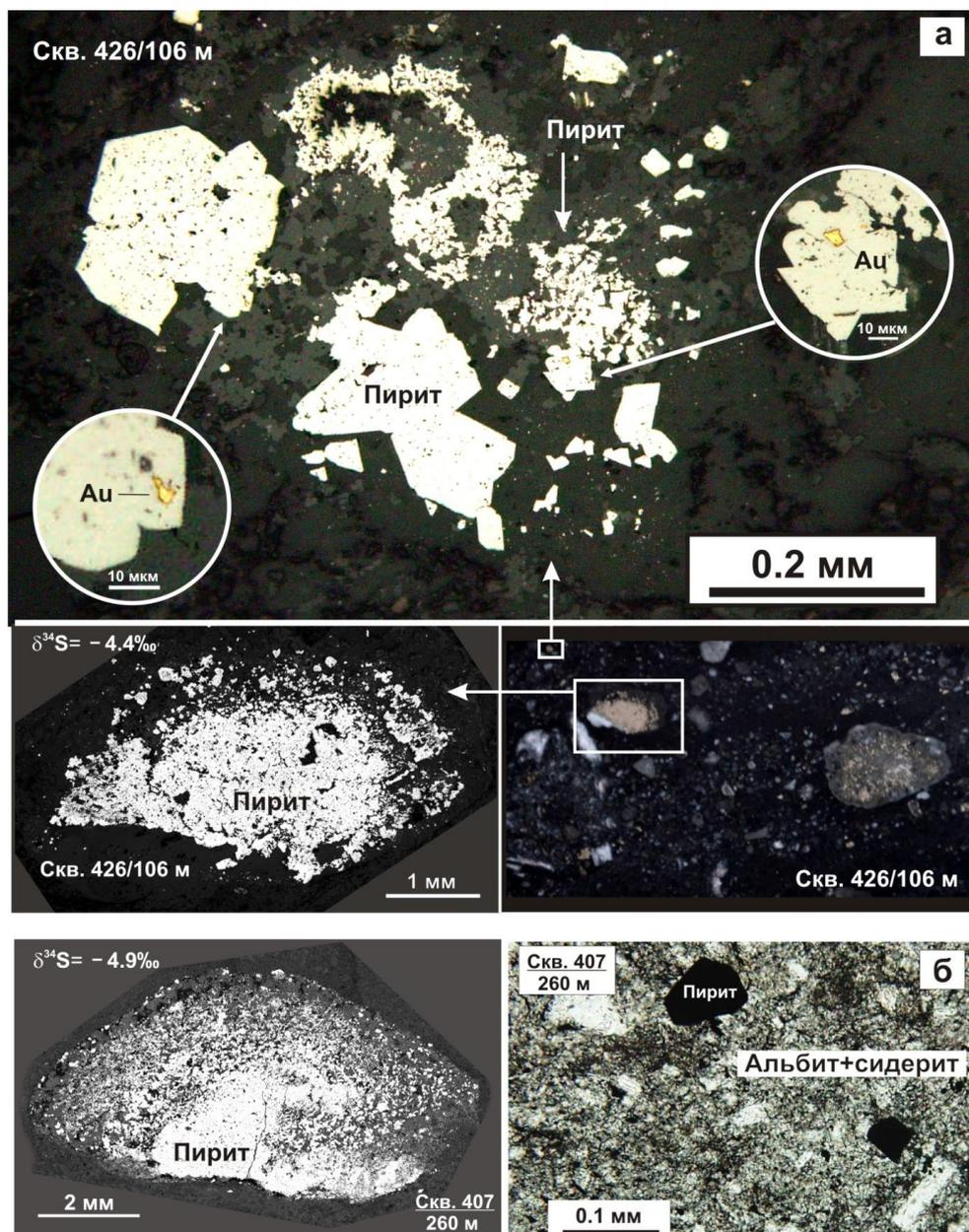


Рисунок 1 – Золотоносные конкреции и вкрапленность пирита в отложениях атканской свиты: а – обломки в диамиктитах верхней части разреза; б – минерализация в измененных туфогенных метапородах нижней части разреза.

По изотопному составу серы конкреции в нижней части разреза и в обломках практически не различаются, что позволяет считать их продуктами одной гидротермально-осадочной системы. Наличие рудокластов является дополнительным доказательством существования конседиментационных золото-пиритовых руд.

Пиритизированные туфы и диамиктиты пересечены жилами и прожилками кварца. В толще минерализованных туфогенных метапород (с407/204-225) развиты маломощные кварцевые прожилки, которые слагают около 5 % объема руд и сопровождаются мусковитом. В интервале их развития отчетливо повышаются содержания К, Li, Rb, Sr, В. Практически тот же набор элементов фиксируется в растворах флюидных включений в кварце.

Привнос в руды мышьяка и золота нельзя считать достоверно установленным, поскольку этими элементами обогащены вмещающие породы. Перераспределение рудного вещества с локальным концентрированием золота является не менее вероятным. В пользу этого убедительно свидетельствует изотопный состав серы арсенипирита ($\delta^{34}\text{S} = -4,0 \text{ ‰}$), который указывает на заимствование серы из вмещающих пиритизированных пород без существенного привноса этого элемента флюидами.

Экстремальное концентрирование золота, по Н.В.Петровской, объясняется появлением его самородной формы (Рисунок 2).

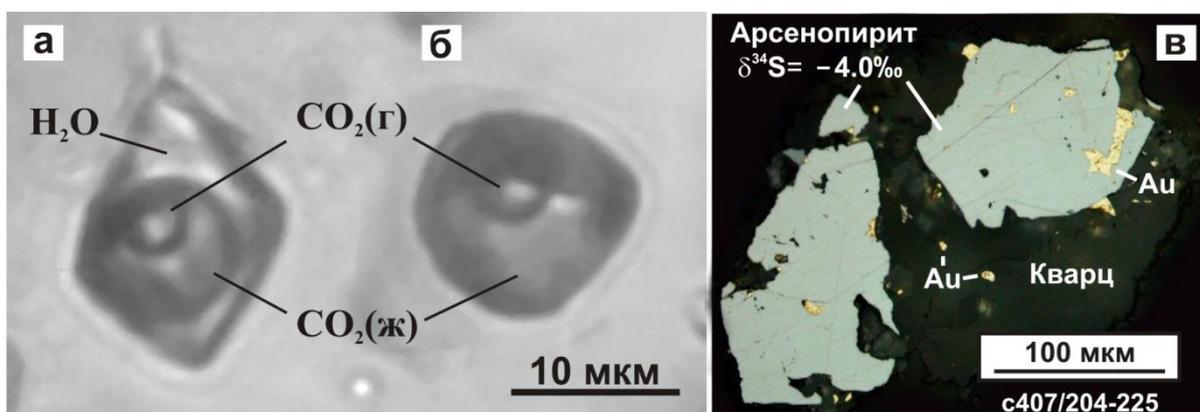


Рисунок 2 – Включения в жильном кварце: а – углекислотно-водные, б – жидкой углекислоты, в – арсенипирита и самородного золота.

Термобарогеохимические исследования показали, что жильный кварц был сформирован при участии углекислотно-водных флюидов при температуре 300–260 °С и давлении 1450 ± 50 бар, т.е. в весьма типичной для «орогенных» систем обстановке. Следует отметить, что в Верхне-Хатыннахском рудном поле локализовано большое число кварцевых жил. Но золотоносны лишь те, которые пространственно сопряжены со скоплениями гидротермально-осадочного пирита. Также примечательно, что кварц золотоносных жил отличается аномально высокой интенсивностью термолюминесценции, что вероятнее всего связано с заимствованием кварцем примеси натрия из золотоносных карбонат-альбитовых пород.

3. Выводы

В углеродисто-вулканогенно-терригенных комплексах Центрально-Колымского региона присутствует осадочно-диагенетический пирит, который обогащен субмикроскопическим золотом (20–90 г/т), а также As, Sb, Pb и другими цветными металлами. На гидротермально-эксгальационное происхождение пирита указывает гомогенный изотопный состав серы ($\delta^{34}\text{S} = -4 \pm 1 \text{ ‰}$), его первичная золотоносность подтверждается наличием обломков золото-сульфидных руд в диамиктитах атканской свиты. На орогенном этапе за счет локального переотложения золотоносного мышьяковистого пирита и концентрирования рудного вещества в форме арсенипирита и самородного золота были образованы наиболее богатые рудные тела.

Таким образом, вовлечение золотоносных осадочно-диагенетических сульфидов в рудообразующие гидротермальные системы, сопряженные с коллизионными гранитоидами, могло сопровождаться переотложением и дополнительным концентрированием рудного вещества, что в конечном счете могло приводить к формированию крупнообъемных золоторудных объектов с комбинированным полигенным оруденением.

4. Благодарности

Авторы глубоко признательны Н.В.Цимбалюку, Г.Б.Ганже и В.В.Аристову за любезно предоставленные образцы.

5. Литература

- [1] Arifulov Ch.H., Kryazhev S.G., Imamendinova M.A., Arsentieva I.V., Tsybalyuk N.V. Gold-bearing lithological-stratigraphic levels and localization conditions for veinlet-disseminated ores in Khakchan and Verkhne-Khatynnakh-Olbot ore clusters (Magadan region) // *Otechestvennaya geologiya*. – 2017. – №. 4. – P. 24-43.
- [2] Kryazhev, S.G., Prokof'ev, V.Yu., Vasyuta, Yu.V., 2006. Use of method ICP MS at the analysis of composition of ore-forming fluids // *Vestnik MSU. Geology* 4. – P. 30-36.

**ГЕОЛОГО-ГЕНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ОРОГЕННОГО
ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ХАНГАЛАС
ЯНО-КОЛЫМСКОГО МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКОГО ПОЯСА**

Максим Кудрин¹, Валерий Фридовский¹, Лена Полуфунтикова^{2,1}

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

**GEOLOGICAL AND GENETIC MODEL FOR THE FORMATION
OF THE KHANGALAS OROGENIC GOLD DEPOSIT,
YANA-KOLYMA METALLOGENIC BELT**

Maxim Kudrin¹, Valery Fridovsky¹, Lena Polufuntikova²

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

Annotation. Deformation structures of the Khangalas orogenic gold deposit, which were formed during three stages of deformation, are systematized: progressive reverse fault D1, sinistral D2 and dextral strike-slip fault D3. Gold mineralization is related to reverse fault stage D1. The fields of tectonic stresses of three stages of deformations are reconstructed. The mineral associations and the sequence of mineral formation in connection with the development of the deposit structure are determined. Four generations of pyrite and two generations of arsenopyrite are identified. Hydrothermal-metasomatic sulfides are characterized by nonstoichiometric compositions and the presence of As, Co, Ni, Cu and Sb impurities. The predominant form of stay of "invisible" gold in sulfides from metasomatites is a solid solution of Au⁺ in crystal lattices Py₃ and Apy₁. Deep mantle-crustal sources were involved in the formation of gold mineralization. The deposit was formed at the beginning of the Early Cretaceous (about 137 million years ago, Valanginian) during late orogenic processes in the Kular-Nera terrane. A three-stage geological and genetic model of deposit formation is developed.

1. Введение

Ольчан-Нерская зона Яно-Колымского металлогенического пояса (ЯКМП) является перспективной территорией на обнаружение крупных коренных месторождений золота. Здесь известны богатые россыпи с крупными самородками золота, эксплуатирующиеся с 30-х годов XX века по настоящее время [1] [2], однако сопоставимых по масштабам коренных месторождений золота до сих пор не обнаружено. Источниками россыпей предполагаются орогенные золоторудные месторождения и проявления, такие как, известные в Мугурдах-Селериканской зоне (месторождение Бадран) и Адыча-Тарынской зоне (месторождения Мало-Тарынское, Базовское, Жданное и другие) ЯКМП. Эталонным объектом данного типа месторождений золота в Ольчан-Нерской металлогенической зоне является месторождение Хангалас, где в последние годы проводились разведочные работы и начал действовать горно-обогатительный комбинат. Запасы и ресурсы золота месторождения составляют более 9 т при среднем содержании 3.9 г/т [3].

В работе на основе изучения полидеформированных рудоконтролирующих структур, минералого-геохимических, изотопно-геохимических, изотопно-геохронологических характеристик золотого оруденения разработана трехэтапная геолого-генетическая модель формирования месторождения Хангалас.

2. Геологическое строение и деформационные структуры

Месторождение Хангалас расположено в юго-восточной части Кулар-Нерского террейна центральной части Верхояно-Колымской складчатой области. Структура месторождения определяется продольными разрывными нарушениями в своде Нерского антиклинория, представленного здесь Хангалаской антиклиналью. Оруденение локализуется в пяти протяженных до 1400 м рудных зонах (Северная, Промежуточная, Центральная, Южная, Зимняя) с межпластовыми и секущими кварцевыми жилами мощностью 0.1-1 м, в раздувах до 5 м, реже в линейных штокверках. Мощность зон до 32 м, падение изменяется от юго-западного до южного и юго-восточного под углами от 30-50° до 70-80°. Статистический анализ залегания кварцевых жил и прожилков позволил выделить 4 системы. Жилы системы V11 имеют выдержанные параметры, залегают согласно вмещающим породам и межпластовым зонам дробления. Кварцевые жилы системы V12 согласны простиранию слоистости и рудных зон, но падают в противоположном направлении. Жилы V12 развиты в пластах песчаников, характеризуются невыдержанной мощностью. Широко проявлены пологопадающие жилы системы V13 различного простирания. Система жил V14 ориентируется согласно плоскости σ_3/σ_1 . Установленные взаимоотношения деформационных элементов месторождения Хангалас свидетельствуют об их формировании в ходе трех деформационных событий – ранних прогрессивных складчато-надвиговых D1, поздних лево- D2 и правосдвиговых D3.

3. Типоморфизм и типохимизм минералов

Рудные тела месторождения Хангалас представлены двумя типами: малосульфидным золото-кварцевым жильно-прожилковым с содержанием сульфидов до 1-3 % и впервые выделенным вкрапленным золото-сульфидным с содержанием сульфидов до 3-7 %. Выделено четыре этапа минералообразования: осадочно-диагенетический, метаморфогенный, гидротермальный и гипергенный. В осадочно-диагенетический этап происходило накопление терригенного материала, смена редокс-обстановок, мобилизация рудного вещества и формирование диагенетической пиритовой (Py1) минерализации. В метаморфогенный этап в результате региональных метаморфических и дислокационных процессов происходит преобразование терригенных пород их серицитизация и хлоритизация, формируется вкрапленная пиритовая (Py2) минерализация. Гидротермальный этап характеризуется пятью последовательными парагенетическими ассоциациями: ранняя метасоматическая пирит-арсенопиритовая (Py3-Аpy1) в околорудных серицит-карбонат-кварцевых метасоматитах; жильная Py4-Аpy2-кварцевая; золото-полисульфидная; кварц-карбонат-сульфосольная и поздняя серебро-кварцевая. Первые четыре ассоциации гидротермального минералообразования формировались в раннем мелу при взбросо-надвиговых деформационных событиях D1. Наложенная серебро-кварцевая ассоциация, вероятно, ассоциирует с позднемеловыми правосдвиговыми деформациями D3. Минерализации связанной с левосдвиговыми деформациями D2 на месторождении не выявлено.

Установлена нестехиометричность составов Py3 и Аpy1 из проксимальных метасоматитов, а также наличие в них примесей As, Co, Ni, Cu и Sb. В Py3 выявлен избыток Fe и недостаток S, главной примесью является As (0.38-3.27 мас. %). Установлена тесная корреляция между Au и As в Py3 ($r = 0.9$). В структуре пирита As изоморфно замещает S с образованием мышьяковистого пирита ($As > 1.7\%$), что характерно для восстановительных условий [4]. В координатах Au-As [4] Аpy1 и Py3 месторождения Хангалас расположены в поле структурно-связанной формы Au^+ в кристаллических решетках этих сульфидов. Содержания Au в околорудных метасоматитах, Py3 и Аpy1 месторождения Хангалас составляют в среднем 0.8 г/т, 12.5 г/т и 17.5 г/т соответственно.

4. Условия образования и возраст золотого оруденения

Изучение Re-Os изотопной системы самородного золота из кварца месторождения Хангалас показало изменение концентрации рения от 0.439 до 1.862 мг/т, осмия – от 0.205 до 1.443 мг/т, однородные величины изотопного отношения $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ – от 0.2212 до 0.2338 и $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ – от

2.329 до 24.883. Начальные отношения изотопов осмия $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ изученных образцов и фракций золота месторождения Хангалас указывают на существенную долю нерадиогенной компоненты, которая ассоциирует с глубинными мантийно-коровыми источниками [5]. Re-Os изотопный возраст образования золотого оруденения месторождения Хангалас составил около 137 млн лет назад – валанжинское время раннего мела.

Узкий диапазон значений изотопного состава кислорода $\delta^{18}\text{O}$ кварца от +15.2 до +16.1 ‰ близок к таковому для ряда орогенных месторождений Верхояно-Колымской складчатой области и может указывать на глубинную термальную систему, сформировавшую оруденение [5].

Изотопный состав $\delta^{34}\text{S}$ серы пирита и арсенопирита из метасоматитов и жил месторождения Хангалас характеризуется узким интервалом отрицательных значений от -2.1 до -0.6 ‰. Схожий и близкий нулю изотопный состав серы сульфидов из рудных жил и околорудных метасоматитов может свидетельствовать об их формировании в ходе единого гидротермального события и участия в рудообразовании серы мантийно-магматического происхождения. Изотопный состав рудного свинца из жил месторождения Хангалас подтверждает такую возможность [7].

В формировании месторождения принимали участие низкоконцентрированные (1.8-5.5 мас. % экв. NaCl) флюиды с CO_2 в газовой составляющей в интервале температур от 340 до 148 °C. Рассчитанное давление рудообразующего флюида колеблется 0.18-0.41 кбар, среднее 0.33 кбар. С учетом полученных результатов разработана трехэтапная геолого-генетическая модель формирования орогенного золотого оруденения месторождения Хангалас. Первый этап – дорудный, когда происходили осадочные, тектоно-метаморфические и магматические процессы. Второй этап – рудный – в Кулар-Нерском террейне происходили позднеорогенные процессы, остывание магматических образований комплекса малых интрузий, активизация ранних разломов в осевой части Нерского антиклинория во взбросо-надвиговом поле напряжений и формирование в начале раннего мела (валанжин) около 137 млн лет назад орогенного золотого оруденения месторождения Хангалас с участием глубинных рудообразующих мантийно-коровых систем. Третий этап – пострудный – происходят левосдвиговые и правосдвиговые деформационные события.

5. Выводы

Комплексные структурно-тектонические, минералого-геохимические, изотопно-геохимические и геохронологические исследования орогенного золотого оруденения месторождения Хангалас позволили получить следующие результаты:

1. Формирование структуры месторождения происходило в течение трех этапов деформаций: взбросо-надвиговом прогрессивном D1, левосдвиговом D2 и правосдвиговом D3. Золотое оруденение формировалось во взбросо-надвиговом поле напряжений этапа D1.
2. Выделены минеральные ассоциации и последовательность минералообразования в связи с развитием структуры месторождения. Установлены четыре генерации пирита и две генерации арсенопирита. Для гидротермально-метасоматических сульфидов характерна нестехиометричность составов и наличие примесей As, Co, Ni, Cu и Sb.
3. Впервые установлена золотоносность вкрапленной пирит-арсенопиритовой минерализации околорудных метасоматитов, определена природа «невидимого» золота, преобладающей формой которого является твердый раствор Au^+ в кристаллических решетках Ru_3 и Au_1 .
4. Месторождение Хангалас образовалось из глубинных источников мантийно-корового происхождения в начале раннего мела (около 137 млн лет назад, валанжин) в ходе позднеорогенных процессов в Кулар-Нерском террейне.

6. Благодарности

Исследование выполнено за счёт государственного задания ИГАБМ СО РАН.

7. Литература

- [1] Goryachev, N.A., Pirajno, F. Gold deposit and gold metallogeny of Far East Russia // *Ore Geol. Rev.* – 2014. – V. 59. – P. 123-151.
- [2] Fridovsky, V.Yu. Structural control of orogenic gold deposits of the Verkhoyansk-Kolyma folded region, northeast Russia // *Ore Geology Reviews.* – 2018. – V. 103. – P. 38-55.
- [3] <https://www.vedk.com/assets/resources>.
- [4] Reich, M., Kesler, S.E., Utsunomiya, S., Palenik, C.S., Chryssoulis, S.L., Ewing, R.C. Solubility of gold in arsenian pyrite // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2005. – V. 69. – P. 2781-2796.
- [5] Fridovsky V.Y., Kudrin M.V., Goryachev N.A., Krymsky R.S., Belyatsky B.V., Sergeev S.A. 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. – V. 15. – No. 4. – P. 293-306.
- [6] Goldfarb R.J., Groves D.I. Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time // *Lithos.* – 2015. – V. 233. – P. 2-26.
- [7] Горячев Н.А. Происхождение золото-кварцевых жильных поясов северной Пацифики. – Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2003. – 143 с.

ПЕРСПЕКТИВЫ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ПРЕДПАТОМСКОГО РЕГИОНАЛЬНОГО ПРОГИБА

Виталий Мещеряков¹, Алексей Сивцев²

1 АО «Сахатранснефтегаз», 677000, Россия, г. Якутск, ул. Кирова, 18

2 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 NORTH-EASTERN PART OF THE PREPATOM REGIONAL TROUGH

Vitaly Meshcheryakov¹, Alexey Sivtsev²

1 JSC "Sakhatransneftegaz", 18, Kirova str., Yakutsk, 677000, Russia

2 North-Eastern Federal University, 58, Belinsky str., Yakutsk, 677000, Russia

Annotation. The article considers the geological structure and features of the oil and gas potential of the Pred-Patom regional foredeep. The problem of mismatch of the structural plans of the upper and lower parts of the geological section due to thrust dislocations is indicated. It is concluded that deep drilling within the Ulugur area did not reach the target horizon in the autochthonous part of the section. A potential zone of wedging of terrigenous vendian deposits on the southwestern slope of the Suntar uplift has been proposed as a priority object for geological exploration in search of oil and gas deposits.

1. Введение

В настоящее время на территории Якутской части Предпатомского прогиба открыты Бетинчинское, Быхтахское, Кэдэргинское, им. И.Н. Кульбертинова, И.М. Меньшикова, Отрадинское и Хотого-Мурбайское газовые и газоконденсатные месторождения. Большинство месторождений открыто в последнее время в связи с активизацией геологоразведочных работ в регионе. Большой интерес недропользователей к данной территории обусловлен, прежде всего, из-за близости к магистральным трубопроводам «Восточная Сибирь – Тихий океан» и «Сила Сибири», а также относительно высоким потенциалом суммарных ресурсов углеводородов [1].

2. Основной раздел вашей статьи

Предпатомский региональный прогиб представлен Нюйско-Джербинской и Березовской впадинами, обрамляющими с севера Патомский сектор Байкало-Патомской горно-складчатой области. Осадочный чехол в пределах изучаемой территории имеет толщину 2500-7000 м и представлен четырьмя структурно-литологическими комплексами: рифейский, бетинчино-сералахский (терригенный), бюкско-билирский (карбонатный), юрегинско-метегерский (карбонатно-галогенный) и верхоленско-нерюктейский. При этом отличительной чертой Предпатомского прогиба является широкое развитие надвиговых дислокаций, разделяющих разрез на автохтонную и аллохтонную части. Надвиговые дислокации достоверно установлены в пределах Нюйско-Джербинской впадине [2, 3] и предполагаются в Березовской впадине [4].

Раздел проходит по нижнему срыву (детachment), ступенчато стратиграфически и гипсометрически повышающемуся от внутренних частей нагорья к фронту складчато-надвигового пояса. В Предпатомском прогибе detachment проходит по соленосным отложениям торсальской пачки бюкской свиты венда. По мере выклинивания торсальской пачки он переходит на соленосные отложения нижнего кембрия.

В пределах изучаемой территории АО «Сахатранснефтегаз» в лице дочерних компаний принадлежат два лицензионных участка: Улугурский и Эргеджейский. Практически по границе между Улугурским и Эргеджейским лицензионными участками проходит условная граница между Нюйско-Джербинской и Березовской впадинами (рисунок).

На Улугурском лицензионном участке было пробурено две скважины: одна (№289-0) с забоем в кудулахской свите, другая (№289-1) — в верхнебюкской подсвите. В скважине № 2891 отмечено сдвоение разреза в венд-кембрийских отложениях [1]. Разрез Эргеджейского лицензионного участка можно охарактеризовать скважиной №236-0, оказавшейся в последствии в пределах ООПТ «Эргеджей». Эргеджейская скважина на забое вскрыла 8 м торгинской свиты рифея.

Результаты испытаний скважин, пробуренных на изучаемых участках представлены в таблице 1.

Основной проблемой картирования перспективных структур в регионе является несовпадение структурных планов нижней и верхней частей разреза. В частности, в Березовской впадине большинство площадей готовилось к глубокому бурению на основе данных геологической съемки и неглубокого структурно-картировочного бурения. В последствии, после проведения детальных сейсморазведочных работ выяснилось, что на уровне проектных венд-нижнекембрийских продуктивных горизонтов установленные в верхней части положительные структуры не обнаруживались [4]. Позднее были установлены надвиговые дислокации в пределах Ньюско-Джербинской впадины [2, 3], также обуславливающие сложное сочетание структурных планов в аллохтонной и автохтонной частях разреза.

Таблица 1 – Результаты испытаний скважины пробуренных в пределах Улугурского и Эргеджейского лицензионных участков

| № п/п | Площадь | Глубина, м | Вскрытый горизонт | Результаты испытания |
|-------|--------------------------------------|------------|-------------------|---|
| 1 | Эргеджейская параметрическая (236-0) | 4050 | торгинская свита | Испытано 4 объекта в открытом стволе. Из отложений юряхского горизонта получен приток пластовой воды дебитом 12.9 м ³ /сут при Ндин. 1336 м. Из отложений ичерской, метежерской, билирской и кудулахской свит притоков не получено. |
| 2 | Улугурская параметрическая (289-0) | 2800 | успунская свита | Испытано в открытом стволе 3 объекта. Из отложений билирской и юряхской свит притоков пластовых флюидов не получено. |
| 3 | Улугурская поисковая (289-1) | 3106 | аянская толща | Испытано 3 объекта в открытом стволе. Из отложений юряхской свиты притоков не получено. Из отложений аянской пачки получен приток ФБР с признаками пластовой воды и запахом сероводорода уд. весом 1.18 г/см ³ , общим дебитом 27.1 м ³ /сут. |

Традиционно основные перспективы нефтегазоносности прогиба связываются с незатронутыми надвиговыми дислокациями частью разреза – автохтонными отложениями. Строение автохтона в Ньюско-Джербинской впадине по отражающему горизонту КВ (кровля терригенного венда) характеризуется достаточно спокойным моноклиальным погружением пород в юго-юго-восточном направлении с градиентом наклона 15-20 м/км и лишь на крайнем северо-востоке наклон пород постепенно переходит на юго-запад. Моноклиальный склон осложнен редкими локальными поднятиями, структурными носами и заливами [5].

В автохтонной части перспективы нефтегазоносности связываются с терригенно-карбонатными отложениями венда. Так, притоки нефти (4,65 м³/сут) получены из харыстанского продуктивного горизонта на Бетинчинском нефтяном месторождении. На Хотого-Мурбайском

газовом месторождении промышленные притоки (до 143,2 тыс.м³/сут) получены из терригенного ботубобинского продуктивного горизонта венда.

Небольшие залежи газа в телгеспитском горизонте в изучаемом регионе установлены на месторождениях И.М. Меньшикова, и И.Н. Кульбертинова. Достаточно крупная по запасам залежь Отраднинского ГКМ приурочена к телгеспитской толще венда. Дебиты скважин из телгеспитского горизонта достигают 300-400 тыс. м³/сут.

С позиций перспектив нефтегазоносности весьма интересным остается Улугурская структура (рисунок). С учетом альтитуды в 300-350 м, по всей видимости, пробуренные в его пределах две скважины не достигли автохтонных отложений. Здесь рекомендуется, после проведения небольшого объема уточняющей сейсморазведки модификации МОГТ-3D, заложить поисковую скважину с проектной глубиной 3300 м.

Определенный интерес представляют надвиговые зоны, в пределах которых в аллохтонном блоке могут быть обнаружены различного строения и в разной степени дислоцированные структуры (рисунок). Здесь ожидается развитие трещиновато-кавернозных карбонатных коллекторов в успунском и кудулахском свитах, а также телгеспитском, юряхских и осинских горизонтах. По имеющемуся представлениям формирование значительных по размерам залежей углеводородов в карбонатных породах верхнего докембрия и кембрия возможно только в случае следующей последовательности процессов: формирование зоны разлома с опережающими трещинами → циркуляция по ним агрессивных растворов с формированием вторичных трещинно-кавернозных коллекторов → вертикальная миграция и накопление УВ в образованном вторичном коллекторе [6].

Наибольший интерес представляет северо-восточная часть Улугурского лицензионного участка и прилегающая северная часть Эргеджейского лицензионного участка. Москвитин И.Е. и др. [7] на основании изучения закономерностей осадконакопления терригенных пород нижнего венда, по материалам глубокого бурения на Верхневилучанской, Виллойско-Джербинской, Буягинской и Шеинской площадях установил последовательное увеличение мощности терригенной части вендского разреза, сложенного в основном песчаниками по окраинам Сунтарского поднятия.

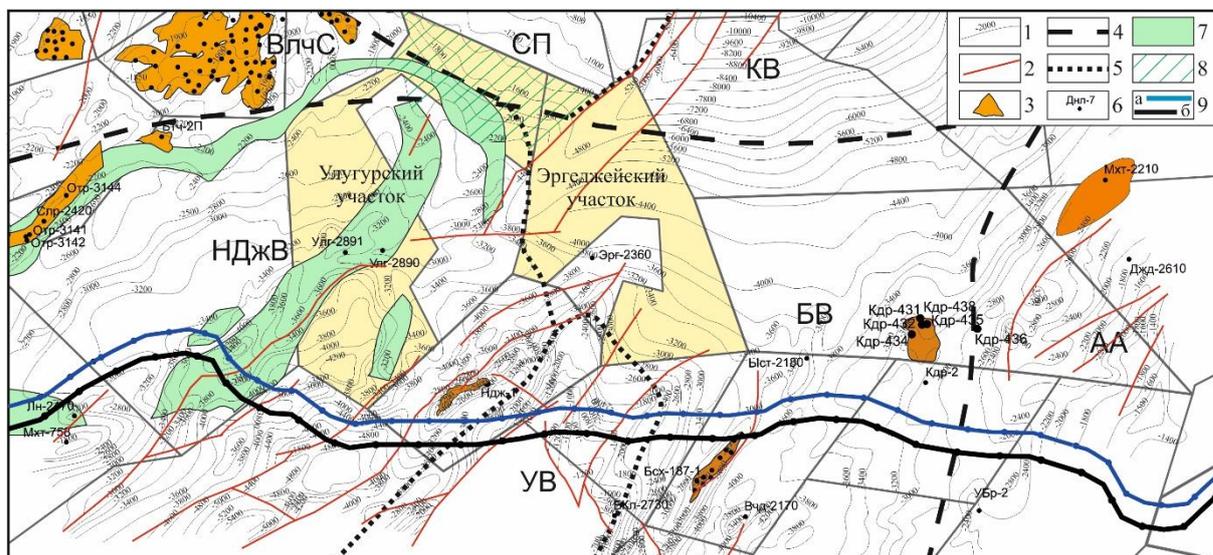


Рисунок 1 – Перспективы нефтегазоносности Улугурского и Эргеджейского лицензионных участков.

Условные обозначения: 1 – изогипсы отражающего горизонта КВ, 2 – разрывные нарушения, 3 – месторождения УВ, 4 – границы надпорядковых тектонических элементов, 5 – границы структур 1-го порядка, 6 – скважины, 7 – зоны развития надвиговых складок, представляющие основной нефтегазопромысловый интерес в подсолевой карбонатной толще (аллохтон), 8 – зоны выклинивания перспективных отложений на юго-западе Сунтарского поднятия.

Обозначения: ВлчС – Вилучанская седловина, ВС – Виллойская синеклиза, АА – Алданская антеклиза, НДЖВ – Нюйско-Джербинская впадина, УВ – Уринский выступ, БВ – Березовская впадина, СП – Сунтарское поднятие, КВ – Кемпендяйская впадина.

Здесь рекомендуется проведение сейсморазведочных работ модификации МОГТ-2D с целью оконтуривания потенциальных структур выклинивания литологических ловушек с элементами тектонического экранирования в терригенных отложениях венда для дальнейшей постановки глубокого бурения (рисунок). Проведение геологоразведочных работ на юго-западном склоне Сунтарского поднятия имеет приоритетное значение для обеих лицензионных участков.

По остальной части Эргеджейского лицензионного участка перспективы нефтегазоносности могут быть связаны с верхней частью разреза. На вновь открытых месторождениях (Кэдэргинское, Мухтинское), расположенных восточнее рассматриваемой территории, промышленные залежи установлены на толбачанской, олекминской, чарской и ичерской свитах. По всей видимости, данные залежи образовались при переформировании крупных залежей из нижних этажей в верхние в ходе продолжающихся тектонических процессов. Данный вид нефтегазоносности требует дополнительных тематических исследований для более точного прогнозирования.

3. Выводы

В последние годы в пределах Предпатомского регионального прогиба разворачиваются масштабные геологоразведочные работы по поиску и разведке месторождений нефти и газа. Открытие новых залежей, в том числе нефтяных, на новых стратиграфических уровнях расширяют круг поисковых задач и перспективы нефтегазоносности региона.

Имеющаяся геолого-геофизическая информация позволяет говорить о наличии перспектив нефтегазоносности северо-восточной части Улугурского лицензионного участка и прилегающей северной части Эргеджейского лицензионного участка, а также в Улугурской структуре, расположенной в центральной части Улугурского участка.

Для успешного решения задач по прогнозированию зон нефтегазового насыщения недр необходима консолидация всей имеющейся обновленной геолого-геофизической информации в рамках тематических исследований.

4. Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 21-510-22001.

5. Литература

- [1] Oil-and-gas prospects of regional reservoirs in Pre-Patom regional trough (Siberian Platform) / G. G. Shemin et al.; editor-in-chief M. I. Eпов; Trofi muk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS. – Novosibirsk: SB RAS Publishing House, 2018. – 315 p.
- [2] Gaiduk V.V. Reconstruction of thrust zones and local estimation of their petroleum potential on the example of Indigir-Zyryansky, PredVerkhoyansky flexures and Nyuisko-Jerbinsky valley. PhD thesis. – Novosibirsk, 1995
- [3] Serezhenkov V.G., Sitnikov V.S., Arzhakov N.A., Mikulenko K.I., Timirshin K.V. Thrust tectonics and oil and gas potential of the Prepatom downwarp // *Geology of oil and gas*, 1996. – No. 9. – P. 2-9.
- [4] Sivtsev A.I., Sitnikov V.S. Some aspects of manifestations of horizontal tectonic movements in the bottoms of the sedimentary cover of Berezovsky depression due to oil and gas occurrence // *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*. – 2014. – No. 3. – P. 24-31.
- [5] Dobrynina N.I., Skorobogataya T.S. Report on the object «Seismic exploration works of the OGT MOV on the North-Patomskaya Square». – Khanty-Mansiysk, 2008. – 207 p.
- [6] Ivanova Z.E., Sivtsev A.I. Features of the distribution of hydrocarbons in carbonate deposits of the Vendian and Cambrian // *Theses XV International scientific and practical conference «New Ideas in Earth science»*. – 2021. – P. 93-95.
- [7] Moskvitin I.E., Sitnikov V.S., Mikhailov V.A., Protopopov Yu.Kh. Structure, development and oil and gas potential of the Suntar uplift// *Tectonics and oil and gas potential of Yakutia: Collection of scientific Tr.* – Yakutsk: YANTS SB of the USSR Academy of Sciences, 1989 – P. 59-67.

**МЕДИСТОЕ ЗОЛОТО ИНТРУЗИЙ УЛЬТРАБАЗИТОВ
СИХОТЭ-АЛИНЯ (ПРИМОРЬЕ)**

Владимир Молчанов¹, Александр Юдаков²

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

**COPPER GOLD INTRUSIONS OF ULTRABASITES
SIKHOTE-ALIN (PRIMORYE)**

Vladimir Molchanov¹, Alexander Yudakov²

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

Annotation. The article is devoted to the study of the Todorov manifestation of gold-copper mineralization localized in carbonaceous terrigenous rocks of the outer contour of the Ariadne intrusion of ultrabasites of the Sikhote-Alin orogenic belt. The issues of mineralogy and geochemistry of ore formations are considered. Special attention is paid to the findings of copper gold occurring at the late stages of ultrabasic magmatism. To assess the source of the ore substance, the isotopic composition of sulfur of sulfide minerals was studied.

1. Введение

К числу крупных достижений последних лет отечественной геологии на территории юга Дальнего Востока следует отнести открытие нового перспективного типа источников критически важных полезных ископаемых – металлоносных интрузий ультрабазитов Сихотэ-Алинского орогенного пояса [1,2]. Одним из наиболее перспективных объектов является Ариадненский массив ультраосновных пород, в центре которого размещено одноименное месторождение золото-титановой минерализации, в экзоконтакте – Тодоховское золото-сурьмяное проявление, а в околоинтрузивной зоне – золото-медные образования Конторского проявления, послужившие объектом наших исследований. При этом особое внимание было уделено находкам купроаурида, необычным для данного типа руд. Вопрос происхождения рудного вещества продолжает оставаться дискуссионным, что и определило направленность проведенных работ.

2. Результаты исследований

В геологическом строении изученной площади, расположенной в центральной части Приморского края, принимают участие верхнеюрские турбидиты и олистостромы аккреционной призмы с включениями позднепалеозойских и нижнемезозойских океанических кремней, сланцев, известняков и базальтов. Вулканогенно-осадочные породы прорваны раннемеловым Ариадненским интрузивом ультрабазитов, имеющим концентрически зональное строение: южная часть сложена перидотитами и пироксенитами, сменяющиеся в северном направлении на габбро, а затем и диориты. Вышеперечисленные стратифицированные и магматические образования, в свою очередь, прорваны поздними интрузивными телами: гранитоидами, дайками основного и кислого состава позднемелового возраста [1].

Конторское проявление золото-медной минерализации локализовано в углеродистых терригенных породах околоинтрузивной зоны ариадненских ультрабазитов, прорванных дайкой диабазовых порфириров. Рудовмещающие черносланцевые породы характеризуются щелочным (натровым) уклоном, высокими концентрациями Al_2O_3 и низкими TiO_2 , а также

повышенными количествами органического углерода (1,0–2,0 мас. % $C_{орг}$) и легких редкоземельных элементов (относительно тяжелых). Им свойственны отрицательная европиевая аномалия (La/Yb достигает 6,2, суммарное содержание редкоземельных элементов составляет 151 г/т), высокие концентрации U, Rb, Sr, Ba, Cu, Zn (до 100–200 г/т).

Благороднометальная минерализация приурочена к зонам сульфидизации, прожилково-вкрапленным медным рудам и метасоматитам. Зоны сульфидизации в углеродистых сланцах, сопровождающие медную минерализацию, представлены гнездово-вкрапленным и вкрапленным типами. Главными минералами являются пирит, халькопирит, сфалерит. В переменных количествах присутствуют монацит, рутил, самородное железо. Основной особенностью сульфидных минералов является присутствие примеси элементов платиновой группы (Pt – до 2,5, Os – 1,2, Ir – 1,2 мас. %). Повышенная платиноносность сульфидов вкрапленных руд в черных сланцах отмечалась ранее и на многих месторождениях Северо-Востока России [3]. Самородное золото чаще всего представлено мелкими частицами (не более 0,1–0,2 мм) округлой формы. Состав металла характеризуется высокими значениями пробы (до 990 ‰), лишь изредка в них отмечается примесь Sr (1,0–2,0 мас. %). В составе этих минералов сфокусировалась основная особенность формирования изученного проявления – дифференциация в процессе рудоотложения золота и платины от меди. Можно полагать, вслед за [4], что зоны сульфидизации являются промежуточным этапом становления золото-медного оруденения.

Зона прожилково-вкрапленной минерализации, вмещающая основную массу медной руды, имеет линзовидную форму длиной до 300 м и шириной до 50 м, по падению прослеженную на 300 м. При этом 95–98% рудной массы приходится, включая обломки пород в брекчиях, на долю жильного выполнения. Количество рудных минералов обычно не превышает 2–5%. Содержание (мас. %) Cu в целом по зоне составляет 0,37 на отдельных участках достигая 1,3–2,2, Zn от 0,1 до 0,3, а Mo до 0,008 лишь в отдельных случаях. Концентрации Au колеблются от 0,1 до 1,5 г/т, Ag – от 0,5 до 1,0 г/т. Жильные минералы представлены в основном кварцем, в подчиненных количествах присутствует кальцит. Главным рудным минералом является халькопирит. В переменных количествах присутствуют пирит, сфалерит, галенит, самородная медь; к редким – тетраэдрит, антимонит. В сростаниях с халькопиритом довольно часто обнаруживаются самородное золото, образующее мелкие выделения (не более 0,1 мм) неправильной формы. Состав золота характеризуется присутствием значительной примеси меди (от 22,2 до 26,4 мас. %). При этом содержание Au варьируется (мас. %) от 65,6 до 70,0, а Ag до 7,1 до 15,1. Пересчет анализов на кристаллохимические формулы показывает, что эти золото-медистые фазы отвечают купроауриду – Cu (AuAg). Медистое золото обычно рассматривается как минерал, возникший на поздних этапах ультраосновного магматизма [5,6], что, по –видимому, наблюдается и в нашем случае.

Особое внимание привлекают метасоматиты кварц-серицитового состава, сопровождающие внутрирудную дайку диабазовых порфиритов и занимающие резко секущее положение к более ранним прожилково-вкрапленным медным рудам. В плане ареал гидротермальных изменений имеет форму линзы длиной до 200 м и максимальной мощностью в 36 м. Текстура пород, слагающих метасоматиты, брекчиевая с интенсивным развитием процессов лимонитизации и выщелачивания. Рудная минерализация локализована в виде вкрапленности и прожилков пирит-кварцевого состава. Рудные минералы представлены пиритом и редкими зернами золота. Распределение металла неравномерное от 0,4 до 1,8 г/т. На участках совмещения метасоматитов и прожилково-вкрапленной минерализации содержания Ag достигаются до 10,7 г/т, в единичных пробах – 124 г/т. Содержание Ag при этом составляют 96 г/т. Минералы благородных металлов представлены группами соединений в системах Au-Cu и Au-Ag. Минералы последней представлены самородным серебром высокой химической чистоты (примесь Au не превышает 2,1 мас. %). В системе Au-Cu необходимо отметить прежде всего фазы медистого золота с высокой концентрацией U (до 2,3 мас. %) и Zn (до 1,3 мас. %), а также самородную медь.

Для оценки источников рудного вещества ультрабазитов был проанализирован изотопный состав серы его сульфидов, а точнее пирротина золото-титановых руд, антимонита золото-сурьмяных образований, пиритов медной минерализации и золотоносных метасоматитов. Было установлено, что изотопные характеристики серы этих сульфидов в целом обладают высокой степенью гомогенности и несколько облегчены относительно ультраосновных пород [7]. При этом, значения $\delta^{34}\text{S}$ пирротина укладываются в узкий интервал значения от $-3,0$ до $-3,1\%$. Для антимонитов величины $\delta^{34}\text{S}$ сдвигаются в более тяжелую сторону от $-1,8$ до $-1,5\%$, тогда как значение $\delta^{34}\text{S}$ для пиритов медных руд 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 (золото-титановые руды) к ее периферии, обусловивших развитие в экзоконтакте и окологинтрузивной зоне 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 дополнительным источником серы были коровые породы, обогащенные органическим веществом, контаминированные в процессе становления интрузии ультрабазитов. Узкий интервал значений изотопного состава серы разнотипных руд указывает на единый источник рудного вещества. Соответственно, минерализацию Ариадненского, Тодоховского и Конторского проявлений можно рассматривать как результат эволюции рудообразующей системы, в формировании которой участвовали производные интрузии ультрабазитов.

В то же время изотопный состав серы пиритов золотоносных метасоматитов заметно отличается от приведенных выше данных, меняясь в интервале от 5 до $5,8\%$. Утяжеленный состав серы этих сульфидов, по свидетельству [8], позволяет предполагать о гранитоидном (магнетитовая серия) источнике рудного вещества. Приведенные выше материалы указывают на то, что формирование медной и золотой минерализации в пределах Конторского рудопроявления было разделено внедрением дайки диабазов и сопряженными с ними процессами экзоконтактового метаморфизма и гидротермальной переработки. Присутствие примеси Zn и U в отдельных золотилах увязывается с их экстракцией из черных сланцев.

3. Выводы

В результате выполненных минералого-геохимических и изотопных исследований выявлено существование элементов зональности в площадном распределении руд, свидетельствующее в пользу единого источника рудного вещества: в центре интрузии ультрабазитов 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 ультрабазитового магматизма. Формирование золото-медного оруденения осложнено внедрением поздней дайки диабазов, сопряженное с поступлением гидротермальную систему флюидов, производных позднего гранитоидного магматизма. Рудообразование сопровождалось переработкой медной минерализации и выносом рудогенных элементов из осадочных пород, отличающихся их повышенной концентрацией, по сравнению с эдуктом, свидетельством чему может послужить присутствие примеси U и Zn в золоте метасоматитов.

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 Androsoy, 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] U.S. Geological Survey. Mineral commodity summaries 2018. 200 p.
<https://doi.org/10.3133/70194932>.
- [3] Sidorov A.A., Goncharov V.I., Pristavko V.A., etc. About platinum group metals at the Natalka gold deposit (North-East of Russia) // Reports of the Academy of Sciences. 1997. vol. 355 (6), pp. 801-804.
- [4] Sidorov A.A., Thomson I.N. Conditions of formation of sulfidized black shale strata and their metallogenic significance // Pacific Geology. 2000. vol. 19 (1), pp. 37-49.
- [5] Murzin, V. V. and Malyugin A. A. Typomorphism of the Gold from Hypergenesis Zone. By the Example of Urals. Southern Scientific Center, Sverdlovsk, 1987, 96 p.
- [6] Ramdor P.O. On the widespread paragenesis of ore minerals that arose during serpentinization // Geology of ore deposits. 1967. vol. 2. pp. 32-43.
- [7] Rollinson H.R. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Longman Group UK Ltd, 1993. 352 p.
- [8] S. Ishihara S, Sasaki A. Sulfur isotopic ratios of the magnetite-series and ilmenite-series granitoids of the Sierra Nevada batholith - a reconnaissance study // Geology. 1989. vol. 17 (9). P. 788-791.
[https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1989\)017](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1989)017).

КОМПЛЕКСНЫЙ СОСТАВ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ СУРЬМЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ – КАК ИНДИКАТОР ГЕНЕЗИСА И КАЧЕСТВА

Сабир Мустафин¹, Галина Анисимова²

1 ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет»,
450076, Россия, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32

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

COMPLEX COMPOSITION OF MINERAL RAW MATERIALS OF ANTIMONY DEPOSITS AS AN INDICATOR OF GENESIS AND QUALITY

Sabir Mustafin¹, Galina Anisimova²

1 Bashkir State University, 32, Zaki Validi str., Ufa, 450076, Russia

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

Annotation. Gold-antimony complex mineralization is manifested in the structures of terranes in a very wide range of geological time. If earlier the main world resources of antimony were objects of the jasperoid type, then recently there has been a tendency to increase the practical significance of vein-type objects in terrigenous, often carbonaceous strata, which generally have a greater contrast of mineralization, especially in terms of gold content. The group of vein deposits is more often characterized by the complexity of mineralization, expressed in the industrial contents of tungsten, mercury and elements of the platinum group. The gold-antimony mineralization of the considered types (jasperoid and vein) most likely has common genetic features, a clear direction of evolution, the sequence of formation of mineral types, the priority of deep sources of ore matter, the formation and confinement to dynamic, evolutionarily complex areas of the lithosphere with clearly manifested elements of stratification. The formation of a bank of mineralogical data for the optimal implementation of the engineering process at all stages of the life cycle of the development of complex gold-antimony deposits of various types is becoming relevant

1. Введение

По состоянию на 2021 г. мировая добыча сурьмы Sb составила 100000 т, при величине общих учтённых запасов этого важного вида минерального сырья более 2000000 т. При этом соотношение объёмов добыча/запасы (тонн) Sb для основных стран-производителей мира составило: для Китая – 60000/480000; Российской Федерации (РФ) - 25000 (рециклинг)/350000; Таджикистана - 13000/100000; Австралии – 3400/100000; Боливии – 2700/310000; Бирмы – 2000/140000; Турции – 13000/100000; Пакистана – 20/26000; Канады – 2/78000; Кыргызстана - 0/260000; Вьетнама – 400/н.д.; США – 0/60000; Ирана – 100/н.д.; Казахстана – 100/н.д.; Гватемалы – 80/н.д. [1].

Сурьма, согласно стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года, сохраняет своё место в перечне основных видов стратегического минерального сырья и относится наряду с нефтью свинцом, золотом, серебром, алмазами, цинком, особо чистым кварцевым сырьём ко второй группе полезных ископаемых недр РФ достигнутый уровень добычи которых возможно удержать в период после 2025 года [2].

По информации Гис-Атласа Недр России 90,39% от всех запасов Sb в недрах РФ или 127699 т. заключено в недрах объектов Дальневосточного федерального округа (ДФО). Добыча Sb на эксплуатирующихся месторождениях Республики Саха (Якутия) (далее РС(Я) и Забайкальского края ДФО в 2021 г. составила 9338 т или 91,11% от общей добычи в РФ. При этом добыча Sb на месторождениях РС(Я) Сарылах и Сентачан составила 7497 т. или 73,1% от РФ в целом [3]. Для ДФО запасы Sb категорий А+В+С₁ составляли 127699 т или 90,39% от запасов РФ.

По двум разрабатываемым месторождениям (Удерейскому и Олимпиадинскому) Сибирского ФО запасы Sb в 2021 г. составили 13575 т или 9,61% от общих запасов металла по РФ, а добыча соответственно - 911 т. (8,89%).

Sb для РФ является дефицитным металлом, что объясняет интерес к вопросам генезиса и прогнозирования объектов на стадии поисков, исследованию вещественного состава комплексного оруденения с целью рационального использования минерального сырья. Очень важен аспект геологической пространственной неоднородности, часто зональных месторождений Sb, нередко являющихся комплексными по составу минерального сырья в составе которого нередко важную роль могут играть Hg, W, Au, элементы платиновой группы, Pt, As и др.

2. Комплексный состав минерального сырья сурьмяных месторождений различных сурьмянорудных провинций Азии.

Состав минерального сырья является базовым индикатором генетических показателей комплексного сурьмяного оруденения, весьма важным как на стадиях прогнозирования, поисков и оценки, так и проблем обеспечения оптимально эффективного недропользования при разработке.

Классическими примерами джаспероидного типа промышленного комплексного разнотипного по составу Sb оруденения служат известные объекты Южно-Ферганского сурьмяно-ртутного пояса (Рисунок 1) [4].

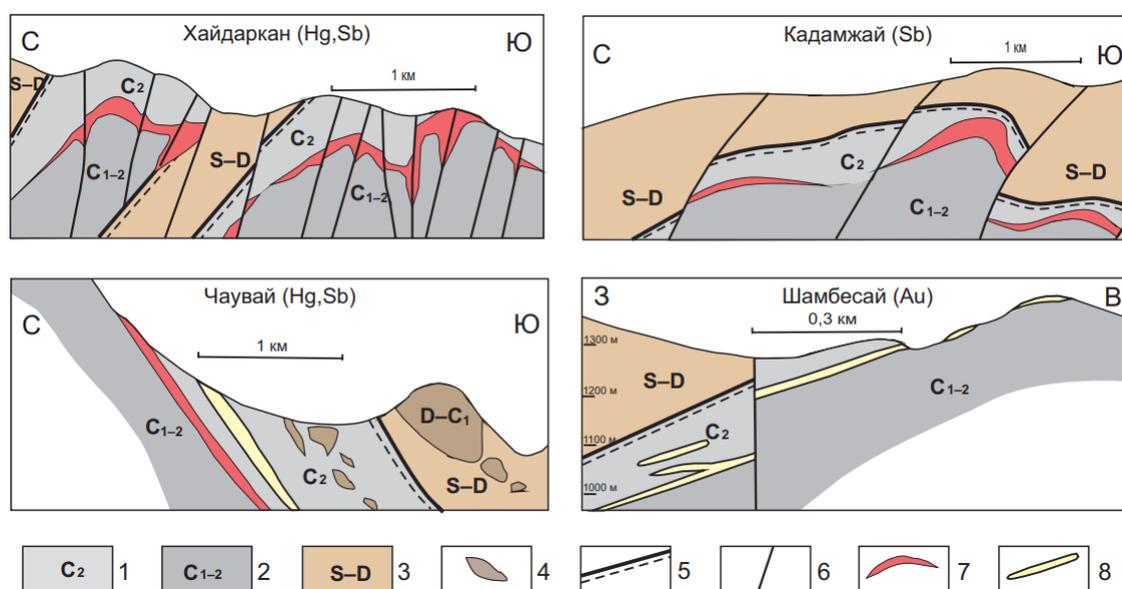


Рисунок 1 – Схематические геологические разрезы месторождений Катранского рудного района [4].

1 – песчаники и сланцы C_2 ; 2 – известняки C_{1-2} ; 3 – углисто-глинистые сланцы S-D; 4 – глыбы известняков D-C₁ в олистостромовых C_2 и меланжевых S-D пакетах; 5 – надвиги; 6 – вбросы и сбросы; 7 – джаспероиды с ртутно-сурьмяной минерализацией; 8 – зоны брекчированных пород с золотой минерализацией.

Месторождение Хайдаркен (Hg-Sb-Au) в структуре Ишметауской рудной кулисы с согласными пластообразными, секущими жильными, сложными гнездовидными рудными телами в брекчиях зоны контакта силицифицированных известняков C_2 с перекрывающими сланцами S-D. Рудные минералы: киноварь, антимонит, гематит, пирит, арсенопирит, халькопирит, реальгар, аурипигмент, метациннабарит, гетчелит, галхаит, ртуть самородная; жильные: кварц, флюорит, кальцит, барит, серицит, диксит, каолин. Запасы (тыс. т) / средние содержания (%): Hg – 10,5/0,15; Sb – 60,3/1,46; CaF₂ – 614/15,2.

Месторождение Кадамджай (Sb – Hg – Au –Tl) в структуре Акташ-Боардинской рудной кулисы с согласными пластообразными, секущими жильными, сложными гнездовидными рудными телами в брекчиях зоны контакта силицифицированных известняков С₂ с перекрывающими сланцами S-D. Рудные минералы: антимонит, пирит, марказит, реальгар, халькопирит, сфалерит, галенит; жильные: кварц, флюорит, кальцит, барит, серицит, диккит). Запасы Sb-77,6 тыс. т; средние содержания – 2,6%.

Месторождение Чаувай (Hg-Sb-Au-As-Tl) в структуре восточной части Акташ-Боардинской рудной кулисы с согласными пластообразными, секущими жильными, сложными гнездовидными рудными телами в брекчиях зоны контакта силицифицированных известняков С₂ с перекрывающими сланцами S-D. Рудные минералы: киноварь, антимонит, пирит, арсенопирит, халькопирит, реальгар, аурипигмент, гетчелит, ливингстонит, фаматинит, тетраэдрит, теннантит, золото самородное, ртуть самородная; жильные: кварц, флюорит, кальцит, барит, серицит, диккит, каолин. Остаток разведанных запасов Hg – 875 т среднее содержание – 0,28%.

Месторождение Шамбесай (Au-As-Tl) в структуре центральной части Акташ-Боардинской рудной кулисы, с согласными пластообразными и жиллообразными залежами на участках перегибов контакта известковистых сланцев С₂ и алевролитов S-D. Рудные минералы: пирит, арсенопирит, халькопирит, реальгар, аурипигмент, марказит; жильные: кварц, кальцит, барит, серицит, биотит, хлорит. Запасы Au - 6,25 т; среднее содержание - 4,78 г/т.

Комплексное оруденение Зеравшано-Гиссарского рудного пояса (Центральный Таджикистан), формировалось с раннего PZ до KZ и представлено: Hg, Sb, Sb-Hg, Sb-Hg-As-Pb-Zn-CaF₂-Au, а также и сурьмусодержащие Sn (с Ag, полиметаллами и PЭ) месторождениями пластообразной, жильной секущей и сложной морфологии. Au-Sb руды нижних горизонтов месторождения Джижикрут могут эффективно перерабатываться по технологии, позволяющей извлекать до 83% Au [5]. В рудах месторождения Кончоч содержатся (т): Au — 50; Ag — 59; Sb — 265000; Hg — 1197; CaF₂ — более 76000 т [6].

Чаткальский террейн Срединного Тянь-Шаня отличает развитие как джаспероидных стратифицированных (подъэкранных) (рисунок 2), так секущих жильных (типа минерализованных зон) (рисунок 3), промышленных Au-Sb месторождений [5].



Рисунок 2 – Массивная «чугунный антимонит» руда. Перевальный. Месторождение Терек-Сай.



Рисунок 3 – Стержневая кварц-антимонитовая жила с губчатым золотом. Иштамберды.

Здесь получили развитие все известные на сегодня минеральные и структурные типы Au-Sb оруденения от жильного самородно-сурьмяного до джаспероидного, включая и, так называемые, объекты тренда Карлин.

Нетрадиционными для Центральной Азии являются месторождения: сурьмяно-антимонитового (Сейняйокского, Финляндия), золото-антимонитового (Верхояно-Колымского), гюбнерит-антимонитового (Боливийского), золото-пиритового (Невадийского) минеральных типов. Для зёрен гюбнерита жильных антимонит-гюбнеритовых руд месторождения Чаарат (запасы Au — 76 т) свойственна зональность — центр — (мас.%): (FeO — 4,07–5,17; MnO — 21,18–17,90; WO₃ — 74,76– 76,93) и периферия — (FeO — 1,54–1,7; MnO — 24,11– 23,20; WO₃ — 74,25– 75,10). В ассоциации с электрумом встречена фаза селенсодержащего сульфида золота состава

(мас. %): Au — 32,47–41,52; Ag — 46,32–58,59; S — 7,24–9,68; Se — 0,55–2,14 [5]. Месторождение Чаарат сложено кремнями, доломитами, известняками С; песчаниками, кремнями, алевролитами O₁; кварцевыми песчаниками O₂₋₃, которые подвержены дроблению, аргиллизации, березитизации. Выделяются три главных и ряд мелких жильных тел. Главные рудные минералы месторождения: золото, антимонит, арсенопирит, пирит; второстепенные: самородная сурьма, самородное золото, блеклые руды, гюбнерит и др.; нерудные минералы: кварц, серицит, полевой шпат, карбонат. Гидрометаллургическая щелочная или сульфидно-щелочная обработка измельченной до — 0.74 мм руды позволяет извлечь в раствор 88.1% сурьмы, 74.8–83.3% Au, до 86.8% Ag. Антимонит - главный минерал руд имеет состав (мас.%): Sb — 74,24; S — 28,93; As-0,7; содержит примеси (г/т): Au (0,28 — 1,0), Ag (15,0 — 127,5), Te (950), Se (4,0), Tl.

Джаспероидный тип с Hg, As, Tl и ртутистым (2,5 мас. % Hg) золотом, представленный внутрiformационными подъэкранными залежами в обогащённой Сорг. (0,2–3 %) терригенно-карбонатно-эвапоритовой газоносной толще девона, отнесён к объектам тренда Карлин. Для генетически связанных типов Au-Sb месторождений Чаткальского террейна установлены эволюционные ряды продуктивных парагенетических минеральных ассоциаций.

Китай с запасами 480 тыс. т, ежегодно добывает 80- 89 тыс. т и импортирует 55–60 тыс. т Sb; многочисленные различные по составу минерального сырья как собственно сурьмяные, так и комплексные сурьмосодержащие месторождения, нередко отличающихся золотоносностью. Так, например, столкновение террейнов кратона Янцзы и блока Катайзия в среднем-позднем протерозое привело к формированию орогенных отложений Цзяннань с месторождениями Au-Sb-W типа (Вокси (Woxi) [8]. В провинции Хунань более 100 месторождений с запасами: Sb - 1,67 млн т; Au - 42 т; WO₃ - 0,25 млн т. В рудах содержатся: Sb (2–6 %); Au (5-10 г/т); WO₃ (0,2-0,8 %). Продуктивны жилы с антимонитом, шеелитом и высокопробным (998,6 - 1000) Au (Рисунок 4). Особо отмечается, что флюидные включения в шеелите характеризуются повышенными концентрациями Au [9].

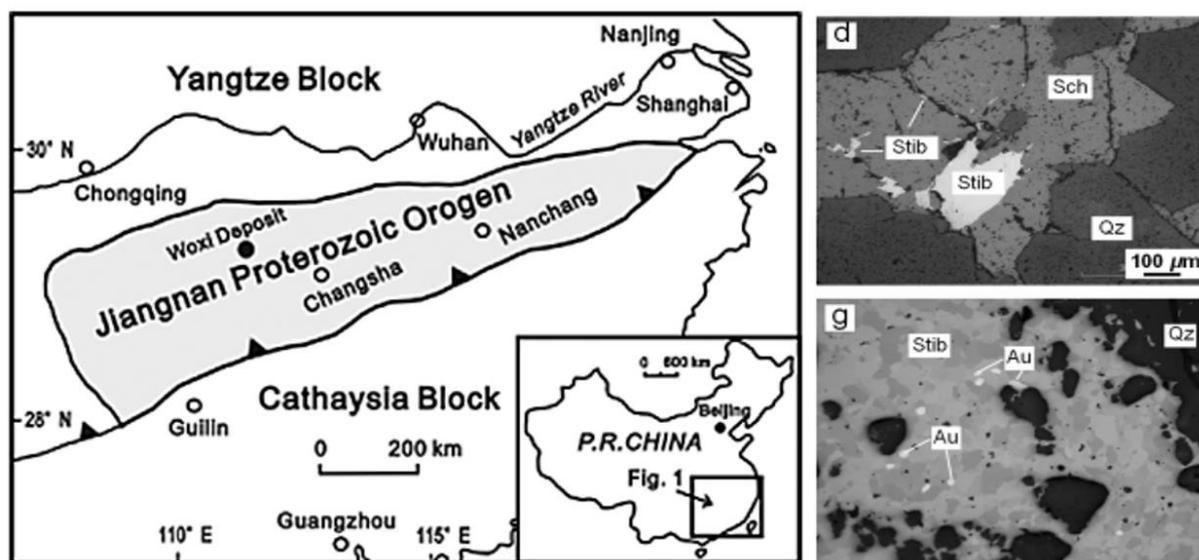


Рисунок 4. а – Позиция месторождений типа Вокси на тектонической карте Южного Китая.

d и g - руды месторождения Вокси (Woxi): Stib - антимонит; Sch - шеелит; Au - самородное золото; Qz - кварц [8,9].

Южный Тибетский Au-Sb металлогенический пояс, южнее шва Инд-Цангпо (ITS), отделяющего террейн Лхасы от Гималаев включает более 50 жильных месторождений, Au-Sb руд и питаемых ими россыпей. Месторождение Мажала с ресурсами Sb — 10000 т; и Au — 5т локализуется в толще J₁₋₂ сланцев, песчаников, известняков. Жилы 10–400 м и мощностью 2,5 м содержат антимонит, пирит, арсенопирит, киноварь и самородное золото пробностью 982 - 990 размерами 0,01–2,0 мм в виде включений в кварце и сульфидах. В 12 жилах месторождение

Шалаганг среди песчаников, известняков, аргиллитов (K_1) ресурсы Sb до 100 тыс. т. при содержаниях 1,98–29,0%. Рудные минералы: антимонит, киноварь, валентинит, пирит, арсенопирит и реальгар [10].

Формирование месторождения Барун-Шивея базового объекта Восточно-Забайкальской сурьмяной провинции предположительно проходило при участии различных источников рудного вещества. Выделяются четыре последовательные продуктивные стадии рудообразования: 1) образование кварца с редкой крупной вкрапленностью киновари, ферберита и антимонита; 2) образование гребенчатого кварца с включениями антимонита, реже ферберита, киновари, пирита (мономинеральные полосы антимонита 3–6 см чередуются с полосами ферберита); 3) формирование основной массы ферберитовых руд в последовательности: антимонит–ферберит–киноварь; 4) образование основной массы киновари с незначительным количеством антимонита. Изотопный состав серы антимонита месторождения ($\delta^{34}\text{S}$, ‰ +1,1 – +3,5) близок к метеоритному стандарту, что указывает на участие мантийного источника в формировании комплексного оруденения, пространственно тяготеющего с зонами глубинных разломов. Источник вольфрамом составляющей оруденения региона определяется как коровый, ртутной – как мантийный. Возраст комплексного сурьмяного оруденения соответствует K_1 ($142,5 \pm 1,5$ млн лет) [11].

Месторождения Восточно-Забайкальской сурьмяной провинции отличает золотоносность Sb руд (1–3 г/т и более). Месторождения джаспероидного типа характеризуются высокой контрастностью оруденения, крупными запасами, большим вертикальным размахом (800–1300 м) [12].

Рудно-Алтайский, Колба-Нарымский и Западно-Колбинский террейны образованы коллизией (C_3 -P) Казахстано-Байкальского и Сибирского континентов [13]. Месторождение Бакырчик (Республика Казахстан) относится к типу Au-As-Sb вкрапленных руд и представлено 30 пластообразными и линзовидными телами мощность 1–40 м. в толще терригенно-углеродистых отложений C_{1-2} . В рудах содержится 3,0 – 49,0 г/т; «упорного» золота концентрирующегося преимущественно в пирите и арсенопирите. Оруденение прослежено на 5,5 км по простиранию и до 1200 м на глубину. Предполагается наличие золотосодержащих металлоорганических образований. Рудные минералы: пирит, арсенопирит, антимонит, самородное золото (Рисунок 6), аурустибит и др. Типоморфным признаком оруденения региона является платиноносность руд (Рисунок 5). Микронные зерна платины часто состоят из тончайшего наноагрегата. Платина нередко имеет примеси Fe, Ti, Sn, Си. В агрегате микрослоя встречаются галоиды: Cl, Br, I, а также Hg и Sb. Широко развиты наноминералы благородных металлов в сульфидной, арсенидной формах и в связи с сурьмой: Pd_4S , Pd_{10}S_7 , Pd_2Sb , $\text{Pd}_4(\text{Sb}, \text{As})_4$, Pd_8As_3 , Ag_3Sb , AgSbF_6 , AgHgAsS_3 , PtAs_2 , PtSb_2 . Золото встречается и в оксидной форме [14].

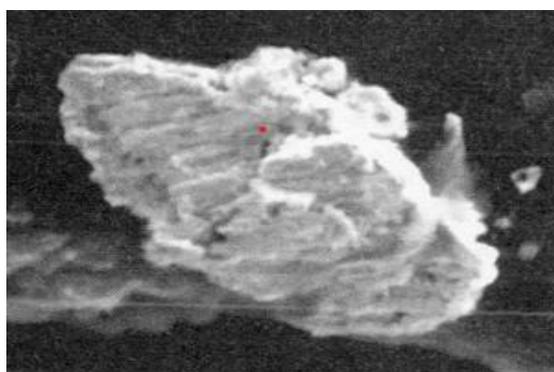


Рисунок 5 – Выделение самородной платины из рудной зоны месторождения Большевик. Изображение в отражённых электронах [14].

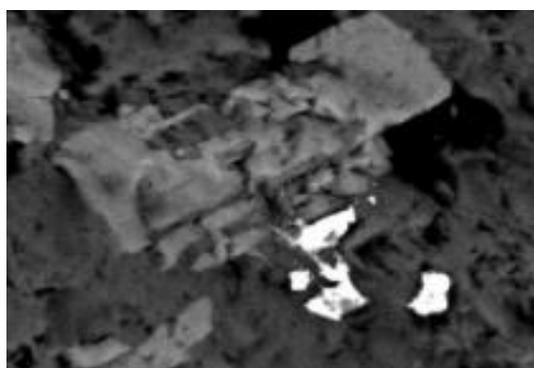


Рисунок 6 – Ультрадисперсное золото (белое) в мышьяковистом пирите (серое). Растровый электронный микроскоп. Бакырчик. [15].

Индикатором реювениции для комплексного ЗСО ССП служат примеси PGE в главных рудных минералах. В антимоните концентрация Pt и Pd установлены на месторождении Кокпатас –

(Узбекистан), Pd и Rh (Кончоч, Таджикистан), Os и Ru (Иштамберды, Кыргызстан). Для киновари в качестве типоморфных примесей из PGE отмечаются: Pd (Джалгыз, Узбекистан), Pt, Pd, Rh (Кончоч). В пирите установлены: Pt и Pd (Кокпатас), Os и Ru (Чаарат); для арсенопирита месторождения (Терек-Перевальное) установлены контрастные концентрации Os (1,5 г/т), Ru (2,3 г/т). Арсенопирит отличают: дефицит As и избыток S; зональность кристаллов как результат пульсационного характера рудоотложения, аномально высокая золотонность (752 г/т в среднем), примеси Se – 0,18–0,32 мас. %, Os (1,6 г/т) и Ru (2,3 г/т). Прямым цианированием арсенопиритового концентрата извлекалось не более 14% «упорного» золота, бактериальное выщелачивание обеспечило высокое (94%) извлечение Au; PGE при этом не учитывались [16].

На золоторудных сурьмосодержащих месторождениях Олимпиадинское, Удерейское, Ведугинское террейнов Енисейского кряжа локализующихся в углеродисто-терригенных и карбонатно-терригенных отложениях сухопитской серии рифея промышленная Au-Sb минерализация образована после продуктивной золото-сульфидной; установлена тесная связь Au с As. На Восточной Олимпиаде в сульфидных рудах содержания Au варьируют от 0,2 до 165,4 г/т [17]. Вертикальный размах оруденения превышает 1400 м; запасы золота составляют при содержании 5,55 г/т составляют 441,6 т. В рудах преобладают, арсенопирит, стибнит, пирит; отмечаются аурустибит и Sb самородная.

Основу сырьевой базы Sb РФ составляют 6 месторождений Республики Саха (Якутии) (РС(Я) с запасами Sb 146 354 т (44,1% запасов РФ). Оруденение контролирует региональный Адыча-Тарынский разлом, разделяющий Кулар-Нерский террейн и Верхоянский пояс [18]. Балансовые запасы месторождений составляют: Сарылах — 48700 т Sb, Сентачан — 84 000 т Sb и 14488 кг Au, Тан — 14800 т Sb. Руды Сарылаха отличает массивная, губчатая и горчичная структуры самородного золота, развитие ульманнита (NiSbS), аурустибита и Sb самородной. Результаты топоминералогических исследований золота оптимизировали прогноз, оценку, выбор технологии освоения комплексного золото-сурьмяного сырья [19].

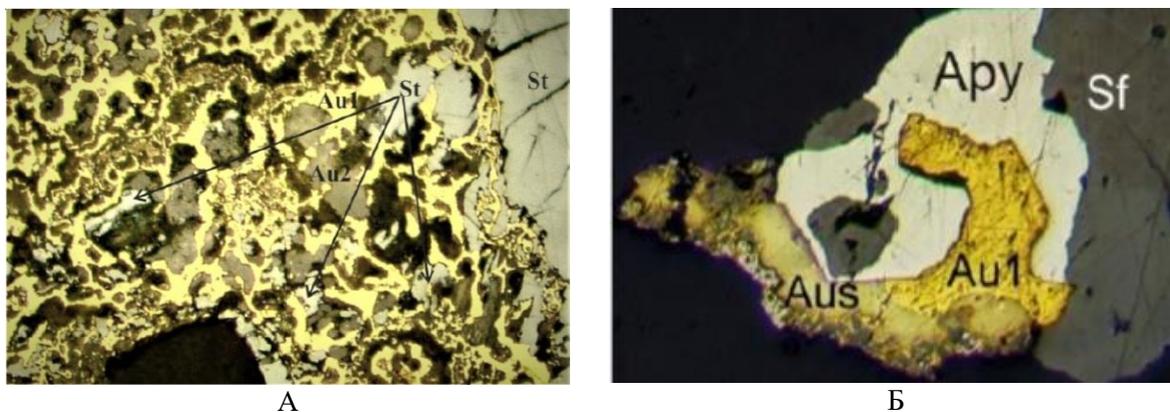


Рисунок 7 – Минеральные срастания разновидностей самородного золота из руд золото-сурьмяного промышленного типа Сарылахского месторождения [19]:

А – губчатое золото (Au2) со стибнитом (St) и оксидами сурьмы (Ox); Б - массивное золото (Au1) с арсенопиритом (Ars), аурустибитом (Aus) и сфалеритом (Sf);

3. Выводы

Золото-сурьмяное комплексное оруденение проявляется в структурах террейнов в весьма широком диапазоне геологического времени. Если ранее основные мировые ресурсы сурьмы заключались в объектах джаспероидного типа, то в последнее время обозначилась тенденция повышения практической значимости объектов жильного типа в терригенных, нередко углеродистых толщах, обладающих в целом большей контрастностью оруденения, особенно в части золотонности.

Для группы жильных месторождений чаще свойственна комплексность оруденения, выражающаяся в промышленных содержаниях вольфрама, ртути и элементов группы платины.

Золото-сурьмяное оруденение рассмотренных типов (джаспероидного и жильного), вероятнее всего имеет общие генетические черты, отчётливую направленность эволюции, последовательность формирования минеральных типов, приоритет глубинных источников рудного вещества, формирование и приуроченность к динамичным, сложным по эволюции участкам литосферы с отчётливыми проявленными элементами расслоенности.

Подтверждением этих положений может служить проблема прогнозирования, поисков и оценки комплексного оруденения тренда Карлин, сочетающего в себе признаки как джаспероидных так и жильных типов месторождений с золотом, сурьмой, ртутью, таллием и другими компонентами (включая и скопления углеводородов).

Учитывая расширение спектра аналитических методов исследования минерального сырья, а также прогресс в разработке новых и совершенствовании традиционных технологий его переработки, актуальность приобретает формирование банка минералогических данных для оптимальной реализации процесса инжиниринга на всех этапах жизненного цикла освоения комплексных золото-сурьмяных месторождений различных типов [16].

4. Благодарности

Исследование выполнено за счет государственного задания ИГАБМ СО РАН.

5. Литература

- [1] Antimony. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2022. – P. 25.
- [2] Strategy for the development of the mineral resource base of the Russian Federation until 2035. – Moscow: Government of the Russian Federation, 2018. – No. 2914-р. – 23 p.
- [3] Updated GIS-packages of operational geological information (GIS-Atlas of the Resources of Russia). St. Petersburg: VSEGEI, 2023.
- [4] Trifonov B.A. Ore deposits of Kyrgyzstan controlled by structures of thrust tectonics // Regional geology and metallogeny – No. 90/2022. – P. 91-106.
- [5] Vazirov K.V., Malakhov F.A. On the role of metasomatites in the formation of antimony-mercury and complex antimony-bearing deposits of the Zeravshan-Gissar ore belt (South Tien Shan). Materials of the XIX All-Russian Scientific Conference "Ural Mineralogical School 2013" .. – Yekaterinburg: Izd. IGG UB RAS, 2013. – P. 28-33.
- [6] Kholov Kh, Samikhov Sh. Acetylthiourea leaching gold from tails of flotation deposit Dzhikikrut // Norwegian Journal of development of the International Science. – 2019. – No. 27. – P. 7-11.
- [7] Mustafin S.K., Anisimova G.S. Complex gold-antimony mineralization in terrane structures of Asia. Proceedings of the XI All-Russian scientific-practical conference Geology and minerals of the North-East of Russia. – Yakutsk: NEFU Publishing House, 2021. – P. 206-209.
- [8] Xuexiang Gu, Oskar Schulz, FranzVavtar, Jianming Liu. Rare earth element geochemistry of the Woxi W–Sb–Au deposit, Hunan Province, South China. Ore Geology Reviews Volume 31, Issues 1–4, April 2007. – P. 319-336
- [9] Yi Liang, Guogang Wang, Shengyou Liu, Yuzhen Sun, Yonggang Huang and Kenichi Hoshino. A Study on the Mineralization of the Woxi Au–Sb–W Deposit, Western Hunan, China. Resource Geology. – Vol. 65. – No. 1. – P. 27-38).
- [10] Wei Zhai, Xiaoming Suna, Jianzhou Yi, Xiangguo Zhang, Ruwei Mo, Feng Zhouc, Huixiao Wei, Qinggao Zeng. Geology, geochemistry, and genesis of orogenic gold–antimony mineralization in the Himalayan Orogen, South Tibet, China // Ore Geology Reviews. – 58 (2014). – P. 68-90.
- [11] Abramov B.N. Features of ore formation of the Barun-Shiveinsky tungsten deposit (Eastern Transbaikalia). Bulletin of the Tomsk Polytechnic University // Engineering of georesources. – 2021. – V. 332. – No. 9. – P. 100-108.
- [12] Sergeenko E.N., Myazin V.P. Analysis of the types of antimony mineralization in Eastern Transbaikalia in order to substantiate the technological scheme for their enrichment // Enrichment of ores: II All-Russian school-seminar for young scientists, with international participation. – Irkutsk: ISTU, 2006. – P.152.

- [13] Kovalev K. R., Kalinin Yu. A., Naumov E. A., Myagkaya M. K. Relationship of antimony with gold mineralization in the ore regions of East Kazakhstan // *Russian Geology and Geophysics* 55 (2014) – P. 1170-1182.
- [14] Marchenko L.G. Genesis and mineral associations of gold and platinoids in the "black shale" type deposits of Kazakhstan. Abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Geological and Mineralogical Sciences. – St. Petersburg: VSEGEI, 2012. – 55p.
- [15] Z. Umarbekova «Gold Ore Processes and Predictive Geological Data for Deposits of Kazakhstan (Bakyrshik, Bestobe, Arkharly)». Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy. Almaty: Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpaeva, 2020. – 149 p.
- [16] Mustafin S.K., Anisimova G.S. Complex gold-antimony mineralization of Asia: regional minerageny, problems of forecasting and development prospects. Proceedings of the scientific and technical conference Actual problems of geology, geophysics, petrology and ore formation, dedicated to the 85th anniversary of the Institute of Geology and Geophysics and the 110th anniversary of Academician Kh.M. Abdullayev. – Tashkent: Publishing house "Lesson Press" LLC, 2022. – T. 1. – P. 229-234.
- [17] Silyanov S. A. Geology and mineral-geochemical indicators of the genesis of the Olimpiada gold deposit (Yenisei Ridge) // Dissertation for the degree of candidate of geological and mineralogical sciences. – Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2020. – 185 p.
- [18] Anisimova G.S., Mustafin S.K. Antimony: raw material base, new promising types and qualities of polymetallic ores // *Geology and minerals of the North-East of Russia*. – T. 2. – Yakutsk: NEFU Publishing House, 2019. – P. 16-18.
- [19] Anisimova G.S. Polymetallic inclusion reflecting the entire mineralogical composition of the Sarylakh ore deposit. *RMO notes*. – 2005. – No. 5. – P. 87-94.

ГЕЛИЕНОСНОСТЬ УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ ПРОВИНЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ: ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ, ПЕРСПЕКТИВЫ ОСВОЕНИЯ

Сабир Мустафин¹, Константин Стручков², Александр Трифонов³

1 ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет»,
450076, Россия, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32

2 ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова»,
677000, Россия, г. Якутск, ул. Белинского, 58

3 ГАОУ ВО ЛО «Ленинградский государственный университет им. А.С. Пушкина»,
196605, Россия, г. Пушкин, Петербургское шоссе, 10

HELIUM POTENTIALITY OF HYDROCARBON RAW MATERIALS OF THE OIL AND GAS PROVINCE OF THE RUSSIAN FEDERATION: RESEARCH OBJECTIVES, DEVELOPMENT PROSPECTS

Sabir Mustafin¹, Konstantin Struchkov², Alexander Trifonov³

1 Bashkir State University, 32, Zaki Validi str., Ufa, 450076, Russia

2 North-Eastern Federal University, 58, Belinsky str., Yakutsk, 677000, Russia

3 Pushkin Leningrad State University, 10, Petersburg sh., Pushkin, 196605, Russia

Annotation. The geological aspects of objects of helium-bearing hydrocarbon raw materials of traditional and promising regions of the Russian Federation are characterized. The helium production strategy is determined by the raw materials from the facilities of the Nepa-Botuobinsk oil and gas region in the Republic of Sakha (Yakutia). The helium content of hydrocarbon raw materials of various contrasts is known at the facilities of a number of oil and gas provinces of the Russian Federation, and today this issue needs an in-depth comprehensive study. Finds of helium-bearing systems of non-hydrocarbon nature in the formations of the basement of ancient platforms are not ruled out.

1. Введение

Гелий сегодня является одним из наиболее востребованных на мировом рынке минерального сырья видом полезных ископаемых, которое используются в криогенной технике, при плавке, резке и сварке металлов, в газовой хроматографии, для охлаждения ядерных реакторов, в научных экспериментах, в космических и военных технологиях, в течеискателях и др. На 2022 г. уровень добычи гелия и состояние его ресурсной базы в группе основных стран-производителей по состоянию характеризуется следующими показателями (ежегодная добыча в млн м³ /общие ресурсы в млн м³): США - 71/8500; Катар – 51/н. д.; Алжир – 14/1800; Российская Федерация (РФ) – 9/1700; Австралия 4/н. д.; Польша – 1/24; Китай – 1/н. д. [1]. Современная добыча гелия осуществляется в основном на нефтегазоконденсатных (НГКМ) и газоконденсатных (ГКМ) месторождениях из природного и попутного углеводородных газов [2]. Сырьё условно делится на бедное (0,02% - 0,05% от общего объема природного газа), богатое (0,05% - 0,3%), весьма богатое (0,3% - 1%), уникально богатое (более 1%) [3]. Минимальные промышленные концентрации гелия в свободном газе и газе газовых шапок не ниже 0,05 об. %, а в растворённом газе – 0,035% [4].

2. Гелий в составе углеводородного сырья газовых месторождений нефтегазоносных провинций РФ.

На территории РФ известны 176 месторождений гелийсодержащего природного газа. Результаты исследований геологии и геохимии гелия отражены на Схеме гелиеносности природных газов нефтегазоносных бассейнов РФ (рисунок 1) [5]. Традиционными регионами

гелийсодержащего углеводородного сырья РФ являлись Оренбургская область с Оренбургским нефтегазоконденсатным месторождением (ОНГКМ) и единственным в РФ гелиевым заводом, а также Астраханская область (Астраханское газоконденсатное месторождение (ГКМ)). Стратегические перспективы гелиевой промышленности РФ связаны с объектами Непско-Ботубинской нефтегазоносной области (НБ НГО) Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции (НГП) - нефтегазоконденсатным Талаканским и газоконденсатными Чаяндинским, Тас-Юряхским, Верхневилучанским и др. месторождениями Республики Саха (Якутия) (далее РС(Я)), Ковыктинским газоконденсатным месторождением (Иркутская область) и строящимся Амурским газоперерабатывающим заводом (АГПЗ).

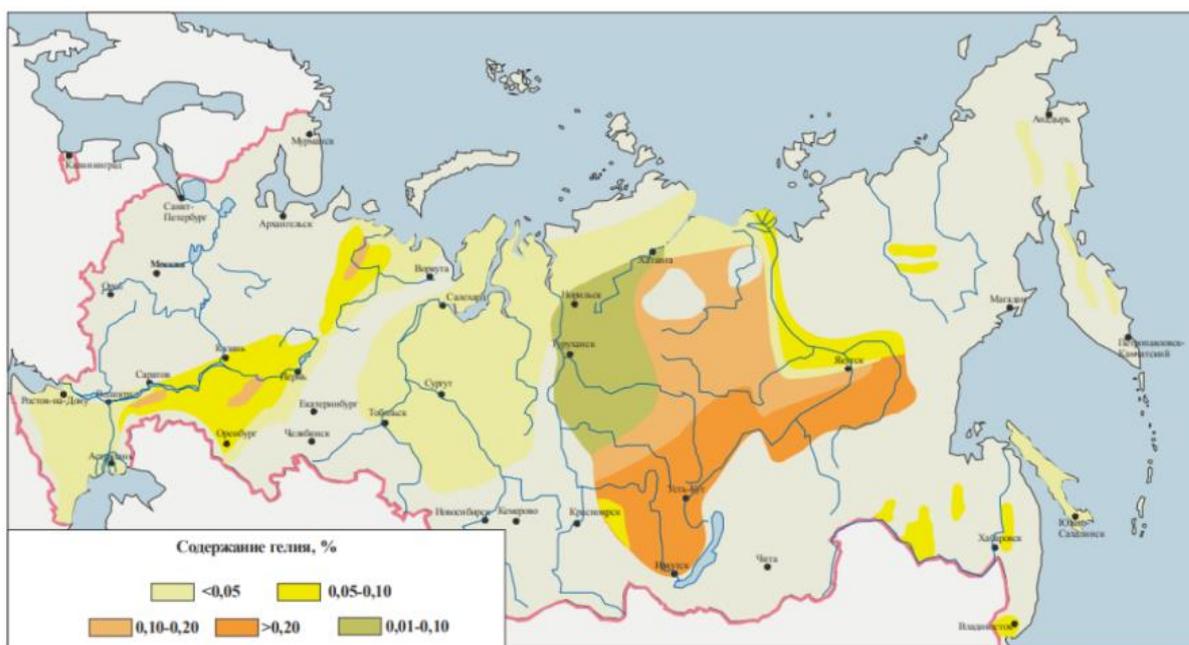


Рисунок 1 – Схема гелиености природных газов нефтегазоносных бассейнов РФ [5].

Все известные месторождения углеводородного сырья (УВ) Оренбургской области, включая уникальное Оренбургское нефтегазоконденсатное месторождение (ОНГКМ) относятся к Волго-Уральской нефтегазоносной провинции (ВУНГП) РФ. Начальные суммарные ресурсы (далее НСР) нефти территории оцениваются в 2,3 млрд т, свободного газа – 3 273 млрд м³. Промышленная нефтегазоносность установлена в отложениях D, C и P1 комплексов (Рисунок 2).

В недрах Оренбургской области учтены 8 газовых, 7 газоконденсатных, 2 нефтегазовых, 21 газонефтяных, 18 нефтегазоконденсатных месторождений с запасами свободного газа по категориям A+B1+C1 – 517,089 млрд м³. Газ различается по составу и содержанию попутных компонентов. Извлекаемые запасы свободного газа ОНГКМ категорий A+B1 составляют 435,587 млрд м³; в 2020 г. добыто 13,438 млрд м³ [6]. На 25 месторождениях учтены запасы конденсата; на 14 запасы этана, пропана и бутанов; на 18 - запасы гелия и на 38 - сероводородсодержащего газа. В 7 газоконденсатных и 18 нефтегазоконденсатных месторождениях общие запасы конденсата категорий A+B1+C1 оценены в 21,714 млн т; а добыча 2020 г составила 0,152 млн т. Текущие извлекаемые запасы гелия категорий A+B1 учтены на ОНГКМ в объёме 337,905 млн м³ (2,57% от РФ) [6]. Кроме Оренбургского гелиевого завода в мире нет примеров промышленного производства гелия со столь малым его содержанием (0,04 об.%) в сырье [6]. В УВ газах объектов ВУНГП Республик Башкортостан и Удмуртия, содержится 0,1–0,2 % гелия [8].

НСР свободного газа в недрах Астраханской области (российский сектор Прикаспийской НГП) составляют 7088,7 млрд м³ (5% разведанных запасов свободного газа и 20% конденсата РФ). Выделяются три литолого-стратиграфических мегакомплекса: подсолевой, надсолевой (MZ-

KZ-и P2) и, разделяющий их, соленосный (P1 кунгурский ярус). Газоносны карбонатные и терригенные толщи С, Т и J отложений на глубинах 1,5 - 4 км и более; нефтеносны – терригенные толщи J2 и K2, на глубинах 850-1650 м [6]. Месторождения характеризуются сложным геологическим строением; перспективы УВ прогнозируются в подсолевых рифогенных структурах отложений D и С. УВ сырьё перерабатывается на Астраханский ГПЗ мощностью 12 млрд м³ /год; гелий не извлекался. Учтены 3 газовых, 3 газоконденсатных и 1 газонефтяное месторождения с запасами свободного газа, включая газ газовых шапок всего по категориям А+В1+С1 - 3097,844 млрд м³ (рисунок 3). В 2020 г. добыто 11,406 млрд м³ газа, потери составили – 0,001 млрд м³. Промышленная газоносность установлена в комплексах отложений D, С, Т, J, К. Запасы растворенного газа по категориям А+В1+С1 учтены в объёме 1,133 млрд м³ и категориям В2+С2 – 98,374 млрд м³. Добыча в 2020 г. составила менее 0,001 млрд м³. Свободный газ месторождений области различен по составу и содержанию попутных компонентов. Запасы конденсата учтены на 3 месторождениях; этана, пропана, бутанов – на 3, гелия – на 1, содержащего сероводород газа – на 4. Извлекаемые запасы гелия категорий А+В1 на Астраханском месторождении составляют 20,851 млн м³; а категории В2 - 31,040 млн м³; добыча гелия не ведётся [6]. Месторождения УВ Республики Саха (Якутия) (далее РС(Я)) в составе Непско-Ботуобинской нефтегазоносной области (далее НБ НГО) входят в состав Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции (ЛТ НГП), - одной из наиболее перспективных в отношении нефтегазоносности континентальных территорий РФ (рисунок 4).

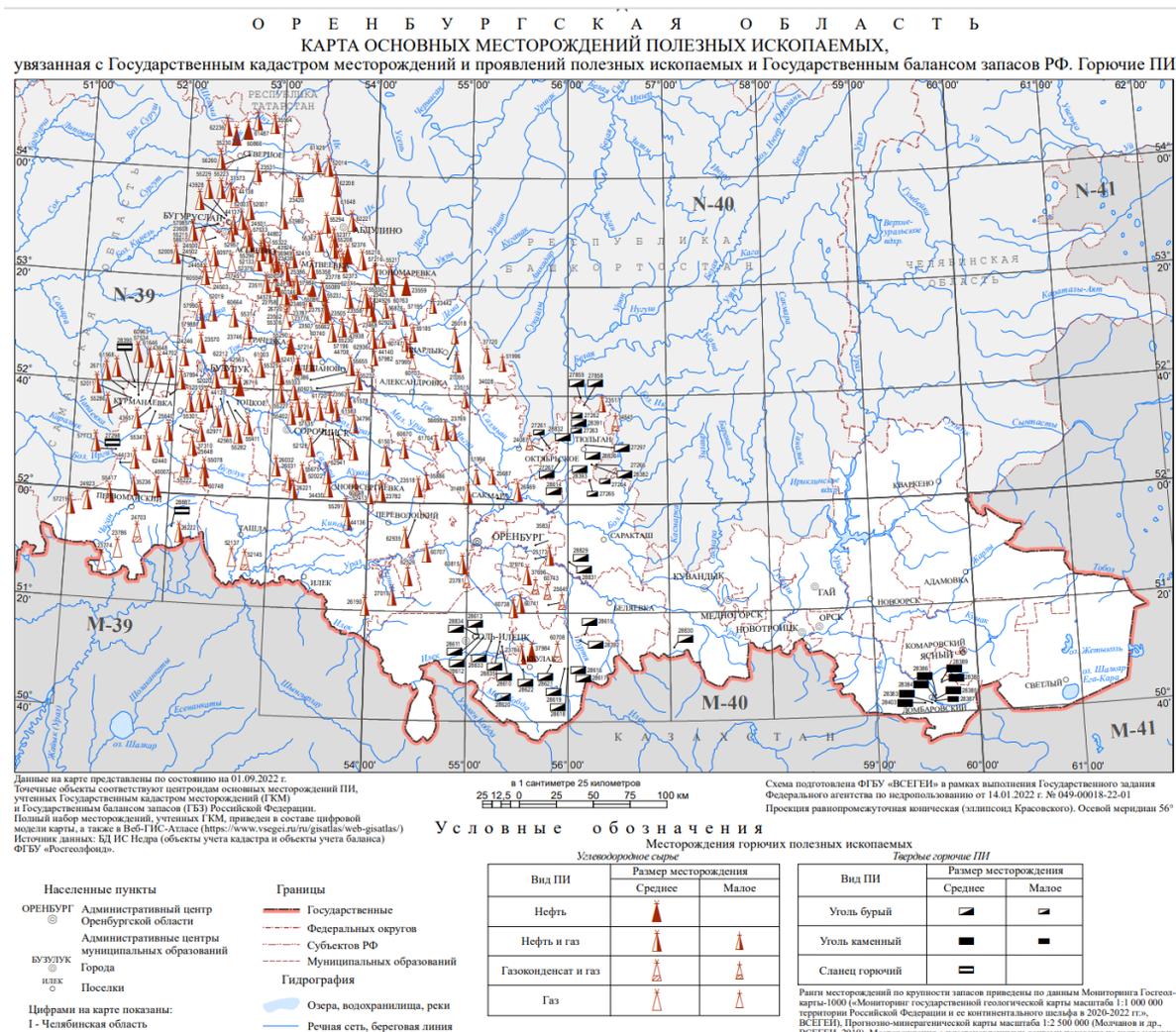
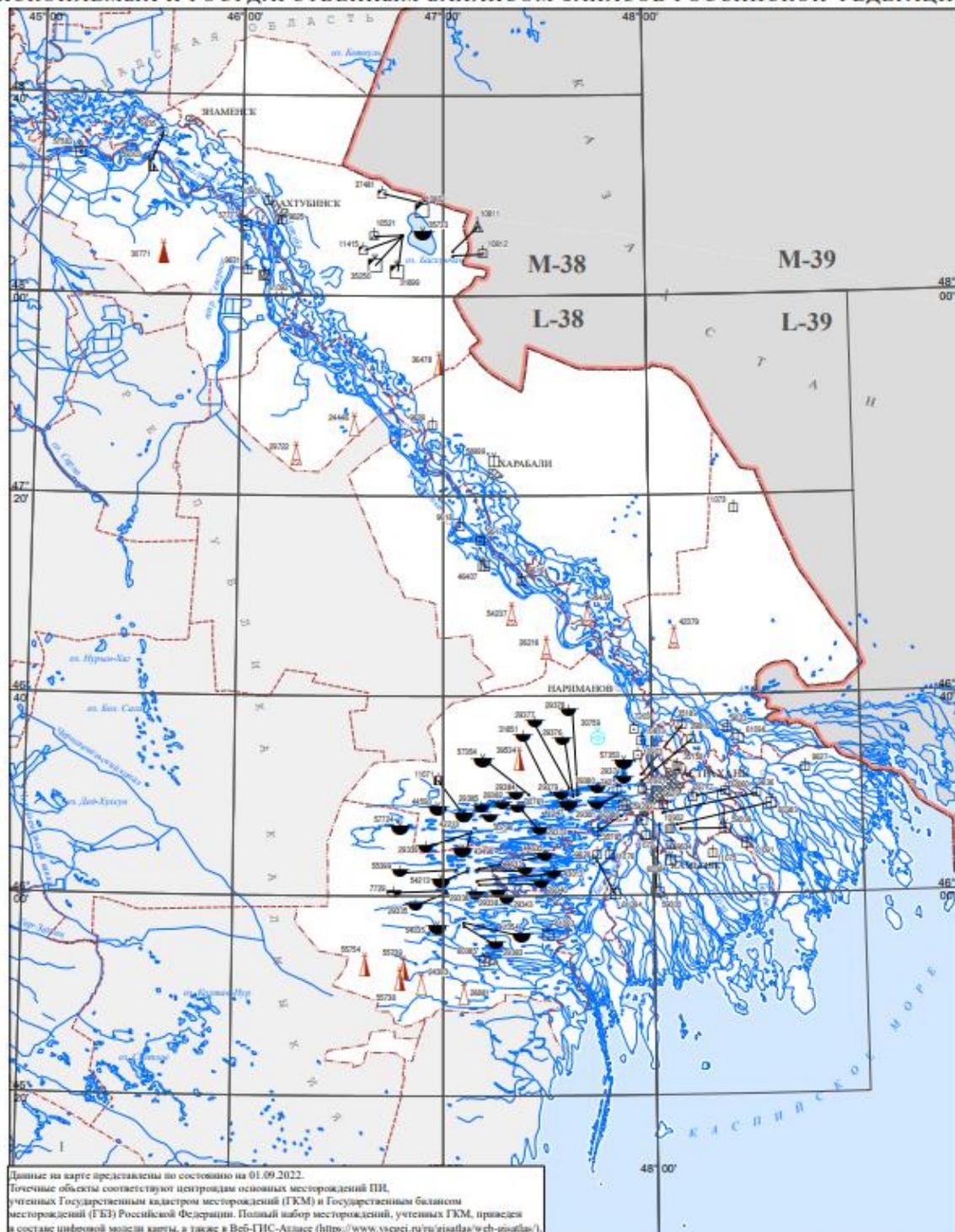


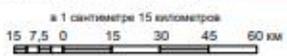
Рисунок 2 – Карта горючих полезных ископаемых Оренбургской области [6].

**ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ОКРУГ И ПРИЛЕГАЮЩИЕ АКВАТОРИИ
АСТРАХАНСКАЯ ОБЛАСТЬ
КАРТА ОСНОВНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, УВЯЗАННАЯ
С ГОСУДАРСТВЕННЫМ КАДАСТРОМ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И ПРОЯВЛЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ
ИСКОПАЕМЫХ И ГОСУДАРСТВЕННЫМ БАЛАНСОМ ЗАПАСОВ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**



Данные на карте представлены по состоянию на 01.09.2022.
Точечные объекты соответствуют центрам основных месторождений ПИ, учетных Государственным кадастром месторождений (ГКМ) и Государственным балансом месторождений (ГБЗ) Российской Федерации. Полный набор месторождений, учетных ГКМ, приведен в составе цифровой модели карты, а также в Web-ГИС-Атласе (<https://www.vsegei.ru/gis/atlas/web-portal/>).

Карта подготовлена ФГБУ "ВСЕГЕИ" в рамках выполнения Государственного задания Федерального агентства по недропользованию от 14.01.2022 г. № 049-00018-22-01
Источники данных: БД ИС Недр (объекты учета кадастра и объекты учета баланса) ФГБУ «Росгеоинформ».



Проекция равнопромежуточная коническая (эллипсоид Красовского). Осевой меридиан 47°

Условные обозначения

| | | | |
|---|--|-------------------------------------|------------------------------------|
| Населенные пункты | Административные центры муниципальных образований | Границы | Гидрография |
| АСТРАХАНЬ Административный центр Астраханской области | АХТУБИНСК Город/поселок (выражающийся в масштабе карты) | — Государственные | — Моря, озера, водохранилища, реки |
| | КАМЫЗЕК Город (не выражающийся в масштабе карты) | - - - - - Федерального округа | — Речная сеть, береговая линия |
| | | - - - - - Субъектов РФ | |
| | | - - - - - Муниципальных образований | |

Рисунок 3 – Карта горячих полезных ископаемых Астраханской области [7].

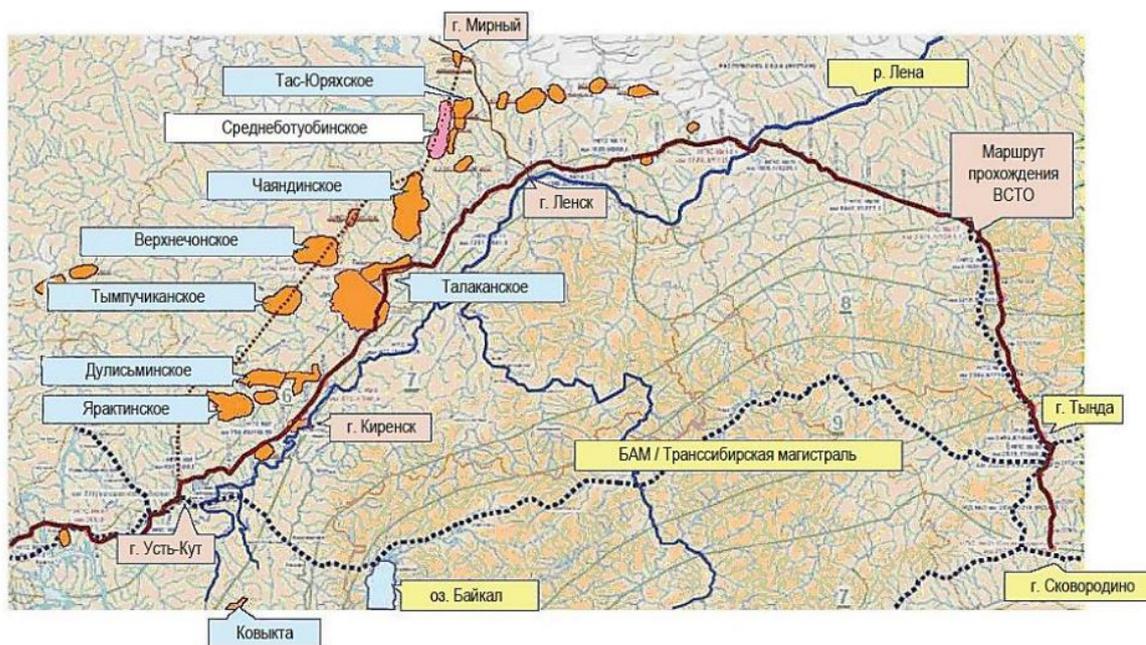


Рисунок 4 – Карта размещения гелийсодержащих газовых и газоконденсатных месторождений Непско-Бутубинской нефтегазоносной области в пределах РС(Я) [9].

По состоянию на 01.01.2021г., здесь учтены 2 нефтяных, 17 нефтегазоконденсатных, 2 газонефтяных, 13 газоконденсатных, 6 газовых месторождения. Общие запасы нефти РС(Я) оцениваются в 647,73 млн т ; в 2020 г. добыча составила 15,957 млн. Кроме того, учтено 42 месторождения горючих газов (в т. ч. 18 нефтегазоконденсатных, 15 газоконденсатных, 6 газовых, 3 газонефтяных) с общими запасами – 3 069,962 млрд м³. Общие извлекаемые запасы конденсата объёмом 68,225 млн т рассредоточены в 13 газоконденсатных и 17 нефтегазоконденсатных месторождениях, добыча конденсата в 2020 г. составила 0,228 млн т [9].

В пределах НБ НГО выявлено порядка 40 месторождений УВ с залежами в продуктивных горизонтах V, V-С и С1; выделяют залежи, приуроченные к породам коры выветривания фундамента. Литологический и стратиграфический контроль размещения установлен для 40 % залежей антиклинального типа. Залежи неантиклинального типа приурочены к моноклинальным склонам южной и центральной частей Непско-Бутубинской антеклизы. В северо-восточных участках НБ НГО развито дизъюнктивное экранирование залежей УВ. На территории РС(Я) учтены 19 месторождений этансодержащего газа; в свободном газе запасы этана составляют 149,216 млн т, пропана – 70,887 млн т, бутана – 35,128 млн т. В 2020 году при добыче газа добыто этана – 0,001 млн т, пропана – 0,014 млн т, бутанов – 0,010 млн т, при этом объёмы потерькратно превышали показатели добычи [9].

3. Выводы

Запасы гелия учтены в 17 месторождениях природного газа РС(Я) и составляют 49,36% от общих запасов гелия РФ (8 715,07 млн м³). В 2020 г. добыча гелия в регионе составила 0,196 млн м³ или 100 % от добычи РФ. В недрах уникального Чаяндинского ГКМ запасы гелия 6 783,424 млн м³ или 37,66% от запасов РФ. Крупномасштабное производство гелия в мире по состоянию на 2007 г. было сосредоточено на 16 заводах: на территории США - 13, в Алжире (Арзев) - 1, в Польше (Одолянов) - 1, в Российской Федерации (Оренбург) - 1 [6] (таблица 1).

Открытие группы крупных гелийсодержащих ГКМ ЛТ НГП, в первую очередь объектов РС(Я) в пределах НБ НГО и начало работы Амурского газоперерабатывающего завода (далее АГПЗ) упрочат позиции РФ как одного из ведущих государств-производителей гелия в мире (таблица 2).

Для целей устойчивого обеспечения гелийсодержащим сырьём АГПЗ, необходимо строительство подземных хранилищ газа (ПХГ); такой опыт в Республике Башкортостан [8] и Оренбургской области [6] имеется. Эксперты в 2022 году оценивали мировой рынок гелия в

2094 млн долларов США, а к 2028 году прогнозируют его скорректированный размер в 2920,2 млн долларов США. Этот динамичный рост рынка может быть обеспечен среднегодовой динамикой на уровне 5,7%, что должно привести к дальнейшему развитию гелиевой промышленности мира (таблица 10). В этих экономических условиях стратегические перспективы развития добычи гелия на месторождениях ЛТ НГП, в первую очередь на объектах РС(Я) НБ НГО и его товарного производства на АГПЗ представляются весьма оптимистичными.

Таблица 1 – Месторождения гелийсодержащего УВ сырья РФ [6, 7, 9]

| Месторождение | Запасы гелия по категориям ABC ₁ +C ₂ , млн м ³ | Состав газа, об% | | | |
|---|--|------------------|------------------|------|-----------|
| | | Метан | C ₂ + | Азот | Гелий |
| Лено-Тунгусская НГП, Иркутская область | | | | | |
| Ковыктинское ГКМ | 5062 | 92,3 | 5,7 | 1,5 | 0,26-0,28 |
| Непско-Ботуобинская НГО, Республика Саха (Якутия) | | | | | |
| Чаяндинское НГКМ | Газовая шапка 1400 | 85,6 | 6,9 | 8,2 | 0,43 |
| | Основная залежь 5790 | н.д. | н.д. | н.д. | 0,65 |
| Тас-Юряхское НГКМ | 459 | 84,4 | 7,0 | 8,1 | 0,38 |
| Среднеботуобинское НГКМ | 664 | 83,8 | 6,9 | 8,0 | 0,2-0,67 |
| Верхневилочанское НГК | 280 | 84,5 | 7,5 | 7,5 | 0,13-0,17 |
| Волго-Уральская НГП | | | | | |
| Оренбургское НГКМ | 337,9 | 86,62 | 6,08 | н.д. | 0,04 |
| Астраханское ГКМ | 20,851 | 51,01 | 7,86 | 0,71 | 0,02 |

Таблица 2 – Производство гелия в мире (млн.м3) из природных газов [10, с дополнением]

| страна | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2005 |
|---|-------|-------|------|-------|--------|--------|---------------|
| США | 116 | 118 | 114 | 117 | 87* | 87* | 87* |
| Алжир | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 17 | 17 |
| Россия | 4,2 | 4,2 | 4 | 5,3 | 5,3 | 6,1 | 3,8 (2006 г.) |
| Польша | 1,4 | 1,4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Катар | - | - | - | 8 | 8 | 8 | 17 |
| Канада, Китай, Нидерланды и др. | н.с. | н.с. | н.с. | н.с. | н.с. | н.с. | н.с. |
| Всего по странам с учтенными в перечне сведениями | 137,6 | 139,6 | 135 | 147,3 | 115,3* | 119,1* | 125,8* |

* без учета реализации резервного запаса гелия из хранилища в Клиффсайде в 2001-2005 гг.
 Источник: US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries

Мощный поток гелия не углеводородного сопровождения совсем недавно обнаружен геохимиками из Великобритании и Норвегии под Восточно-Африканской рифтовой долиной в Танзании. По предварительным оценкам запасы гелия здесь огромны и составляют порядка 1,5 млрд м³. В заключение отметим, что учитывая динамично растущую потребность современных технологий в гелии, проблема геологического исследования его концентрации как в углеводородном сырье, так и в виде других природных состояниях является весьма актуальной. Стратегию добычи гелия в РФ определяет сырьё объектов Непско-Ботуобинской нефтегазоносной области в Республики Саха (Якутия). Однако, гелиеносность углеводородного сырья различной контрастности, преимущественно, к сожалению пока невысокой, известна на объектах ряда нефтегазоносных провинций Российской Федерации и сегодня этот вопрос нуждается в углублённом комплексном исследовании. Не исключены находки систем

промышленной гелиеносности неуглеводородной природы в образованиях фундамента древних платформ [11].

4. Литература

- [1] HELIUM. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2022. – P. 78-79.
- [2] Gorbunov V.V., Perfilov V.A. Membrane extraction of helium from natural gas // Electronic scientific journal "Engineering Bulletin of the Don", 2007-2021. – P. 1-13.
- [3] Kontorovich A.E., Korzhubaev A.G., Eder L.V. Raw material base and prospects for the development of the helium industry in Russia and the world. Serial edition: Mineral resources of Russia // Economics and Management. Issue: 2, Year of publication: 2006. – P. 17-24.
- [4] Guidelines for the application of the classification of reserves and resources of oil and combustible gases. Approved by the order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated February 1, 2016. – No. 3-r. – M.: MPR, 2016. – 33 p.
- [5] Yakutseny V.P. Raw material base of helium in the world and prospects for the development of the helium industry. Oil and gas geology. Theory and practice. – 2009(4). – P. 1-24.
- [6] Information on the state and prospects for the use of the mineral resource base of the Orenburg region as of March 15, 2022. – St. Petersburg: VSEGEI, 2022. – 19 p.
- [7] Information on the state and prospects for the use of the mineral resource base of the Astrakhan region as of December 15, 2021. – St. Petersburg: VSEGEI, 2022. – 13 p.
- [8] Information on the state and prospects for the use of the mineral resource base of the Republic of Bashkortostan as of March 15, 2022. – St. Petersburg: VSEGEI, 2022. – 23 p.
- [9] Information on the state and prospects for the use of the mineral resource base of the Republic of Sakha (Yakutia) as of March 15, 2022. – St. Petersburg: VSEGEI, 2022. – 18 p.
- [10] Fettah R. Prospects for the use of helium (Algeria) // Oil, gas and energy, 2006. – No. 3. – P. 32-39.
- [11] Mustafin S.K., Struchkov K.K., Trifonov A.N. Industrial helium content of hydrocarbon raw materials of deposits of various oil and gas provinces: state of knowledge and prospects for development. Collection of abstracts of the All-Russian Scientific Conference "Geology and oil and gas potential of the Republic of Sakha (Yakutia): problems of exploration and development. Institute of Oil and Gas Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Yakutsk – Kirov, 2022. – P. 66-69.

**ОЦЕНКА УРОВНЯ ЭРОЗИОННОГО СРЕЗА РУДНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ
ЧУМЫШСКОГО РУДНО-РОССЫПНОГО УЗЛА (СЕВЕРО-ВОСТОК РОССИИ)
НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ ТИПОМОРФНЫХ ПРИЗНАКОВ РОССЫПНОГО
ЗОЛОТА**

Иван Литвиненко

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

**EVALUATION OF THE LEVEL OF THE EROSIONS TRUNCATION OF
THE ORE OCCURRENCES OF THE CHUMYSH ORE-PLACER KNOT (NORTH-
EAST OF RUSSIA) ON THE BASIS OF THE STUDY OF THE TYPOMORPHIC
FEATURES OF PLACERS GOLD**

Ivan Litvinenko

North-East Interdisciplinary Scientific and Research Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy
of Sciences, 16 Portovaya st., Magadan, 685000, Russia

Annotation. A comprehensive study of native gold and mineral paragenesis in eluvial placers above ore manifestations of the Chumysh ore-placer cluster in the southeastern part of the Yano-Kolyma gold-bearing belt has been carried out. The ore occurrences of the knot, which served as primary sources of placers, are characterized by gold-polysulfide, gold-rare metal and silver-polysulfide types of ore mineralization, respectively, with medium-high-fineness, low-fineness and very low-fineness gold. They reflect the stages of the space-time sequence of development of ore systems associated with the Chumysh granitoid massif. According to the typomorphic features of native gold in eluvial placers, the type of mineralization was determined and, on its basis, the level of erosional cut in associated ore occurrences: on Kontaktovoi - upper-middle ore, on Strannoe - medium-lower ore, on Zabytiy and Berezovoi - lower-middle ore, on Osadochny - medium ore.

1. Введение

Чумышский рудно-россыпной узел расположен в средней части Армано-Вилигинской синклиналиной зоны на юго-востоке Яно-Колымской складчатой системы (Рисунок 1). Развитые в его пределах поздне триасовые и раннеюрские осадочные породы смяты в брахисинклиналиную складку, в ядре которой располагаются позднеюрские (В.К. Романин и др., 2009 г.) гранитоиды Чумышского массива, образующие изометричную очаговую структуру. К ней приурочены все известные рудные проявления узла (см. Рисунок 1). Золотое оруденение представлено главным образом зонами дробления, минерализованными кварцем и сульфидами, реже – участками площадного окварцевания и зонами кварц-сульфидного прожилкования.

Рудные проявления узла установлены в ходе геологосъемочных работ в конце прошлого века. По результатам комплексных поисково-оценочных работ начала XXI-го века (В.К. Романин и др., 2009 г.) они были отнесены к золото-полисульфидно-кварцевому (связанные с интрузиями) типу. Определение уровня их эрозийного среза опиралось на данные литогеохимических съемок. Целью настоящей работы является оценка уровня эрозийного среза наиболее перспективных рудных проявлений узла на основе изучения типоморфных признаков самородного золота в залегающих над ними элювиальных россыпях.

Отбор шлиховых проб проведен на рудных проявлениях Контактное, Странное, Забытое, Осадочное, Березовое*. Всего извлечено и описано 9486 зерен самородного золота, в

* Пробы для исследования предоставлены ООО «Станнолит».

мантированных аншлифах изучен состав 350 золотин и 129 зерен рудных минералов. Определение химического состава исследованных рудных минералов, пробности золотин и состава в них микровключений выполнено локальным микрорентгеноспектральным анализом на микронзондовом анализаторе Camebax № 304, дополнительно укомплектованном энергодисперсионным спектрометром X-Max 50 английской фирмы Oxford Instruments, программное обеспечение Inca Energy (г. Магадан, ЦКП СВКНИИ ДВО РАН, аналитики Т.В. Субботникова и Е.М. Горячева). Для изучения минерального состава микровключений в самородном золоте, кроме того, использовался сканирующий электронный микроскоп EVO-50 германской фирмы Carl Zeiss с рентгеновской системой энергодисперсионного микроанализа Quantax американской корпорации Bruker (ЦКП СВКНИИ ДВО РАН, аналитики О.Т. Соцкая, Е.М. Горячева).

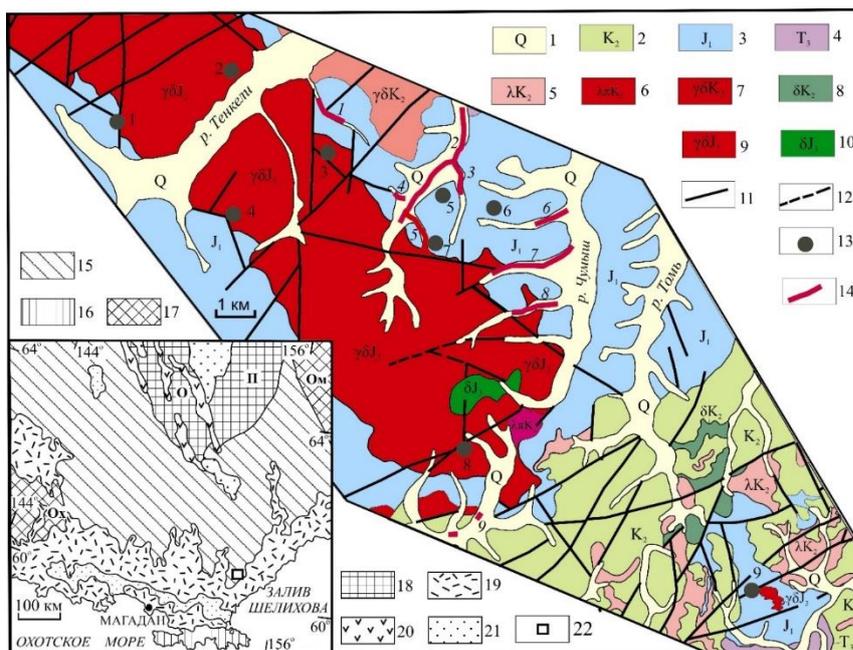


Рисунок 1 – Геологическая схема Чумышского рудно-россыпного узла (по В.К. Романин и др., 2009 г.): 1 – четвертичные ледниковые, водно-ледниковые (щебнисто-глыбовые с песком) и аллювиальные (галечные с песком и валунами) отложения; 2 – позднемеловые игнимбриты риолитов, андезиты и их туфы, риолиты, риодациты, 3 – раннеюрские глинистые сланцы, алевролиты с прослоями туфов и туфопесчаников; 4 – позднетриасовые алевроито-глинистые и глинистые сланцы; 5 – позднемеловые субвулканические тела риолитов, риолито-дацитов, дацитов; 6–8 – позднемеловые гранодиориты (6), гранит-порфиры (7), диориты (8); 9, 10 – позднеюрские гранодиориты (9), диориты (10); 11–12 – разрывные нарушения: установленные (11), предполагаемые (12); 13 – рудопоявления (1 – Тенгкели, 2 – Левое, 3 – Забытое, 4 – Пологое, 5 – Странное, 6 – Скальное, 7 – Контактное, 8 – Осадочное, 9 – Березовое); 14 – россыпи золота (1 – руч. Забытый, 2 – руч. Глухариный, 3 – руч. Странный, 4 – руч. Крючок, 5 – руч. Контактный, 6 – руч. Последний, 7 – руч. Облачный, 8 – руч. Дождливый, 9 – руч. Ветвистый); 15–22 – обозначения геологических структур на врезке: 15, 16 – Верхояно-Чукотская (15) и Корякско-Камчатская (16) складчатые области; 17 – Охотский (Ох) и Омолонский (Ом) срединные массивы; 18 – Омуплевское (О) и Приколымское (П) поднятия; 19, 20 – Охотско-Чукотский (19) и Уяндино-Ясачненский (20) вулканогенные пояса; 21 – наложенные кайнозойские впадины; 22 – местоположение Чумышского рудно-россыпного узла.

2. Типоморфные свойства самородного золота в элювиальных образованиях над рудными проявлениями узла

На рудопоявлении *Контактное* наиболее детально самородное золото исследовано в пробах К-2-9 и К-2-17.

В пробе К-2-9 рудные минералы представлены ильменитом (преобладает) пиритом, арсенопиритом, магнетитом с небольшим количеством галенита и халькопирита. В качестве микровключений в самородном золоте отмечен арсенопирит. Самородное золото в основном

комковидной формы преимущественно весьма мелкой размерности серо-белого и бледно-желтого цвета с шагреновой, ямчатой и мелкоямчатой поверхностью. По пробности достаточно определенно выделяется две генерации золота (Рисунок 2). Основная его масса представлена выделениями весьма низкой пробности (400–600 ‰). В очень небольшом количестве присутствуют золотины низкопробной генерации (700–800 ‰). И низкопробные и весьма низкопробные зерна имеют достаточно однородный состав, лишь в единичных золотилах весьма низкой пробности отмечаются его колебания с перепадом до 80 ‰.

В пробе К-2-17 (и в соседних пробах) среди рудных минералов преобладают ильменит и теллурувисмутит, в очень небольшом количестве присутствуют сульфотеллуриды W_i (тетрадимит) и халькопирит. В качестве микровключений в теллурувисмутите отмечаются галенит и пирротин, а в самородном золоте – галенит. Самородное золото представлено комковидными и таблитчатыми выделениями весьма мелкой размерности преимущественно желтого реже бледно- и зеленовато-желтого цвета с мелкоямчатой и шагреновой поверхностью зачастую с пленками гидроксидов железа. По пробности в самородном золоте выделяется три генерации золота: основная – низкопробная, менее распространенная – среднепробная и в очень незначительном количестве – весьма низкопробная (см. Рисунок 2). Золотины имеют относительно однородный состав.

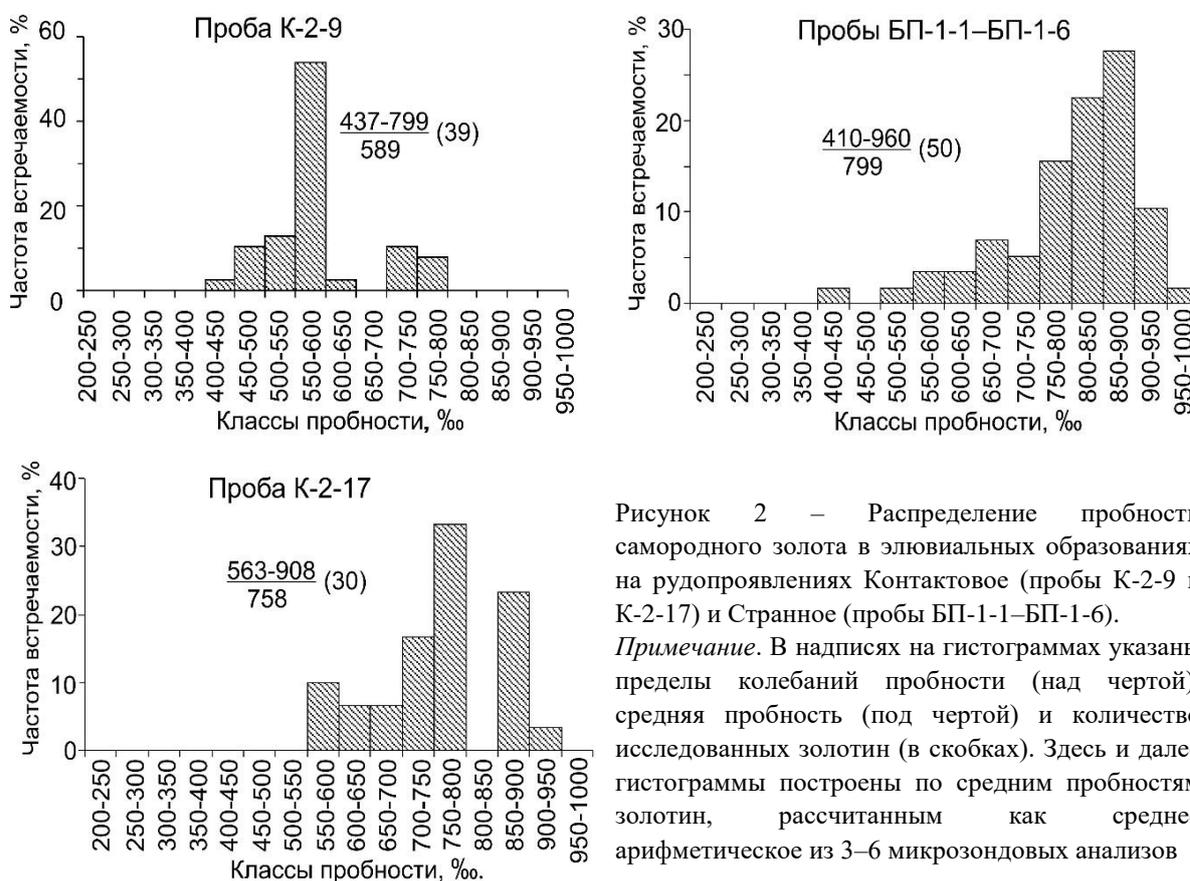


Рисунок 2 – Распределение пробности самородного золота в элювиальных образованиях на рудопоявлениях Контактное (пробы К-2-9 и К-2-17) и Странное (пробы БП-1-1–БП-1-6).

Примечание. В надписях на гистограммах указаны пределы колебаний пробности (над чертой), средняя пробность (под чертой) и количество исследованных золотинок (в скобках). Здесь и далее гистограммы построены по средним пробностям золотинок, рассчитанным как среднее арифметическое из 3–6 микрозондовых анализов

На рудопоявлении **Странное** наиболее детально самородное золото исследовано в пробах БП-1-1–БП-1-6. Рудная минерализация представлена пиритом, арсенопиритом, галенитом, железистым (высокотемпературным) сфалеритом и халькопиритом. В самородном золоте в качестве микровключений отмечался арсенопирит. При этом в отличие от оруденения рудопоявления Контактное галенит здесь не содержит W_i и Ag . Самородное золото представлено преимущественно комковидными и таблитчатыми выделениями желтого и бледно-желтого (реже темно- и зеленовато-желтого) цвета с шагреновой и мелкоямчатой поверхностью зачастую в сростках с гидроксидами железа. Наибольшим распространением пользуются зерна весьма мелкой и мелкой размерности. По пробности преобладают золотины

средне-высокопробной генерации, при подчиненной роли низкопробных золотин (см. Рисунок 2).

Большинство золотин характеризуется достаточно однородным составом, но в то же время отмечается значительное количество зерен с переменным содержанием Au и Ag. Особенно они характерны для низкопробного золота. В отдельных таких зернах перепад пробы достигает 400 ‰ (это сростки низкопробных и весьма низкопробных фаз). В золотилах средней пробности колебания состава менее резки и не превышают 80–90 ‰, и лишь в отдельных случаях достигают 150 ‰ (сочетание низко- и среднепробных фаз).

На рудопроявлении *Забывтое* в пробах *K-4-25* и *K-4-26* среди рудных минералов преобладает ильменит и магнетит с небольшим присутствием пирита. Наличие в соседних пробах в шлихах скородита указывает на развитие здесь и арсенопирита. Самородное золото весьма мелкой размерности представлено комковидными образованиями темно-желтого, желтого и бледно-желтого цвета с неровной (грубоямчатой, ямчатой и мелкоямчатой) поверхностью. Зачастую они находятся в сростках с гидроксидами железа и кварцем. По пробности выделяется две генерации золота: основная низко-среднепробная (700–900 ‰) и подчиненная весьма низкопробная (Рисунок 3). В подавляющем большинстве золотины имеют достаточно однородный состав и лишь в отдельных случаях отмечаются сростки весьма низкопробных и низкопробных, низкопробных и среднепробных фаз.

В пробах *K-5-2* и *K-5-6* среди рудных минералов также преобладают магнетит и ильменит с подчиненным содержанием пирита и арсенопирита (в пробе *K-5-6* – доля пирита становится существенной). В единичных зернах отмечен теллурувисмутит и висмутовые сульфосоли (?). Среди выделений самородного золота наряду с преобладающими весьма мелкими зернами присутствуют золотины крупнее 0,25 мм. По морфологии это комковидные образования бледно-желтого и желтого цвета с очень неровной (грубо ямчатой, ямчатой и ямчатой) поверхностью, в сростках с кварцем и реже гидроксидами железа. Резко преобладают золотины со средней пробностью (см. Рисунок 3). Состав золотин в основной их массе достаточно однородный, лишь в единичных золотилах низкой пробности отмечаются ее колебания до 70 ‰, а отдельные золотины представляют собой сростки низкопробных и среднепробных фаз. В целом пробность золота относительно выдержанная и колеблется от 720 до 872 ‰

На рудопроявлении *Осадочное* в исследованных пробах рудные минералы представлены главным образом пиритом с подчиненным присутствием арсенопирита, ильменита, магнетита, галенита и молибденита. Среди самородного золота преобладают весьма мелкие выделения с небольшой долей зерен крупнее 0,25 мм. В основном это комковидные образования желтого реже бледно- и темно-желтого цвета с очень неровной (грубоямчатой и ямчатой) поверхностью в сростках с гидроксидами железа. В пробе *K-11-3* в значительном количестве отмечаются пластинчатые зерна, а 91 ‰ золотин находится в сростках с кварцем. В пробе *K-11-1* выделяется три генерации золота: весьма низкопробная, низкопробная и низко-среднепробная (см. Рисунок 3). В пробе *K-11-3* резко преобладает низкопробная (750–800 ‰) генерация золота. Состав золотин в большинстве случаев достаточно однородный. Золотины с переменным составом (до 80 ‰) присутствуют среди низкопробных разностей. В единичных случаях отмечаются сростки весьма низкопробных и низкопробных (разница до 170 ‰) фаз.

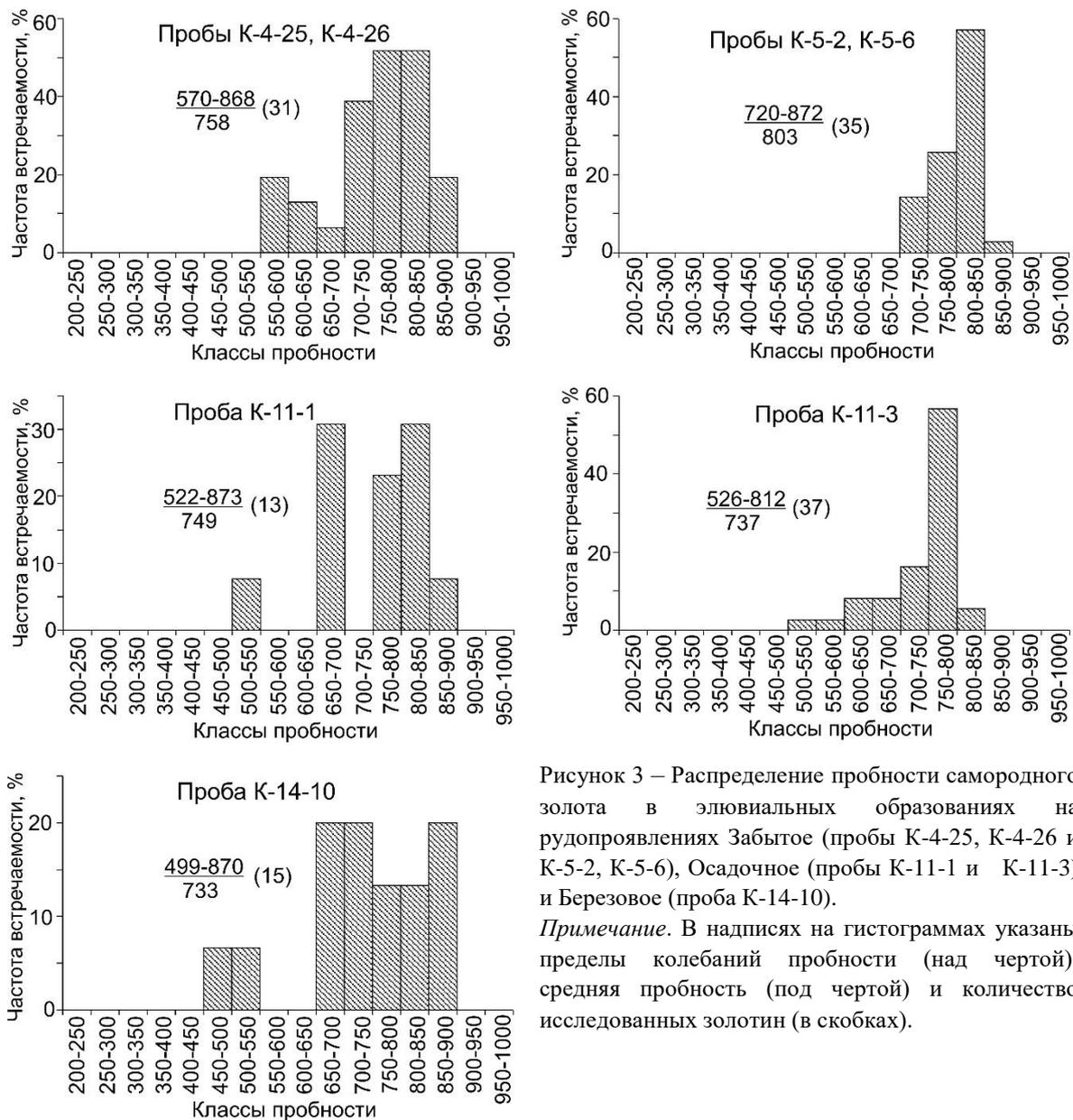


Рисунок 3 – Распределение пробности самородного золота в элювиальных образованиях на рудопроявлениях Забытое (пробы К-4-25, К-4-26 и К-5-2, К-5-6), Осадочное (пробы К-11-1 и К-11-3) и Березовое (проба К-14-10).

Примечание. В надписях на гистограммах указаны пределы колебаний пробности (над чертой), средняя пробность (под чертой) и количество исследованных золотин (в скобках).

На рудопроявлении *Березовое* в исследованной шлиховой пробе рудная минерализация представлена главным образом пиритом, в подчиненном количестве отмечаются арсенопирит, галенит, халькопирит, пирротин. В качестве включений в арсенопирите отмечались халькопирит и галенит, а в галените – пирротин. Галенит представлен как относительно беспримесными (преобладают), так и находящимися в подчиненном количестве висмут- и серебросодержащими (Вi и Ag соответственно до 3 и 2 %) разностями. В самородном золоте выявлены включения галенита и пирротина. Золото преимущественно весьма мелкой размерности, комковидной и дендритовидной формы желтого цвета с ямчатой поверхностью и пленками гидроксидов железа. По пробности выделяется три генерации золота: резко подчиненная весьма низкопробная (450–550 ‰), основная низкопробная (650–800 ‰) и подчиненная среднепробная (см. Рисунок 3). Как правило, они встречаются в виде достаточно однородных самостоятельных зерен, иногда отмечаются сростки весьма низкопробных и низкопробных (перепад пробы до 160 ‰.) реже низкопробных и среднепробных (с перепадом пробы также до 160 ‰) фаз.

3. Выводы

Исходя из установленной зональности развития рудно-магматических систем в пределах Чумышского узла [1], выражающейся в пространственно временной смене золото-полисульфидного (с весьма мелким, мелким и средним комковидным и таблитчатым золотом средней и высокой пробности) типа оруденения, золото-редкометальным (с весьма мелким и мелким комковидным и таблитчатым низкопробным золотом) и серебро-полисульфидным (с весьма мелким комковидным, таблитчатым и пластинчатым весьма низкопробным и высокосеребристым золотом), на основе полученных материалов можно высказать следующие представления о минеральном типе оруденения в исследованных рудопроявлениях и оценить уровень среза связанных с ними рудных систем.

На рудопроявлении Контактное оруденение представлено в основном золото-редкометальным и серебро-полисульфидным типами минерализации с подчиненным развитием золото-полисульфидного. Уровень эрозионного среза рудной системы – верхне-среднерудный.

Рудные зоны на рудопроявлении Странное характеризуются преимущественно золото-полисульфидным типом минерализации. Уровень эрозионного среза рудной системы – средне-нижнерудный.

Золотое оруденение на рудопроявлении Забытое относится к золото-полисульфидному и золото-редкометальному типам минерализации с подчиненным развитием серебро-полисульфидного. Уровень эрозионного среза рудной системы – ниже-среднерудный.

На рудопроявлении Осадочное преобладающим является золото-редкометальный тип оруденения с очень подчиненным развитием серебро- и золото-полисульфидного. Уровень эрозионного среза рудной системы – среднерудный.

В пределах рудопроявления Березовое преимущественным развитием пользуются золото-редкометальный и золото-полисульфидный типы минерализации с подчиненным присутствием серебро-полисульфидного. Уровень эрозионного среза рудной системы – ниже-среднерудный.

4. Литература

[1] Litvinenko, I. S. Gold mineralization of the Chumysh ore-placer cluster (North-East of Russia) // In: Fundamental problems of field geology of mineral resources and metallogeny: Proceedings of the XXI Intern. conf., dedicated 100th anniversary of the birth. acad. V. I. Smirnova (Moscow, Moscow State University, 26–28 Jan. 2010). – Moscow: Moscow State University, 2010. – P. 44–45.

ИНДИКАТОРНЫЙ ПРИЗНАК ГИДРОТЕРМАЛЬНО-МЕТАСОМАТИЧЕСКИХ ОБРАЗОВАНИЙ – РТУТЬСОДЕРЖАЩЕЕ ЗОЛОТО

Зинаида Никифорова

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

THE INDICATOR OF HYDROTHERMAL-METASOMATIC FORMATIONS IS MERCURY GOLD

Zinaida Nikiforova

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

Annotation. It is proved for the first time that the main primary sources of gold in the east of the Siberian Platform are gold-bearing hydrothermal-metasomatic formations spatially-linked with deep faults. These formations are amagmatic and are observed in easily permeable terrigenous-carbonate and sandy rocks of PZ-MZ age, in zones of brecciation, ferruginization and silification. They form long narrow formations along ancient faults activated in the Mesozoic. It is identified that in gold-bearing hydrothermal-metasomatic formations, gold is characterized by certain mineralogical and geochemical features. It is mainly represented by lamellar and lumpy forms, from finely dispersed to visible fine, with a size of 0.01 to 0.5 mm or more. Gold has different fineness from 600-900‰, sometimes up to 1000‰, an increased content of Hg from 0.12 to 6% or more. Microinclusions of quartz, calcite, pyrite, arsenopyrite, sometimes tellurides, in rare cases selenides and rare-earth phosphates were found in it. At some sites, spongy brittle aggregates with a high mercury content were found (up to 40%), consisting of intergrowths of small gold particles, sometimes spherical in shape (up to 0.01 mm) with iron hydroxides. The identified mineralogical features of gold allow us to refer it to gold-sulfide mineralization. Thus, it was identified for the first time that the main indicator feature of gold of hydrothermal-metasomatic formations is mercury gold with certain characteristics. These include an increased mercury content of up to 7%, as well as a porous, spongy surface with a greenish tinge, sometimes this gold forms aggregates of spherical formations cemented with mercurous gold.

1. Введение

Выявление минералого-геохимических особенностей россыпного золота является весьма информативным показателем, позволяющим прогнозировать тип золоторудных месторождений и их местоположение [1]. Обоснование индикаторных признаков, характерных для определенных типов оруденения, дает основание более корректно прогнозировать и целенаправленно вести поиски рудных источников. Особенно это актуально для платформенных территорий, перекрытых мощными толщами осадочных отложений, где традиционные методы поиска золоторудных месторождений не приносят положительных результатов.

2. Основной раздел

Россыпное золото из гидротермально-метасоматических зон представлено в основном чешуйчатыми и пластинчатыми формами, размером от пылевидного до 1-2 мм и более, средней и высокой пробности и широким диапазоном элементов-примесей. Характерной особенностью для этого золота является повышенное содержание ртути до 7%, иногда оно представлено шаровидными формами губчатого строения. В золоте обнаружены следующие микровключения: пирит, арсенопирит, кальцит, теллуриды, минералы с редкоземельными элементами. По минералого-геохимическим особенностям это золото соответствует коренным источникам золотосульфидной минерализации (Таблица 1).

Таблица 1 – Минералого-геохимические особенности россыпного золота гидротермально-метасоматических образований

| Предполагаемые типы золото-рудных источников | Минералого-геохимические особенности россыпного золота гидротермально-метасоматических образований | | | | | |
|--|--|--|---------------|---|--|--|
| | Гранулометрия (мм) | Форма | Пробность (%) | Элементы-примеси | Микровключения | Внутренние структуры |
| Ag-S-Q | -0,1-0,25 – 1-2 > | Пластинчатая, таблитчатая, комковидная | 750–999 | Hg до 7% As-0,002; Sn- 0,1; Pb-0,002; Mn-0,0023; Fe-0,1; Cu-0,012; Ni-0,0006; Pt- сл; Pd-сл. | Пирит, арсенопирит, кальцит теллуриды, минералы с редкоземельными элементами | Крупнозернистые, среднезернистые, неясно-зональные |

Золото с такими минералого-геохимическими особенностями обнаружено в гидротермально-метасоматических образованиях, как на северо-востоке, так и на юго-востоке Сибирской платформы [2]. Эти образования амагматичны, пространственно приурочены к зонам глубинных разломов, наблюдаются в терригенно-карбонатных толщах карбонатных и песчаных породах PZ-MZ возраста, в зонах брекчирования, ожелезнения и окварцевания. Они формируют протяженные узкие образования по древним разломам, активизированным в мезозое.

На северо-востоке гидротермально метасоматические образования обнаружены в зоне Уджинского палеорифта, Жиганского разлома, а также в Молодо-Попигайской системе разломов [3, 4]. В россыпных проявлениях рек Моргогор, Маят, Курунг-Юрях и др. (Молодо-Попигайской системы разломов) это золото характеризуется крупным размером более 1 мм, представлено в основном комковидной и пластинчатой формами, низкой и средней пробностью (600-899‰). В нем кроме Ag обнаружены примеси Hg – от 0,1 до 3,5% и Cu – от 0,1 до 1,5%. Поверхность золота пористая с зеленоватым оттенком, слабо обработанная (Рисунок 1 а, б, в). Внутренние структуры золота моно-, средне- и крупнозернистые, с четкими границами зерен. Обнаружение золота с низкой и средней пробностью и повышенным содержанием ртути, позволяет предполагать о малоглубинных обстановках формирования коренных источников.

В центральной части востока Сибирской платформы в зоне Кемпендяйских дислокаций в истоках рек Тонгуо, Чыбыда, Кемпендяй и др. обнаружено россыпное золото с такими же минералого-геохимическими особенностями, соответствующими источникам золотосульфидной минерализации, проявленным в зонах гидротермально метасоматических образований мелового возраста. Здесь золото представлено в основном чешуйчатými золоти́нами, иногда комковидной формы размером менее 0,1 мм, достигающей 90%, что свидетельствует о поступлении золота из рядом находящегося источника золото-сульфидной формации. Золото характеризуется повышенным содержанием ртути, широким диапазоном элементов-примесей, микровключений пирита, арсенопирита и кварца, а также кальцита и др. (Рисунок 2). Россыпное золото с такими минералого-геохимическими характеристиками встречается в истоках рек Тонгуо (Табасында, Далыгыр, Тагнара, Кэримде), Чыбыда (Бадараннах, Тымтайдах, Юриен-Кель).

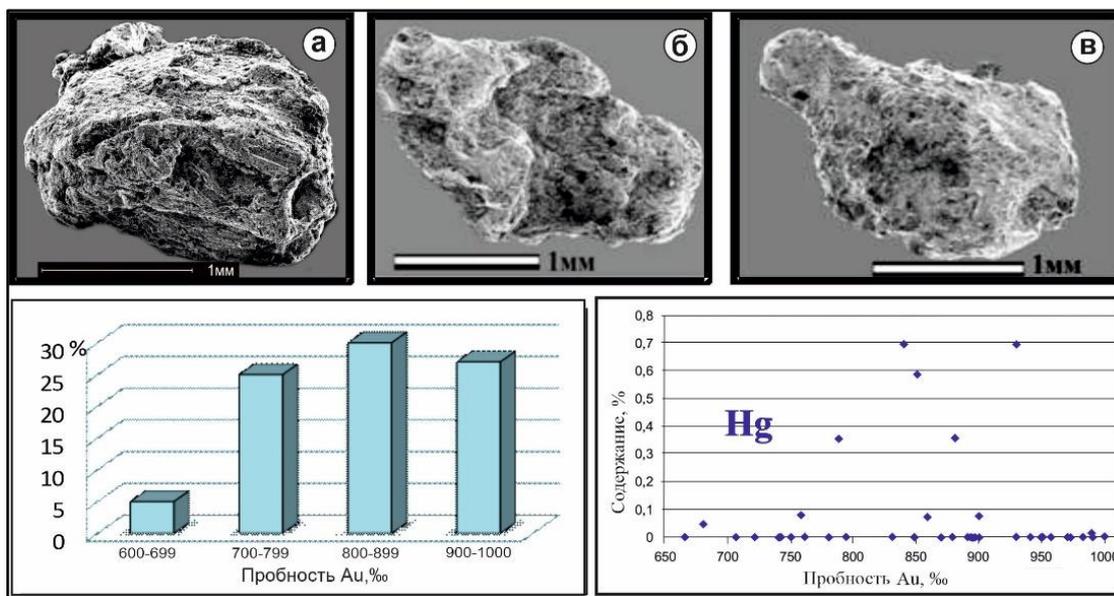


Рисунок 1 – Минералого-геохимические особенности россыпного золота р. Моргогор.

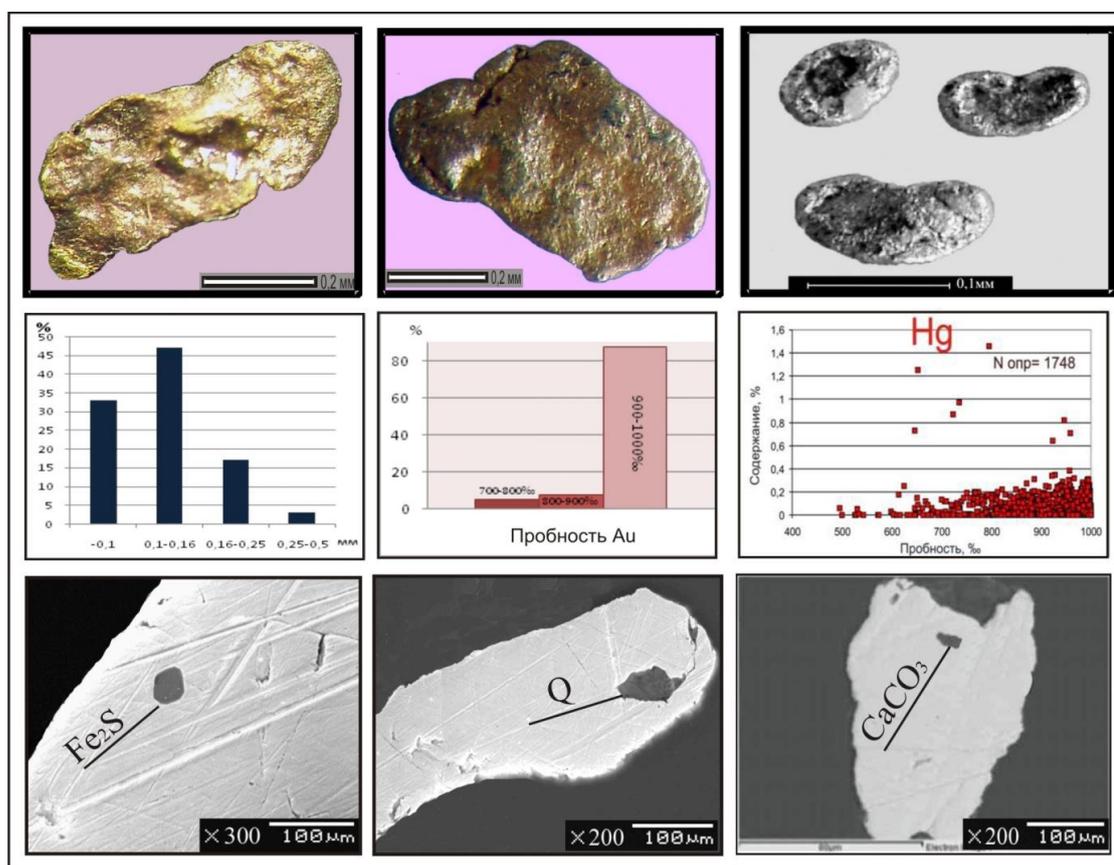


Рисунок 2 – Минералого-геохимические особенности россыпного золота истока р. Тонгу (Табасында).

Изучение минералого-геохимических особенностей россыпного золота и закономерности его распределения на юго-востоке Сибирской платформы (бассейн Средней Лены) позволило также установить, что основная часть золота в россыпи поступила из золотоносных гидротермально-метасоматических образований, которые имеют весьма широкое распространение [2]. Золотоносные гидротермально-метасоматические образования выявлены в терригенно-карбонатных толщах палеозоя. Установлено, что эти образования амагматичны и не связаны с широко проявленным магматизмом базитового состава. Эти зоны приурочены к

Байкало-Патомскому надвиговому поясу, в основном к древним разломам (Нюрбинский, Кемпендяйский, Баппагайский, Хоринский и др.), выражены серией мелких тектонических структур (грабены, разломы, надвиги и др.) и характеризуются брекчированием, окремнением, окварцеванием и лимонитизацией осадочных пород палеозойского возраста. Обнаруженные зоны метасоматитов с золоторудной минерализацией содержат Au от 0,5 до 3,0 г/т, а в единичных случаях до 24-32 г/т.

При изучении минералогии россыпного золота бассейна Средней Лены (реки Витим, Контайка, Батамай, Джерба, Бол. Патом, Каменка и др.) установлено, что оно обладает определенными минералого-геохимическими признаками [5, 6]. Золото представлено в основном пластинчатыми, комковидными, редко дендритовидными, интерциальными и губчатыми формами, поверхность золотин шагреновая, иногда пористая (устье р. Витим) с зеленоватым оттенком. Размер золота от пылевидного до 0,5 мм и выше, преобладает фракция 0,16 – 0,2 мм (70 %), 0,1 – 0,16 мм составляет 30 %. К примеру, в устье р. Витим, относительно рассматриваемых объектов, золото более крупное 0,5 – 1 мм и более, а на некоторых объектах рр. Халаманда, Харса золото характеризуется более мелкой фракцией и представлено в основном тонкодисперсным размером (Рисунок 3). Диапазон пробности в золоте варьирует от 500 до 900‰, в среднем составляет 860‰, 10 % золотин имеют низкую пробность 650 - 777‰, в редких случаях обнаружена пробность 500 - 638‰, что составляет около 10 % (р. Батамай).

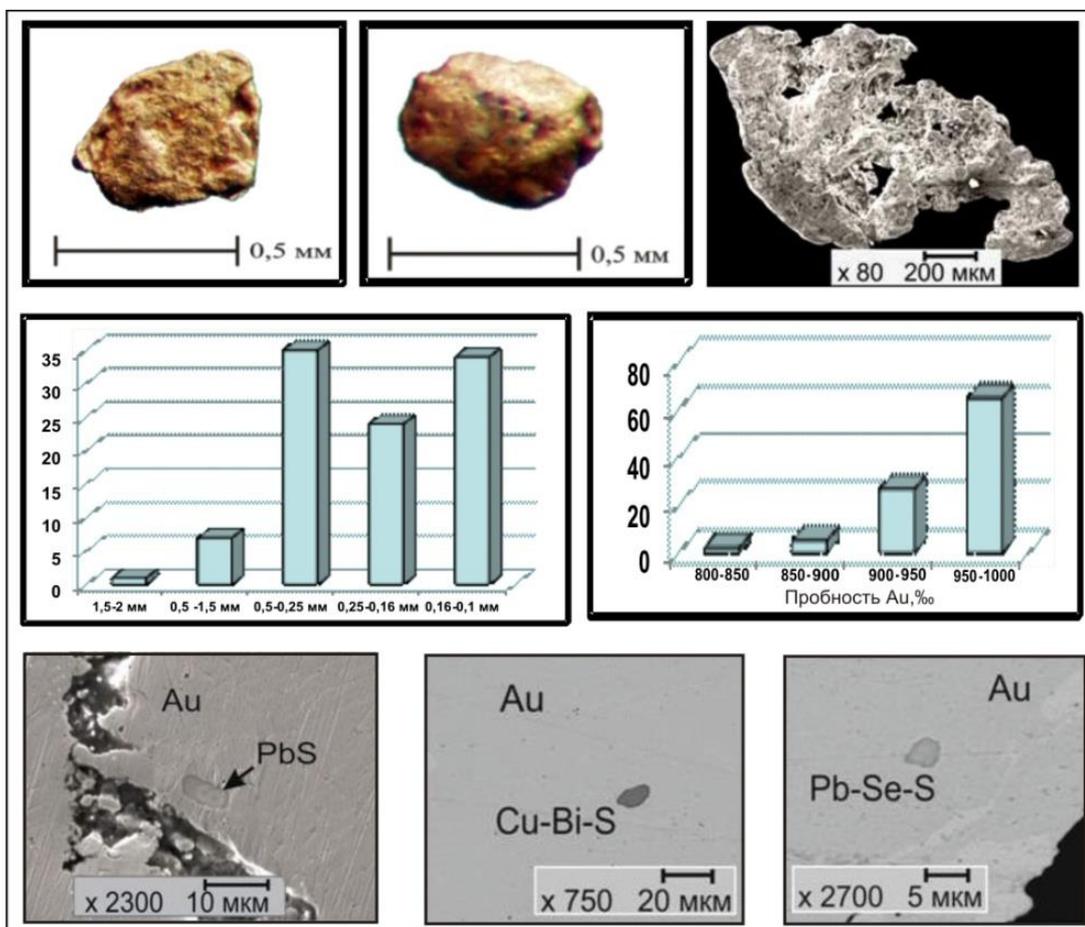


Рисунок 3 – Минералого-геохимические особенности россыпного золота устья р. Витим.

В золоте отмечается высокое содержание Ag (10,07 – 33,39 %), Hg (0,12 – 2,34 %), иногда до 6% и более и практическое отсутствие примеси Cu. В нем установлены повышенные содержания As, Te, Se, Co и Ni, микровключения сульфидов (пирит, халькопирит, арсенопирит), теллуридов, селенидов и редкоземельных фосфатов (Бол. Патом) (Рисунок 4). Наблюдаются сростки россыпного золота с жильными минералами – халцедоновидным кварцем (адуляром) и кальцитом.

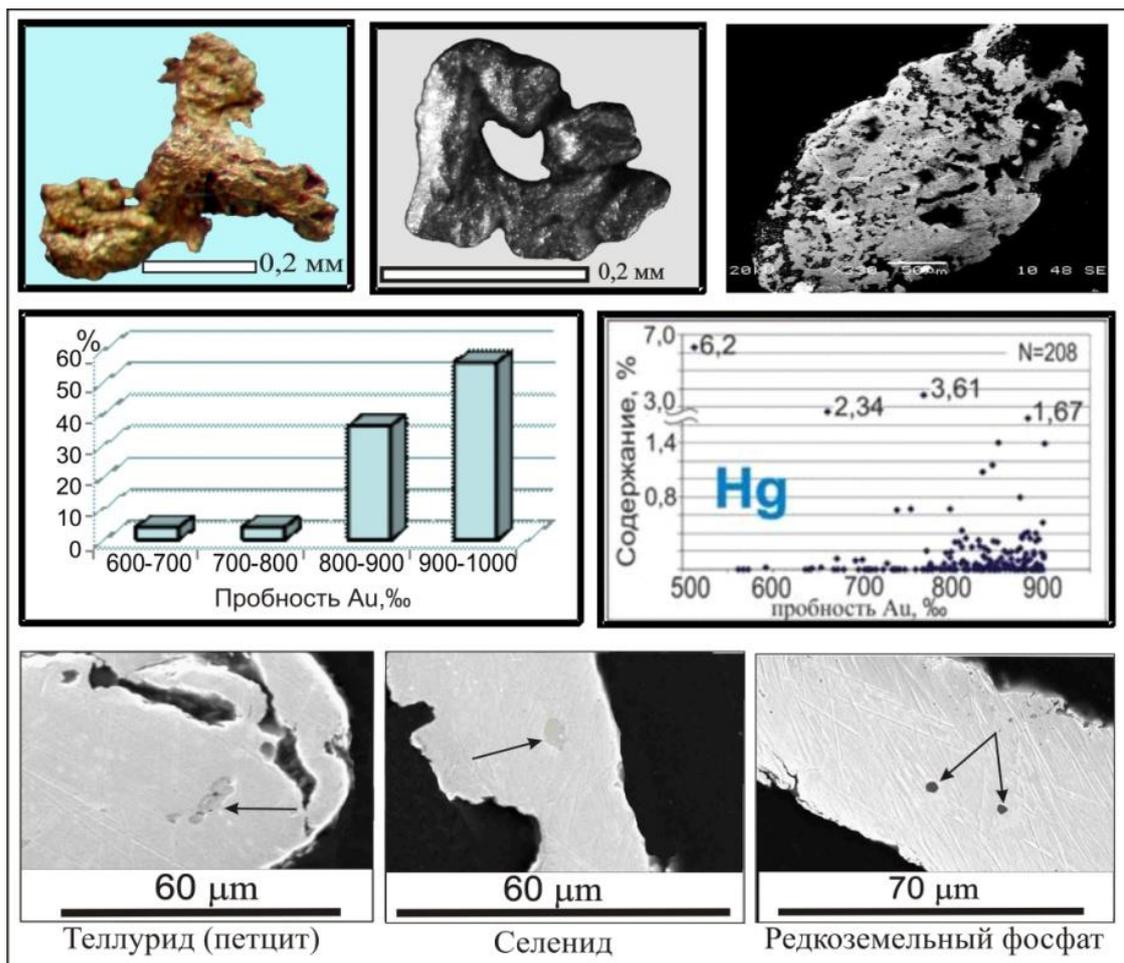


Рисунок 4 – Минералого-геохимические особенности россыпного золота устья р. Бол. Патом.

Подобные формы золота обнаружены на Восточно-Европейской платформе в гидротермально-метасоматических образованиях в бассейне р. Кама, где проявлена мезо-кайнозойская тектономагматическая активизация в зонах развития полихронных глубинных разломов и авлакогенов [7]. Золото представлено агрегатными частицами и глобулярными формами, размером 0,1-0,5 мм различной пробностью, широким диапазоном элементов-примесей с включениями интерметаллидов (Рисунок 5 а, б, в). Крупные глобулы сцементированы более тёмным золотом, в составе агрегата наблюдается повышенное содержание ртути (свыше 8 %), а также элементов примесей платиновой группы (Ir, Pt) и никеля.

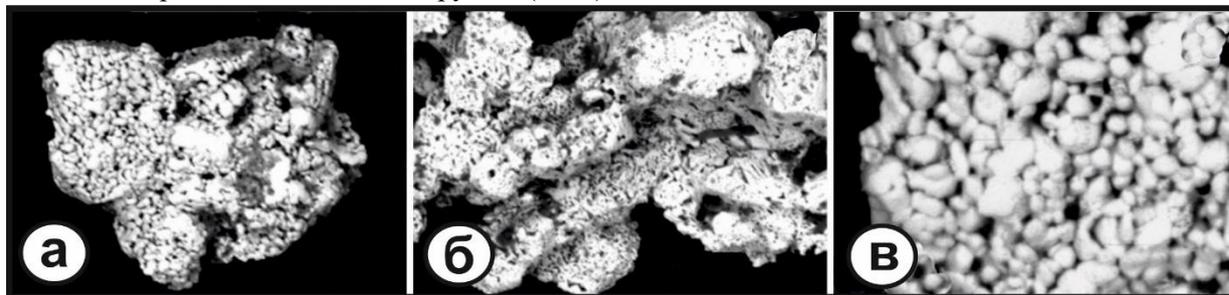


Рисунок 5 – Морфологические особенности ртутьсодержащего золота бассейна р. Кама: а, б – агрегат глобулярного строения, в – крупные глобулы пористого строения [7].

3. Выводы

Таким образом, обосновано, что основным индикаторным признаком россыпного золота из гидротермально-метасоматических образований является ртутьсодержащее золото с содержанием Hg от 2 до 7%. Это золото представлено чешуйчатыми и пластинчатыми

золотинами, как пылевидным размером от -0.1мм, так и золотом до 2 мм и более, в нем отмечается широкий диапазон элементов-примесей и микровключений, соответствующих золотосульфидной минерализации. Иногда оно образует комковидные, губчатые формы и мельчайшие шаровидные агрегаты с пористой поверхностью и с зеленоватым оттенком.

4. Благодарности

Работа выполнена по госзаданию ИГАБМ СО РАН.

5. Литература

- [1] Nikiforova, Z.S.; Gerasimov, B.B.; Glushkova, E.G.; Kazenkina, A.G. Indicator Signs as an Index of the Mineragenic Types of Gold Deposits. *Geol. Geophys.* 2018. – 10. – P. 1643-1657. – URL: <https://doi.org/10.15372/GiG20181009>.
- [2] Nikiforova Z.S Mineralogical Criteria for the Prediction of Gold Mineralization in the Structures of the Siberian Craton // *Minerals*, 2022. – 12(6). – 694 p.
- [3] Nikiforova Z.S., Bazilevskaya R.V., Gerasimov B.B. Discoveries of ore gold in the basin of the Ebelyakh river, north-east of the Siberian platform // *Russian Geology.* – 2006. – № 5. – P. 48-52.
- [4] Gerasimov B.B., Nikiforova Z.S. Coarse mercury placer gold of the basin of the middle course of the Anabar River // *Russian geology.* – 2009. – № 5. – P. 11-17.
- [5] Glushkova E.G., Nikiforova Z.S. Comparative characteristics of typomorphic features of native gold of the Middle Lena basin (south-east of the Siberian platform) // *Pacific Geology.* – 2010. – V. 29. – № 3. – P. 34-44.
- [6] Glushkova E.G., Nikiforova Z.S. Primary sources of placer gold of the Urinsky anticlinorium (south-east of the Siberian platform) // *Pacific Geology.* – 2013. – V.32. – №3. – P. 118-123.
- [7] Naumov V.A., Ilaltdinov I.Y., Osovetsky B.M. et al. Gold of the Verkhnekamsk depression. – Perm: Kudymkar-Perm, 2003. – 218 p.

ОТРАБОТКА МЕТОДИКИ АНАЛИЗА ТЯЖЕЛОЙ ФРАКЦИИ ДОННЫХ ОСАДКОВ О. ИТКУЛЬ

Вячеслав Новиков¹, Андрей Дарьин¹, Иван Калугин¹, Валерий Бабич¹, Денис Рогозин²,
Федор Дарьин³, Яков Ракшун³, Дмитрий Сороколетов³

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

2 ФГБУ «Институт биофизики СО РАН», Красноярск,
660036, Россия, г. Красноярск, Академгородок, 50

3 ФГБУН «Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН»,
630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 11

DEVELOPMENT OF THE METHOD OF ANALYSIS OF THE HEAVY FRACTION OF THE BOTTOM SEDIMENTS FROM THE ITKUL LAKE

Vyacheslav Novikov¹, Andrey Darin¹, Ivan Kalugin¹, Valeriy Babich¹, Denis Rogozin², Fedor Darin³,
Yakov Rakshun³, Dmitriy Sorokolev³

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

2 Institute of Biophysics SB RAS, 50, Academgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia

3 Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, 11, Akademika Lavrentieva pr.,
Novosibirsk, 630090, Russia

Annotation. The data of geochemical analysis of the heavy fraction in the composition of bottom sediments accumulated in the central part of the lake Itkul are presented. The mineral diversity and distribution of rock-forming and accessory minerals along the section are considered. The mineralogical features due to the close location of skarn deposits and ore occurrences are revealed.

Key words: prospecting geochemistry, bottom sediments, electron microscope, XRF-SR.

1. Введение

Территория озера Иткуль входит в государственный природный биосферный заповедник "Хакасский" (ООПТ) в Ширинском районе Республики Хакассия и имеет общую площадь 55,5 км². Непосредственно бассейн озера располагается в районе, где вскрывается апикальная часть Улень-Туимского гранитоидного батолита. К зоне верхнего контакта с известняками приурочены мелкие скарновые месторождения и рудопроявления Cu, Mo, W (Даринское, Алексеевское и др.) [1,3].

2. Пробоотбор и пробоподготовка

Полевые работы проводились в феврале 2018 г. С использованием ручного ударного пробоотборника и пластиковых труб отобраны керн донных осадков длиной 850 мм из самой глубокой точки озера (16,2 м).

В лабораторных условиях проведена пробоподготовка, включающая нарезку дискретных проб с шагом 10 мм. Дискретные пробы отбирались с верхней (0-10 мм), средней (310-320, 630-640 мм) и нижней (840-850 мм) частей керна, с целью проследить изменение минерального состава. При подготовке проб к элементному анализу, полученную 10 мм нарезку истирали в нефритовой ступке, после чего пропускали через лабораторное сито КСИ Ду300, с размером ячейки 0,16 мм. Полученный порошок предварительно взвешивался на весах ВЛР-200. Средний вес исходного вещества составил 2,8 г.

3. Методы и результаты аналитических исследований

Полученные образцы анализировали с помощью электронного сканирующего микроскопа JSM-6510LV (Jeol Ltd) В тяжелой фракции определялось порядка 300 минеральных зерен.

Определен набор основных рудных минералов. Количество наблюдаемых зерен рудных минералов значительно выше для верхнего интервала, что, предположительно, связано с началом активной разработки медных месторождений в конце XIX века [1].

В таблице 1 приведены данные (%) по распространенности рудных минералов, количественно оцененные по частоте встречаемости определенных рудных зерен (учтено около 300 для каждого интервала).

Таблица 1 – Средний процент встречаемости рудных минералов.

| Интервал \ Минерал | Халькопирит | Пирит | Магнетит | Ильменит | Пентландит |
|--------------------|-------------|-------|----------|----------|------------|
| 0-10 | 12 | 6 | 9 | 3 | 6 |
| 310-320 | | 3 | | | |
| 630-640 | | 2 | | 3 | |
| 840-850 | | | 3 | 4 | |

Среди рудных минералов доминируют магнетит, халькопирит, пирит, пентландит, ильменит, а также встречается многочисленными зернами пироксена и единичными зернами циркона (табл. 1). Минеральные зерна преимущественно не изменены, либо слабо изменены, средней степени окатанности.

Отложения из верхнего интервала (0-10 мм) подвергались сканирующему микроанализу. Анализ проводился в Сибирском центре синхротронного и терагерцового излучения по аттестованной методике [2]. Движение образца осуществлялось рядами по 5000 мкм. Расстояние между рядами составило 300 мкм. Время измерения в каждой точке составляло 20 сек, одновременно определялось содержание 22 породообразующих и следовых элементов и рентгеновская плотность образца.

Преимущество данного метода заключается в более детальном изучении химического состава образца. Так, с помощью РФА-СИ обнаружено зерно с высоким содержанием Мо, которое не удалось зафиксировать на электронном микроскопе.

4. Выводы

Использование электронного сканирующего микроскопа и РФА-СИ позволяет провести детальное изучение донных осадков с целью поисков геохимических индикаторов скрытых рудопроявлений. На территории водосбора о. Иткуль известно порядка 6 месторождений и рудопроявлений, которые хорошо прослеживаются в минеральном разнообразии по всей глубине опробования керна.

Также установлено уменьшение количества наблюдаемых зерен рудных минералов, что позволяет выделить границу начала активных добычных работ вблизи о. Иткуль.

5. Литература

- [1] State geological map of the Russian Federation, scale 1: 200,000. Second edition. Minusinskaya series. Sheet N-46-XIII (Sorsk). 2002.
- [2] Dar'in A.V., Rakshun Ya.V. Measurement technique for determining the elemental composition of rock samples by X-ray fluorescence analysis using synchrotron radiation from the VEPP-3 storage ring // Scientific Bulletin of the Novosibirsk State Technical University. – 2013. – No. 2 (51). – P. 112-118.
- [3] Parnachev S.V., Parnachev V.P. Geology of the Devonian deposits of the Chebakov-Balakhta depression (Republic of Khakassia). Guide to the geological excursion September 8–9, 2003. – Tomsk: TPU, 2003. – 36 p.

**ТИПЫ СТРУКТУР ПЕРСПЕКТИВНЫХ НА ПОИСКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
УГЛЕВОДОРОДОВ, ВЫЯВЛЕННЫХ ПО ДАННЫМ РЕГИОНАЛЬНЫХ
ГЕОФИЗИЧЕСКИХ И ГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В АЛДАНО-
МАЙСКОМ ПРОГИБЕ.**

Анатолий Оболкин

ФГБУН ФИЦ «ЯНЦ СО РАН» «Институт проблем нефти и газа СО РАН»,
677007, Россия, г. Якутск, ул. Автодорожная, 20

**TYPES OF STRUCTURES PROMISING FOR THE SEARCH OF HYDROCARBON
DEPOSITS, IDENTIFIED ACCORDING TO THE DATA OF REGIONAL
GEOPHYSICAL AND GEOCHEMICAL STUDIES IN THE ALDANO-MAY
TROUGH**

Anatoliy Obolkin

Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, 20, Avtodorozhnay str., Yakutsk, 677007, Russia

Annotation. In the Aldano-May trough, the typification of localized, promising objects for the identification of hydrocarbon deposits was carried out. Anticline and non-anticline structures of various types and combinations are described. Aldano-May deflection, seismic exploration, non-anticline traps of hydrocarbons.

1. Введение

Основные геологические результаты геофизических исследований Алдано-Майского прогиба (АМП) опубликованы в 2013г [1]. Отдельные черты строения прогиба освещены в материалах конференций [2-4]. Перспективы нефтегазоносности АМП, вначале были выявлены по естественным обнажениям рифея и венд-кембрия в бассейне р. Мая, где в полосе выхода малгинской свиты среднего рифея на дневную поверхность на протяжении около 50км установлены нефте-битумопроявления. Кроме того, признаки нефтегазоносности АМП были выявлены в венд-кембрийских (Нижеамгинская скважина) и рифейских отложениях (Лахандинская скважина) (Рисунок 1). Эти данные послужили основанием для начала сейсморазведочных работ на поиск ловушек углеводородов (УВ). [1-3]

2. Методика работ

В Алдано-Майском прогибе сейсморазведочные исследования были проведены геофизическим предприятием «Якутскгеофизика» в 1976-86гг, и возобновлены с 2005г по 2015г. Начиная с 2005г были применены методы выявления зон и ловушек неантиклинального (НАЛ) типа, наработанные при проведении региональных исследований на перспективных территориях Западной Якутии. Существование в пределах Непско-Ботуобинской антеклизы ловушек УВ неантиклинального типа впервые было установлено в 1981г на основании анализов результатов разведочного бурения на открытых месторождениях [5,6].

С 2005г, в пределах АМП, применялась следующая методика полевых сейсморазведочных исследований: центральная 60-кратная система наблюдений методом общей глубинной точки (МОГТ), регистрация колебаний осуществлялась сейсмостанцией SN-358 RU № 59, длина свипа составила 7с. В последующем, увеличение кратности до 120, улучшение графа обработки полевых материалов, расширение спектра полезного сигнала, позволило получить высококачественные временные разрезы практически на всю глубину осадочного чехла (15км на Восточно-Хандыгской площади).

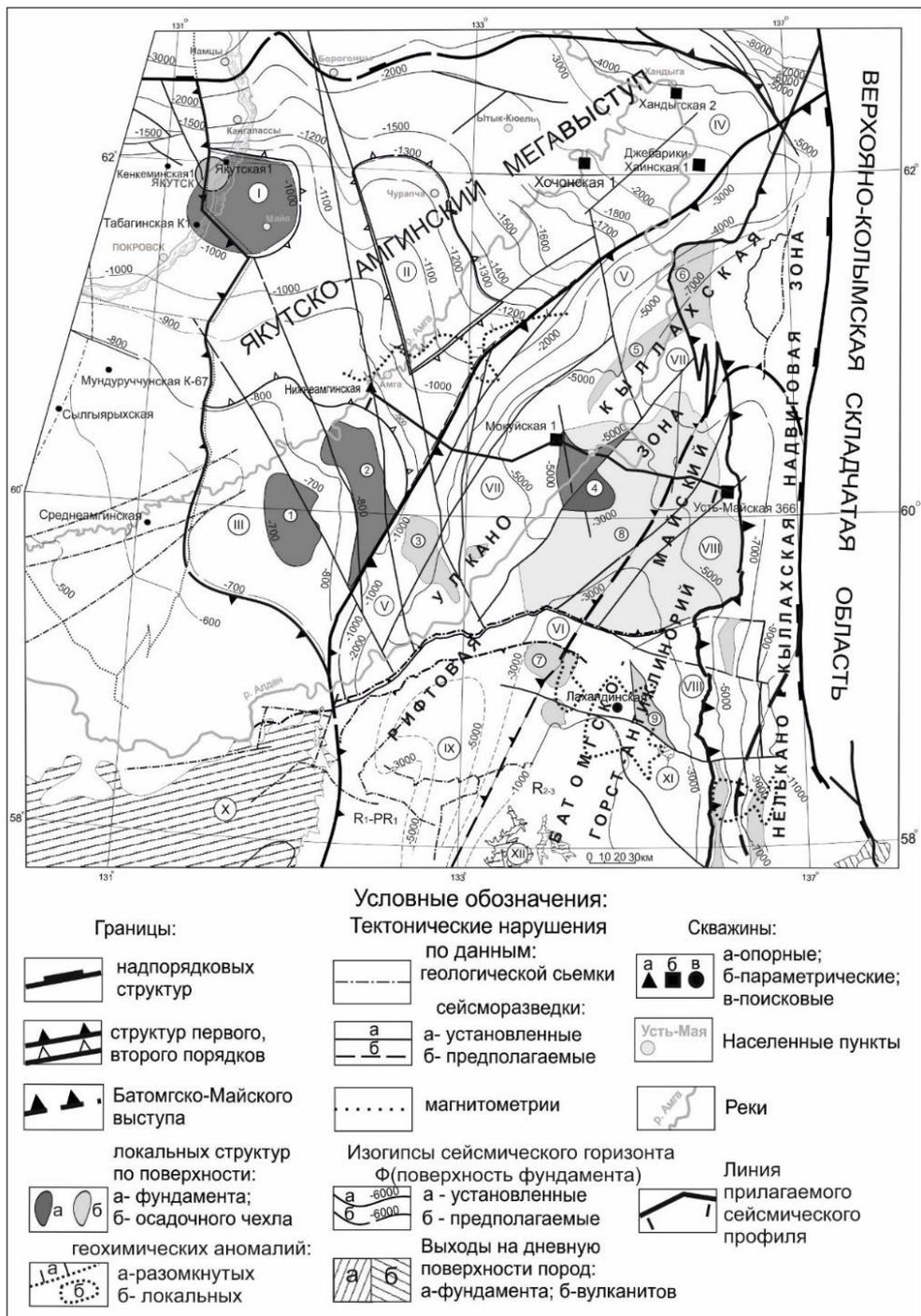


Рисунок 1 – Локализованные структуры в Алдано-Майском прогибе антиклинального и неантиклинального типов, выявленных сейсморазведкой, Оболкин А.П., 2007-2015гг

Условные обозначения к Рисунку 1.

Структуры первого, второго порядков: I – Якутский свод; II- Чурапчинский выступ; III-Белькачинский свод; IV-Амгинский структурный нос; V- Алданская моноклинал; VI- Дыгдинский вал; VII - Алданская впадина; VIII- Майская впадина; IX- Учурская впадина. Выходы на дневную поверхность пород фундамента: X-Учурский; XI-Ингилийский; XII-Омнинский. Локальные структуры по поверхности фундамента: 1-Белькачинская; 2- Билирская; 3- Нижнемайская. Локальные структуры осадочного чехла: 4-Мильская; 5- Малгинская НАЛ; 6- Кыллахская НАЛ; 7-Даланская; 8-Майская НАЛ.

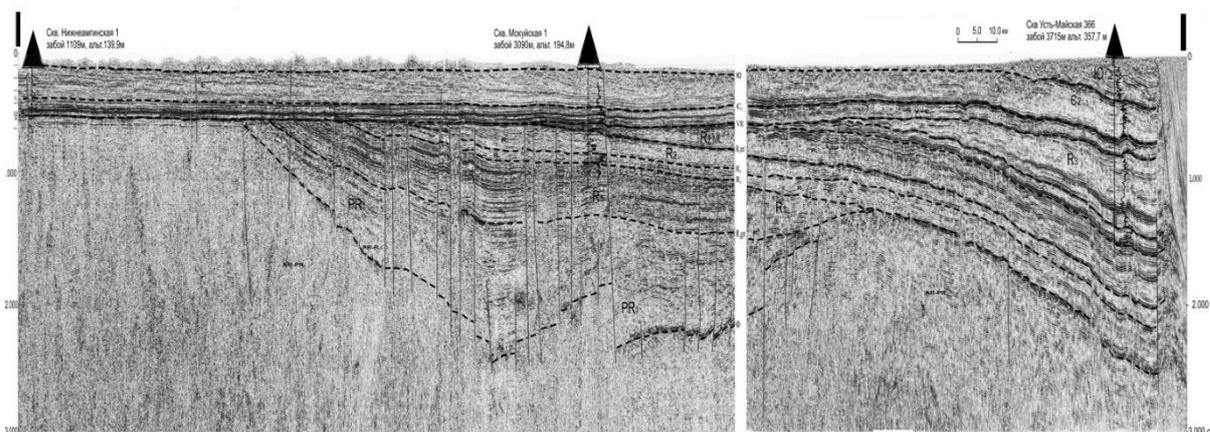


Рисунок 2 – Сейсмический временной, композитный разрез по линии профилей между скважинами Нижнеамгинская 1, Мокуйская 1, Усть-Майская № 366.

Для геофизической интерпретации применялась стандартная методика включавшая:

- стратиграфическую привязку отражающих горизонтов (ОГ) на временных разрезах с использованием данных бурения Нижнеалданской 1, Мокуйской 1, Хочомской, Лахандинской скважин;
- корреляцию ОГ и их увязку на пересечениях профилей; выделение на временных разрезах аномалий волнового поля, связанных с тектоническими нарушениями;
- построение карт изохрон отражающих горизонтов: ЮТ (поверхность предюрского размыва); $C_{1,2}$ (подошва инниканской свиты нижнего кембрия); VR (подошва венда); R_3 (подошва малгинской свиты среднего рифея); R_2 (подошва среднего рифея); R_{1gn} (подошва гонамской свиты нижнего рифея); Ф (поверхность кристаллического фундамента). Построение структурных карт по целевым горизонтам.

Для геологической интерпретации временных сейсмических разрезов были внедрены моделирование сейсмического волнового поля программными средствами, сейсмостратиграфия, комплексирование с гравимагнитными данными, геохимией и электроразведкой. Полученные результаты комплексных исследований АМП, неоднократно обсуждались на планах работ Роснедра с участием экспертов из профильных институтов.

Ниже приводится краткое описание характерных типов локальных объектов, установленных проведенными геофизическими и геохимическими исследованиями, перспективными на выявление месторождений УВ в Алдано-Майском прогибе и примыкающих территориях. Накопленные материалы о прогнозируемых типах ловушек углеводородов Алдано-Майского прогиба по результатам производственных отчетов позволили автору статьи провести их классификации.

Антиклинали. Изначально поиск месторождений углеводородов в Якутии был направлен на поиски антиклиналей. Первой структурой антиклинального типа в АМП стала Мокуйская структура, подготовленная в 1976-77гг сейсморазведкой. Последующий анализ показал, что структура является тектонически-экранированной (ТЭС) и находится в нижнепротерозойско-нижнерифейским структурном этаже, где ей соответствует Нижнемайский односторонний горст размером 15x50км, амплитудой 1500м (№4, рисунок 1, 2).

На южном склоне Якутско-Амгинского мегавыступа по поверхности кристаллического фундамента выделен локальный выступ фундамента названный Белькачинским. По данным сейсморазведки и потенциальных полей размеры сводовой части выступа, в изученной части, составляют 40 км x 40 км, площадь 1700 км² (№1, рисунок1). В восточной части Белькачинского выступа выявлены две крупные антиклинали: Билирская и Южно-Билирская с объединенной площадью 2736 км² (№2, рисунок1).

В пределах АМП, ниже по склону, по подошве вендских отложений выявлены Мильская антиклиналь, площадью 1097 км² и две другие, меньшей площадью (№3, рисунок1). В пределах этой части прогиба, помимо сейсморазведочных исследований проведены геохимические и

электроразведочные исследования, подтвердившие перспективность территории на выявление залежей УВ. По данным геохимического опробования вся, выше рассмотренная территория, перспективна на открытие, преимущественно, газовых залежей.

На северном погруженном склоне Омнинского блока Батомгско-Майского выступа, в рифейских отложениях была выявлена Даланская антиклиналь. Лахандинская скважина, в которой установлены нефтепроявления в малгинской свите находится в 35 км к востоку. Даланская структура разделяется на два свода и оконтуривается общей изогипсой -800м. Перспективная площадь составляет 2508 км², амплитуда - 200м. На севере, структура ограничена Дыгдинским валом (№7, рисунок 1).

Неантиклинальные структуры. В пределах Алдано-Майского прогиба выявлен ряд структур связываемых с НАЛ различных типов. В осадочном чехле Майского, Омнинского блоков Батомгско-Майского выступа фундамента, выявлена перспективная Майская зона, в которой установлены благоприятные структурно-литологические факторы для формирования НАЛ литофациального и тектонического ограничения коллекторов вверх по восстанию пластов, перекрытых флюидоупорами (№8, рисунок1). Площадь Майской зоны превышает 10 000 км². Для аимчанского резервуара среднего рифея прогнозируется литолого-тектонический контроль залежей УВ. Флюидоупором является аргиллитовая толща тоттинской свиты мощностью 1000м. Майской зоне в геоэлектрическом поле, по данным переинтерпретации данных магнитотеллурического зондирования (МТЗ), соответствует минимум проводимости осадочного чехла. Перспективность Майской зоны подтверждена нефтегазопроявлениями в трех из девяти колонковых скважин, пробуренных в восточной части Ингилийского выступа фундамента граничащего с Аимчанской НАЛ (№XI, рисунок1). Выше по разрезу залегают малгинские отложения, которые наряду с кавернозной зоной ципандинской свиты среднего рифея, представляют собой самостоятельные поисковые объекты по всей территории АМП. В северной части АМП выявлена полоса аномалий сейсмической записи вытянутая вдоль регионального склона протяженностью 60 км, отождествленная с прибрежной зоной малгинской свиты, с которой связываются Малгинская НАЛ стратиформного типа (№5, рисунок 1).

3. Обсуждение

Применение комплексирования является необходимым условием проведения региональных исследований на нефть и газ. Выявление в пределах структур геохимических и геоэлектрических аномалий связываемых с проявлениями УВ, присутствием в разрезе коллекторов и флюидоупоров, существенно увеличивает достоверность прогнозируемых объектов. При этом, проведение исследований различными методами необходимо проводить, по возможности, независимо друг от друга. Здесь на первый план выходят оценка применяемых методик и их возможностей.

4. Выводы

В пределах Алдано-Майского прогиба проведенными региональными исследованиями установлены структурно-тектонические, литолого-фациальные условия, благоприятные для формирования ловушек УВ различного типа от антиклиналей до неантиклинальных в рифейских и венд-кембрийских отложениях. Выполнение на части АМП, кроме сейсморазведочных работ, электроразведочных и геохимических исследований показало их эффективность и необходимость их применения на региональной стадии изучения новых территорий. Результаты бурения Лахандинской, Нижнеамгинской и Усть-Майской №366 скважин, подтверждают перспективы нефтегазоносности прогиба и Якутско-Амгинского мегавыступа. Выявленные локальные объекты рекомендуются для постановки поисковых работ и разведочного бурения. Готовятся публикации по названным объектам.

5. Благодарности

Автор выражает искреннюю признательность коллегам - А.М. Махорину, В.П. Белецкому, С.Ю. Севостьянову, Б.Д. Ковниру, А.К. Фаррахову, В.А. Дьяконовой, Т.И. Григорьевой, Р.Ш. Сюндюкову, всему коллективу Якутскгеофизики с 1981 по 2017гг, по результатам полевых исследований которой, получены представительные материалы для геологической интерпретации.

6. Литература

- [1] Berzin A.G., Obolkin A.P., Sevostyanov S.Yu., Egoshin A.A., Dyakonova V.A. New data on the geology of the Aldano-May trough. Domestic geology. – 2011. – No.6. – P. 21-26.
- [2] Obolkin A.P., Sevostyanov S.Yu., Grigorieva T.I., Dyakonova V.A., Farrakhov A.K. Structure and prospects of oil and gas potential of the Malginsky and Tottinskaya formations of the Kerpyl series of the Middle Riphean of the Aldano-May trough according to seismic data/ Black shales: geology, lithology, geochemistry, significance for the oil and gas complex, prospects for use as an alternative hydrocarbon raw materials: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference, July 23-25, 2015. editor Safronov A.F. Yakutsk, 2015 –P. 41-44
- [3] Obolkin A.P. Structures of the Aldano-May deflection according to seismic data. Geology and mineral resources of the North-East of Russia. Materials of the IX All-Russian Scientific and Practical Conference on April 10-12, 2019. IGAIBM, NEFU, AN RS(Ya), YAO RMO, Yakutsk, 2019. (t2) pp. 86-90.
- [4] Obolkin A.P. Construction of the surface of the crystalline basement of the north-eastern slope of the Aldan anticline based on the materials of the interpretation of geophysical fields /Physico-technical problems of extraction, transport and processing of organic raw materials in a cold climate [Electronic resource]: proceedings of the II All-Russian Conference (Yakutsk, September 9-11, 2019) / IGAIBM, Yakutsk, 2019. pp. 43-49.
- [5] Vorobyov V.N. Regularities of the placement of oil and gas deposits in the deposits of the Vendian-Cambrian terrigenous complex of the Siberian platform / In the book. : Oil and gas potential of Siberia and the Far East./ Novosibirsk / Nauka, 1981, pp. 48-54
- [6] Antsiferov A.S., Bakin V.E., Vorobyev V.N. et al. /Nepsko-Botuobinskaya anticline a new promising area of oil and gas production in the East of the USSR / Novosibirsk: Nauka, 1986, pp. 114-121

СТРУКТУРНО-ВЕЩЕСТВЕННАЯ 3D-МОДЕЛЬ РУДНОГО УЗЛА СЮЛЬДЮКАРСКОГО КИМБЕРЛИТОВОГО ПОЛЯ

Илья Овчинников, Петр Старостин
АК «АЛРОСА» (ПАО), 678175, Россия, г. Мирный, ул. Ленина, 6

STRUCTURAL-MATERIAL 3D-MODEL OF THE ORE NODE OF THE SYULDYUKAR KIMBERLITE FIELD

Iliya Ovchinnikov¹, Petr Starostin²
PJSC «ALROSA», 6, Lenin str., Mirny, 678175, Russia

Annotation. Currently, with the elaboration of mining and geological systems, a large number of new ways of processing geological information have appeared, including combining various directions in one information space. The joint-stock company ALROSA has developed a methodology for integrating geological and geophysical information by constructing a structural-material 3D-model of the Syuldyukar kimberlite node. The obtained result suggests a relatively high convergence of the obtained model with the actual position of the ore node.

1. Введение

С развитием горно-геологических информационных систем (ГИС) в горном деле наблюдается всеобщая тенденция к цифровой трансформации производственных процессов, что в свою очередь снижает время на обработку информации, обеспечивает полноту изучения месторождения и позволяет просчитывать десятки, а в некоторых случаях сотни различных сценариев развития горных работ. Однако, данные программные продукты применимы не только для горного дела, но и могут широко использоваться на стадии поисков и разведки месторождений полезных ископаемых.

В связи со сложностью поиска кимберлитовых тел сегодня предпринимаются попытки применения новых геофизических, геохимических методов, более современные минералогические и химические анализы индикаторных минералов кимберлитов. В то же время появляются и новые способы интерпретации геолого-геофизических данных. Так акционерной компанией «АЛРОСА» проведена разработка технологии трехмерного моделирования на основе структурно-вещественной 3D модели Сюльдюкарского кимберлитового узла в горно-геологической информационной системе (ГИС) Micromine. [1]

2. Основная информация об объекте

В качестве объекта для построения модели выбрана территория объекта Сюльдюкарский, площадью порядка 146 км². Исходными данными послужила информация по 669 скважинам, в том числе поисково-оценочным пройденным по кимберлитовому телу Т-54-14, включающая в себя: геологическую документацию, данные минералогического и геохимического опробования, результаты геофизического исследования скважин (ГИС) [2].

3. Построение трехмерной структурно-вещественной модели

Процесс создания практически всех цифровых моделей можно разделить на 4 этапа (Рисунок 1):



Рисунок 1 – Общая схема построения структурно вещественных моделей.

Первый этап в настоящий момент в АК «АЛРОСА» реализован путем внедрения информационной системы интеграции, хранения и обработки геолого-геофизической информации (ИСИХОГИ) [3]. Для использования этих данных при построении трехмерной модели потребовалось создание SQL-запросов к базе данных (БД) ИСИХОГИ и связей ODBC (Open Database Connectivity).

Данный подход позволяет оперативно получать информацию о местоположения точек наблюдения (скважины, горные выработки и пр.), результатам их опробования (минералогического, геохимического), информацию о геофизическом исследовании скважин. После консолидации всей необходимой информации потребовалось создание основных геологических элементов. Для выполнения данной задачи в ГГИС Micromine использовался модуль каркасного моделирования, а для более сложных геологических объектов, условного моделирования.

Первоочередно проведено построение цифровых моделей поверхностей (ЦМП) кровли ГИС-пластов на основе имеющейся геофизической информации, современного рельефа кимберлитовмещающего цоколя, рельеф местности и др.

Построение ГИС-пластов проведено с использованием данных интерпретации каротажных диаграмм сотрудниками Амакинской комплексной геофизической партии. За основу взяты глубины подсечения кровли пластов, в случае их отсутствия проведены расчеты согласно средней мощности ритмопачек [1]

После реконструирования кровли геофизических пластов [4] созданы их срезы поверхностью современного рельефа кимберлитовмещающего цоколя (Рисунок 2). Для создания трехмерных замкнутых каркасов (солоидов), проведена операция объединения поверхностей кровли и подошвы. В результате данных построений получена каркасная модель кимберлитовмещающего цоколя с разбивкой по ГИС-пластам.

Построение перекрывающих пород в техническом плане более сложное, ввиду отсутствия выдержанности мощностей и наличием пород трапповой формации, со сложным залегания во вмещающих верхнепалеозойских отложениях. Поэтому в данном случае применено условное моделирование каркасов, основанное на применении радиально-базисной функции (РБФ).

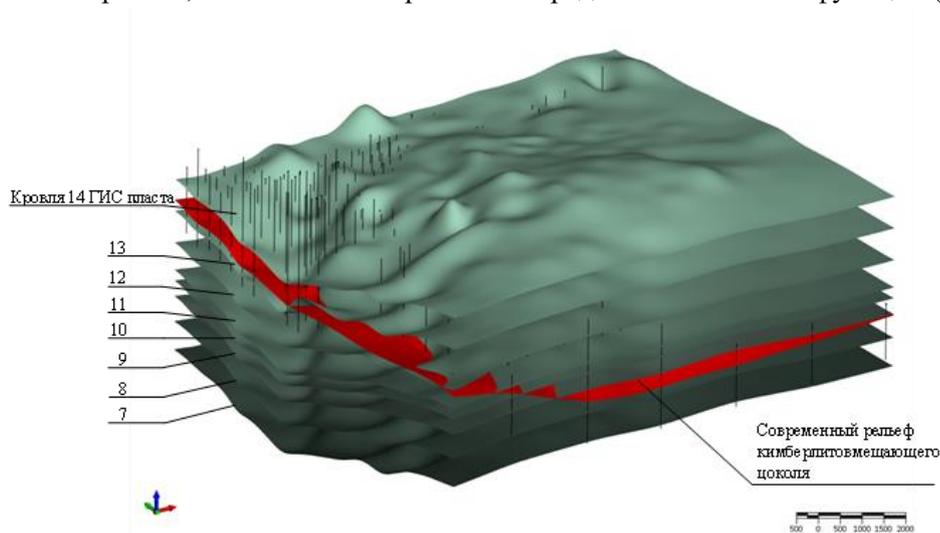


Рисунок 2 – Цифровые поверхности кровли геофизических пластов и современного рельефа кимберлитовмещающего цоколя.

РБФ – это метод интерполяции, используемый функциями Условного моделирования Micromine. В настоящий момент функции РБФ используют полигармонический и тонкий пластинчатый сплайн. Основа алгоритма РБФ – формат $Ax=b$. В самой простой форме каждая точка в наборе данных подвергается влиянию другой точки. Это означает, что матрица A может стать очень большой, а решение для (x) может быть очень длинным, или невозможным. Чтобы преодолеть ограничение, мы используем алгоритм разделения, который применяет РБФ на локальных участках/перекрытиях, а затем сливает их вместе.

Результатом каркасного моделирования является объемная каркасная модель, включающая в себя карбонатные породы (от 8 до 14 ГИС пластов), породы трапповой формации, туфы, терригенные отложения ботубинской свиты (по результатам палеогеографических построений), пермского (ахтарандинская и боруллойская свиты объединены) и четвертичного возраста. (Рисунок 3)

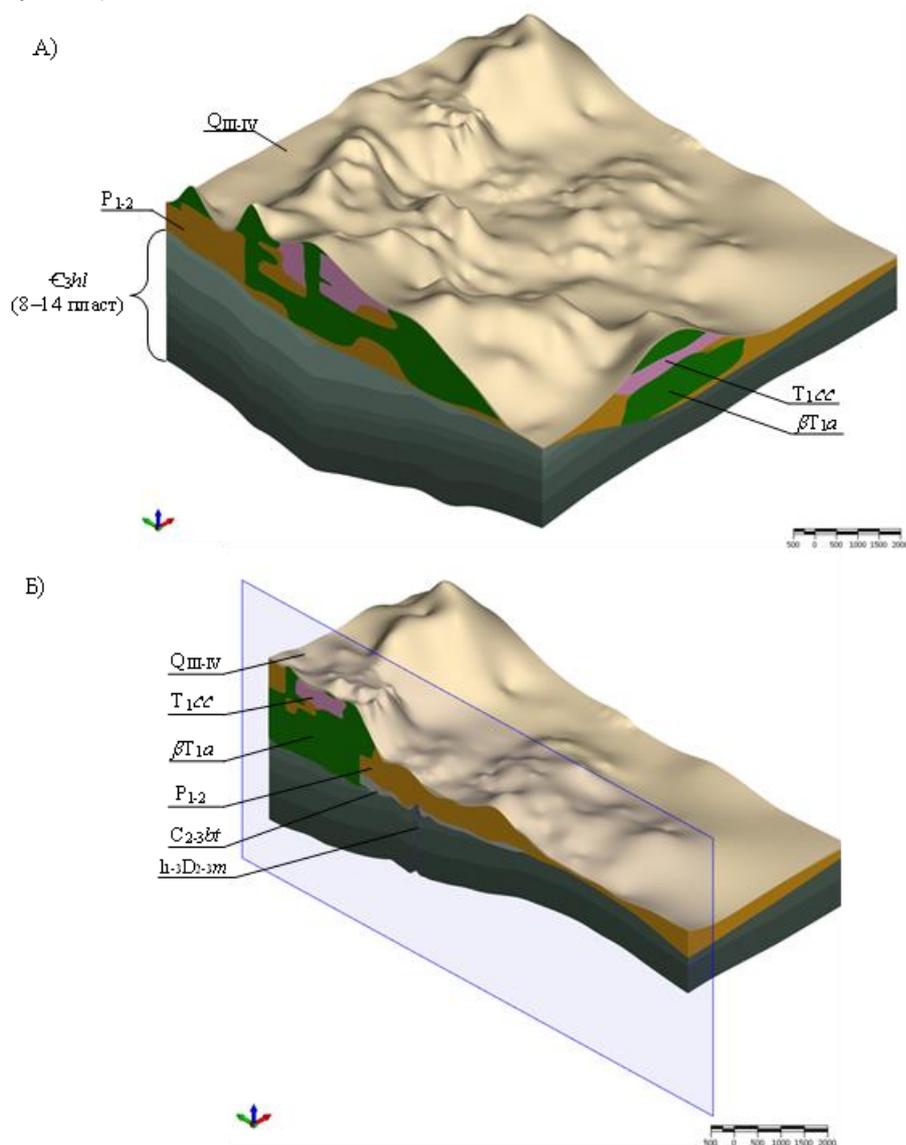


Рисунок 3 – Трехмерная каркасная модель Сюльдюкарского узла (А – общий вид модели в направлении на северо-восток; Б-меридиональный срез модели через кимберлитовое тело Т-54-14).

Каркасная модель без наполнения является лишь удобным инструментом визуализации информации, при этом в БД ИСХОГИ имеется информация по результатам минералогического и геохимического опробования, а также результаты ГИС. Эти данные можно не только визуализировать, но и поработать с ними в пространстве в блочной модели.

Блочная модель — это своего рода трехмерный грид (сеточная поверхность), у каждого блока есть размер и расположение в пространстве. Размер блоков выбирается специалистом произвольно. В случае модели Сюльдюкарского узла выбран размер блоков 40*40*2 м, обусловленный различной густотой сети бурения от 40*20 м (поисково-оценочные скважины по телу Т-54-14) до 2*2 км (поисково-картировочные скважины). Вертикальный размер блока - 2 метра, выбран исходя из отношения вертикального масштаба к горизонтальному на геологических разрезах по объекту.

Перед наполнением блочной модели проведен общий статистический анализ исходных данных для определения оптимального способа и параметров оценки блочных моделей.

Из методов ГИС гамма-картаж является более оптимальным для проведения статистического анализа. Выявлено, что радиоактивность имеет бимодальное распределение (первая выборка имеет медианное значение порядка 2,35 мкР/час, а вторая 9,6 мкР/час). Наличие двух контрастных выборок объясняется присутствием двух типов пород: магматических, представленных трапповой формацией с низкой радиоактивностью, и осадочных с повышенной радиоактивностью.

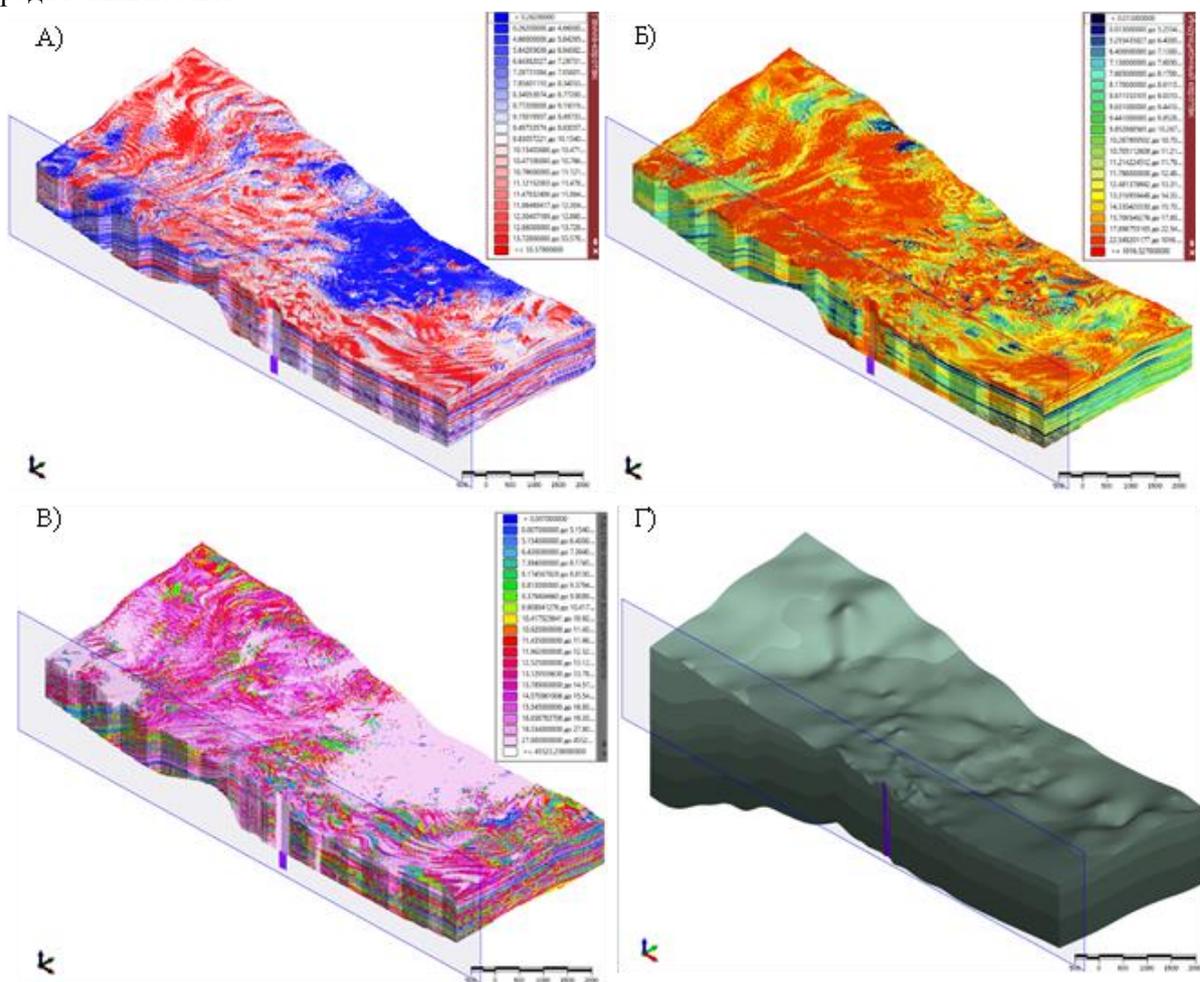


Рисунок 4 – Срезы моделей по линии запад-восток через кимберлитовое тело Т-54-14 (вид на северо-запад):

А- по гамма-картажу (ГК), Б-по индукционному картажу, В-по картажу магнитной восприимчивости (КМВ), Г-каркасная модель вмещающих пород

В построениях по вмещающим породам отражается геологическая информация, своего рода данные модели можно условно назвать пространственными физико-геологическими моделями (ФГМ), так модель по ГК и КМВ отражают территории залегания траппов на карбонатном цоколе, данные территории характеризуются высокими значениями магнитной восприимчивости более $500 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, в то же время значения радиоактивности менее 5 мкР/час. Кимберлитовое тело Т-54-14 также отчетливо выделяется в геофизических полях, однако одновременно с отличительными свойствами кимберлитов по отношению к карбонатным породам не маловажен факт более густой буровой сети, в результате которой интерполяция блоков отличается от других блоков модели. Для исключения данного фактора, в будущем планируется построить экспериментальные модели исключая поисково-оценочные скважины для проверки аномальности околотрубного пространства по данным ГИС.

Построение блочных геохимических моделей проведено по аналогичной методике, однако параметры построения отличаются от построений по ГИС ввиду того, что пробы отбираются с

интервалом 5 м. Поэтому для построений не использован структурный тренд, как при построении модели по данным ГИС, также изменено соотношение осей эллипса (1:1:0,01). В качестве примера построений по результатам геохимических данных приведены блочные модели по содержаниям некоторых оксидов (Рисунок 5). Примечательно, что по их содержаниям отчетливо выделяется 12 геофизический пласт, в котором отмечены наибольшие содержания кальция и магния, что объясняется преимущественно доломит-известковым составом пород.

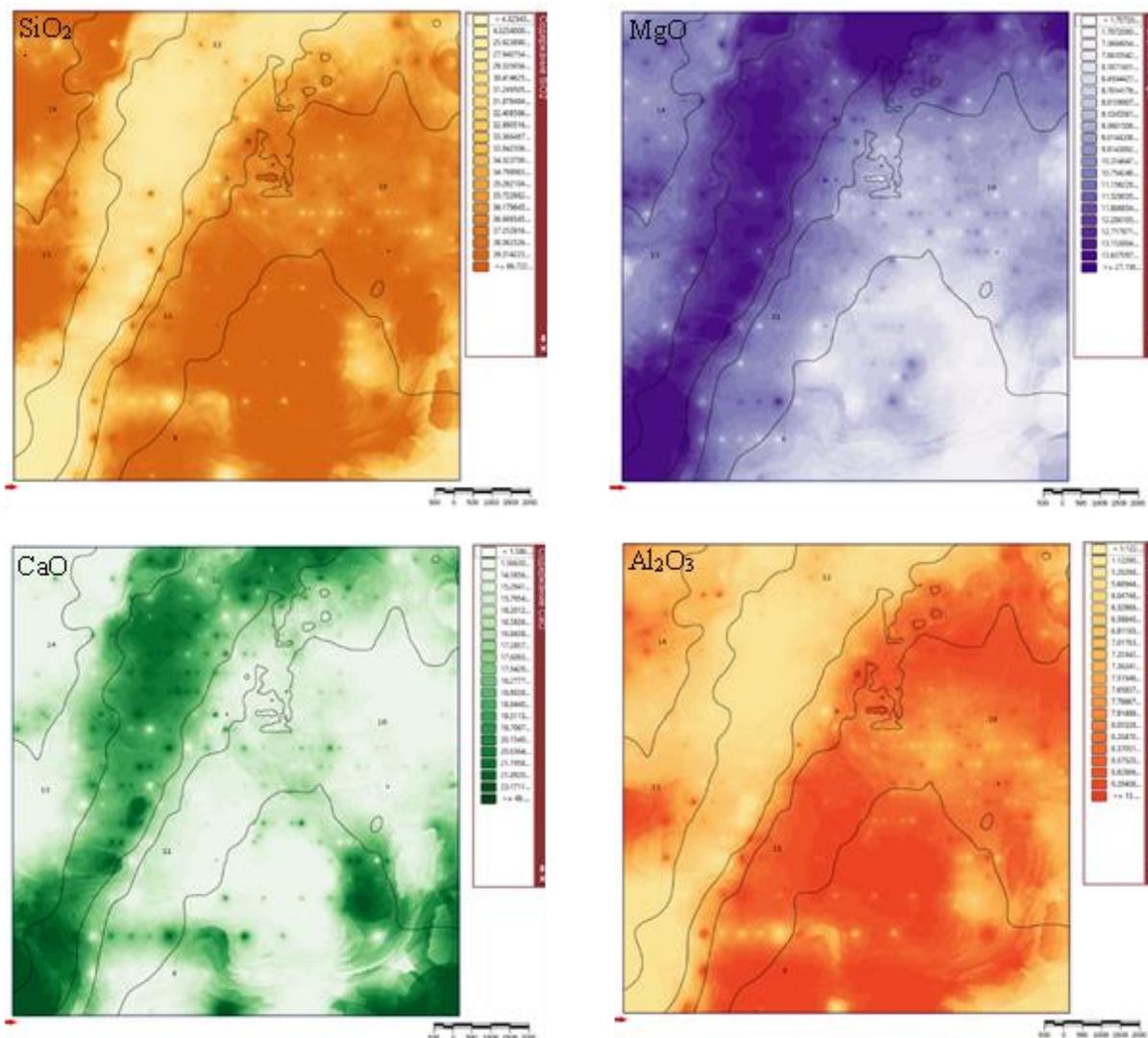


Рисунок 5 – Блочные модели карбонатного цоколя по результатам геохимического опробования. (вид в плане).

4. Выводы

3D модели как инструмент сбора и анализа данных, является сильно отличимым от традиционных двухмерных карт, при этом возможности данной методики более обширны. Кроме того, создавая модели на базе постоянно пополняющейся информации позволяет, оперативно пересчитывать ее параметры на основе обновленных данных. Однако, оперативность и правильность построения напрямую зависят от качества и единообразия исходных данных.

Методика объединения данных из разных сфер: геофизика, геология, геохимия в единое цифровое пространство открывает возможность создания комплексного прогноза в пределах рудных узлов, для выделения наиболее перспективных участков на обнаружение кимберлитовых тел.

5. Литература

- [1] Ovchinnikov, I. M., Tolstov A.V. New possibilities of processing geological and geophysical information on the example of the Syuldyukar kimberlite field (Yakutia) // Natural resources of the Arctic and Subarctic. – 2022. – Vol. 27, No. 3. – P. 335-345.
- [2] Malkov A.A., Report on the results of prospecting for diamonds within the limits of Syuldyukarskaya Square in 2015-2020. State Reg. No. 98-16-1120
- [3] Ratkov, S.C., Suslonov Yu.V. Structured storage of primary geological information for the possibility of operational involvement in analytical processing // Materials for VNPk Geology and mineral resources of the North-East of Russia. – Yakutsk, 2020. – P. 393-396.
- [4] Gorev N.I., Novopashin A.V., Gerasimchuk A.V., etc. A new technique for analyzing geophysical data in predictive prospecting studies in the Nakyn kimberlite field (Western Yakutia) // Science and Education. – 2016. – № 2(82). – P. 7-15.

ГЕНЕЗИС ПЛАТИНА-ХРОМИТОВОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ИНАГЛИНСКОГО МАССИВА АЛДАНСКОГО ЩИТА

Александр Округин

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

GENESIS OF PLATINUM-CHROMITE MINERALIZATION IN THE INAGLI MASSIF OF THE ALDAN SHIELD

Alexander Okrugin

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

Annotation. The Inagli dunite-peridotite-shonkinite zonal-ring intrusive with platinum-chromite mineralization is located on the Aldan shield of the Siberian Platform. Considering the structure, rock composition and ore mineralization, it is similar to the platinum-bearing zonal massifs of the Ural-Alaskan type of orogenic zone. Unlike the latter, this intrusive is located on the stable margin of the Siberian platform. In order to clarify the physical and chemical conditions of formation of the Inagli massif, the mineral composition of rocks, especially Cr-spinel-containing dunites, peridotites and shonkinites, as well as platinum-chromite ore segregations, has been studied in detail. In placers, dunites and chromitites of the Inagli massif, platinum group minerals (PGM) are mainly represented by isoferroplatinum. In isoferroplatinum, symplektitic iridium particles and small inclusions of osmium, laurite, ehrlichmanite, as well as other sulfides and arsenides of platinum group elements (PGE) are often observed. The forms of growths of these minerals indicate their formation during the decomposition of polycomponent solid solutions of PGE-Fe composition. Based on the analysis of combined double and triple diagrams of PGE-Fe systems, the author considers possible ways of evolution of phase transformations of alloys of different composition. The values of oxygen volatility ($\lg fO_2$) for dunites, peridotites, shonkinites, chromitites and olivine-chromite inclusions in the isoferroplatinum of the Inagli massif, calculated using the method of the olivine-chromespinel oxy-thermobarometer of Ballhaus-Berry-Green (BBG), form a single trend (FMQ+(2-4)) in the range 620-1140⁰C, i.e. along the band by 2-4 units of $\lg fO_2$ exceeding the fayalite-magnetite-quartz (FMQ) buffer. The results obtained almost completely coincide with the field of values for dunites and chromitites of the Platinum-bearing Belt of the Urals, given by other researchers. In terms of redox parameters, platinum-bearing zonal ultramafic-mafic massifs of the Ural-Alaskan and Aldanian types are close to more oxidized peridotites with a long history in the lithosphere.

1. Введение

Инаглинский массив является концентрически-зональным кольцевым массивом, состоящим из дунитового ядра, окаймленного последовательной серией перидотитов, пироксенитов и шонкинитов, и как хорошо известный Кондерский массив, относится к самостоятельному «алданскому» типу платиноносных месторождений [1]. Алданский тип кольцевых интрузий представляет собой платформенный аналог «урало-алаянских» зональных дунит-габбровых массивов орогенных областей. В данном сообщении с целью выявления конвергентных признаков этих двух различных типов платиноносных массивов приводятся минералогеохимические индикаторные характеристики платина-хромит-оливиновых парагенезисов. Состав минералов платиновой группы (МПГ) определялся на микрозондовом анализаторе Camebax-Micro, а их микроструктурные взаимоотношения изучались на сканирующем микроскопе JSM-6480LV JEOL в ИГАБМ СО РАН. Определение структуры и параметров элементарных решеток минералов проводились на установке УРС-0,3.

2. Парагенезис МПГ Инаглинского массива

Главным минералом платины, встречающимся в россыпи и в дунитах с хромитовой минерализацией, является изоферроплатина Pt_3Fe с упорядоченной кубической структурой. По данным микронзондового анализа содержание железа в изоферроплатине колеблется в основном в пределах 7-11 вес. % (20-30 ат. %) при максимуме в 25 ат. %. Характерной особенностью изоферроплатины является высокое содержание иридия до 8 % при среднем 2,9 вес. %. В матрице зерен изоферроплатины с повышенным содержанием Ir появляются мирмекитовые или эмульсионные продукты распада, представленные иридием. В некоторых зернах иридиевая фаза преобладает над изоферроплатиной и такие агрегаты состоят из иридия с мелкими включениями изоферроплатины. Редко встречаются мономинеральные иридиевые зерна. В отдельных зернах изоферроплатины отмечаются включения осмия, имеющие пластинчатые формы. Иногда наблюдаются трехфазные зерна, состоящие из сростков таблитчатых ламелл осмия, сцементированных иридий-изоферроплатиновым агрегатом (Рисунок 1, а).

Редкими МПГ являются тетраферроплатина, туламинит и хонгшиит, также встречаются самостоятельные зерна сперрилита, куперита и мертиита. Кроме вышеперечисленных минералов в изоферроплатине Инаглинской россыпи часто встречаются включения лаурита, эрлихманита, кашинита, миассита, маланита, купроиридсита и ирарсита (Рисунок 1, b, c), а также обнаружены мелкие фазы, содержащие As, Bi, Sb, Te, Sn, Pd, Au, точная диагностика которых затруднена. В сростании с МПГ и в форме включений установлены хромшпинелиды (44-62% Cr_2O_3), хромсодержащий (до 6% Cr_2O_3) диопсид, оливин ($Fe_{2.5}$), серпентин, флогопит, Ni-содержащий (до 5% NiO) вермикулит, КПШ, пектолит, апатит и не полностью диагностированные Ti-содержащие калиевые и кальциевые силикаты.

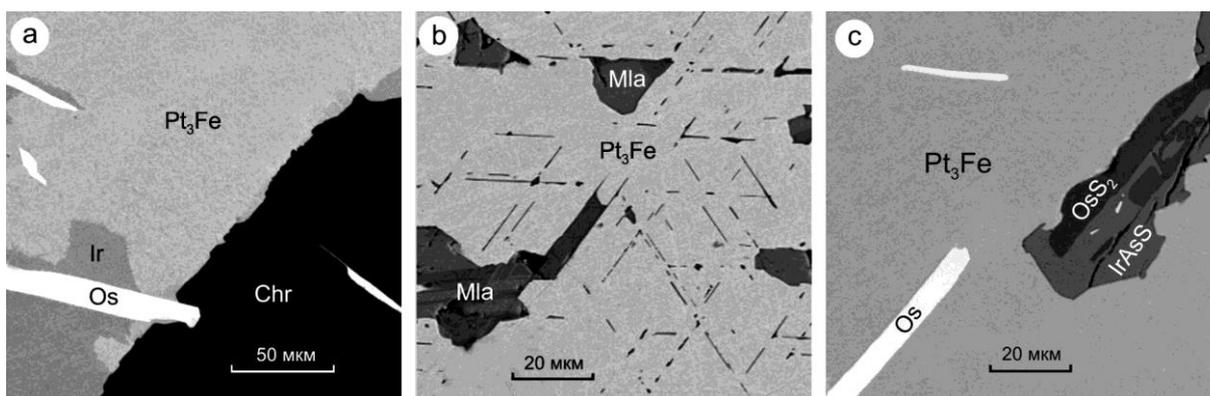


Рисунок 1 – Формы сростания МПГ и хромита. Минералы: Pt_3Fe – изоферроплатина; Ir – иридий; Os – осмий; Mla – маланит; OsS_2 – эрлихманит; IrAsS – ирарсит; Chr – хромит.

Структуры полифазных агрегатов МПГ подобны таковым искусственных сплавов, следовательно, первые также являются продуктами кристаллизации многокомпонентных металлических расплавов и последующих их твердофазовых превращений [2]. Пределы растворимости между элементами платиновой группы (ЭПГ) значительно различаются, поэтому в зависимости от исходного состава металлических сплавов могут формироваться как поликомпонентные твердые растворы, так и полиминеральные агрегаты. На основе анализа комбинированных двойных и тройных диаграмм ЭПГ-систем, автором рассматривается возможные пути эволюции фазовых превращений сплавов разного состава.

Из-за близости физико-химических свойств, ЭПГ образуют бинарные, тройные и многокомпонентные металлические сплавы, интерметаллические соединения, а также сульфидные, арсенидные и другие соединения с полуметаллами и металлами. Классификация МПГ приводится в работах L.Cabri с соавторами [3 и др.]. Здесь мною рассматриваются составы сосуществующих в тесных сростаниях МПГ на двух комбинированных тройных диаграммах $(Pt+Pd+Rh+Fe+Ni+Cu)-(Os+Ru)-Ir$ и $(Pt+Pd)-(Os+Ir+Ru+Rh)-(Fe+Ni+Cu)$. С целью

экономии места и для визуальной наглядности, тройные диаграммы построены в виде равнокатетных прямоугольных треугольников, совмещенных по гипотенузе (Рисунок 2).

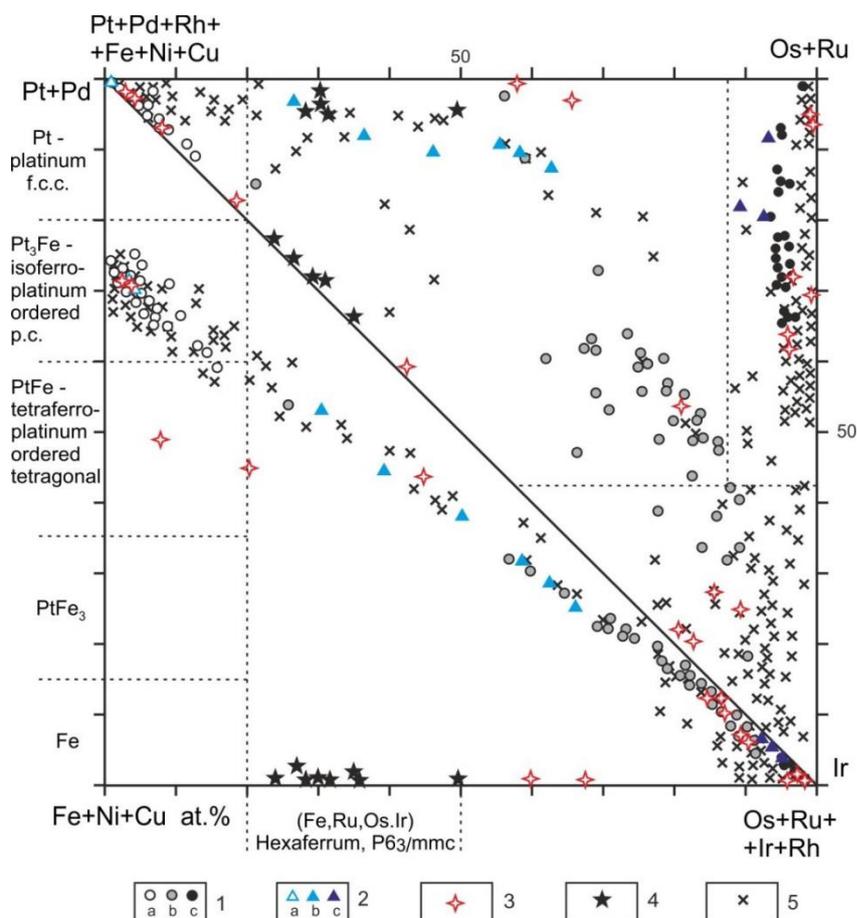


Рисунок 2 – Составы поликомпонентных МПГ.

1 – Инагли: а – изоферроплатина, b – Ir,Os,Ru,Pt,Fe сплавы, с – осмий; 2 – россыпи Гулинского массива [4]: а-с – то же и для 1; 3 – парагенезисы МПГ из хромититов зональных массивов Среднего Урала [5]; 4 – хромититы Чирынайского массива, Корякия [6]; 5 – минералы из россыпей Витватерсранд [7]. Пунктирные линии – границы некоторых простых сплавов.

Такой метод не только упрощает их построение, но и не нарушает принципа барицентричности трехкомпонентных составов, сохраняющих аффинное соответствие при любом изменении формы треугольника. На первой (правой верхней) диаграмме компоненты МПГ разделены на три группы: Os-Ru – высокотемпературные гексагональные сплавы, Ir – высокотемпературный кубический металл и (Pt,Pd,Rh,Fe...) – преимущественно платиновые сплавы. Кроме этих широко распространенных МПГ иногда встречаются многокомпонентные сплавы, состоящие из трех или более соизмеримых количеств металлов (Таблица 1). Они занимают обширную площадь в средней части диаграммы и соответственно вызывают трудности их классификации. Нижняя левая диаграмма построена в координатах (Pt+Pd), (Os+Ru+Ir+Rh) и (Fe+Ni+Cu), чтобы показать роль железа в формировании МПГ. Среди Fe-Pt природных неупорядоченных сплавов, выделяются интерметаллические соединения изоферроплатина Pt₃Fe и тетраферроплатина PtFe с упорядоченными структурами и узкими диапазонами состава. Как видно из диаграммы, по мере возрастания примесей ЭПГ в Fe-Pt сплавах железистость МПГ постепенно снижается и в высокотемпературных сплавах Os-Ru-Ir-Rh состава содержание Fe обычно ниже 5 ат. % и реже достигает 10%. В хромититах Чирынайского дунит-гарцбургитового комплекса Корякского нагорья были обнаружены сплавы (Fe,Ru), (Fe,Os) и (Fe,Ir), в составе которых Fe преобладает над ЭПГ в ат. %. В отличие от самородного железа с кубической структурой, эти твердые

растворы обладают гексагональной плотноупакованной структурой и были признаны как новый минерал – гексаферрум [6].

Генезис ЭПГ-сульфидных оруденений аргументированно объясняется очень высокой степенью распределения ЭПГ в отделяющуюся от магмы несмешивающуюся сульфидную жидкость. Но механизм появления платиновых металлов в хромититовых рудах в бедных серой мафит-ультрамафитовых породах с мизерным содержанием ЭПГ (обычно не более первых десятков мг/т) до сих пор вызывает острые дискуссии по генезису МПГ. Это осложняется ещё с очень высокими температурами кристаллизации ЭПГ от ~1500°C для Pd до ~3000°C Os и низкой растворимостью их в силикатном расплаве на ppb-уровне, что вызывает раннее выпадение ЭПГ из магмы в виде металлических микровыделений, так называемого эффекта “nuggets problem”. Поэтому многие исследователи склоняются к механизму гидротермально-метасоматической ремобилизации ЭПГ. Однако возможность такой экстракции металлов из пород с ppb-содержанием и образование в этих же породах самородков платины весом в несколько килограммов мне представляется весьма фантастической идеей, т.к. платиновое оруденение, в отличие от золотоносных месторождений, практически не выходит за пределы вмещающих комплексов, что свидетельствует об инертности ЭПГ к флюидной транспортировке.

Таблица 1 – Представительные анализы поликомпонентных сплавов ЭПГ, масс.%.

| Sample | Pt | Ir | Os | Ru | Rh | Pd | Fe | Ni | Cu | Total |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|--------|
| Инаглинский массив | | | | | | | | | | |
| 4/85 | 64,85 | 18,15 | 4,29 | 1,60 | 2,89 | 0,30 | 6,66 | 0,14 | 0,26 | 99,14 |
| 5/85 | 33,05 | 12,22 | 50,10 | 0,66 | 0,38 | 0,14 | 3,02 | 0,06 | 0,13 | 99,76 |
| 22/86 | 30,06 | 43,64 | 19,25 | 2,64 | 1,59 | 0,15 | 2,01 | 0,06 | 0,61 | 100,01 |
| 41-B | 35,20 | 2,80 | 55,03 | 1,53 | 0,42 | 0,05 | 3,19 | 0,14 | 0,32 | 98,68 |
| Гулинский массив [4] | | | | | | | | | | |
| 4 | 57,42 | 9,91 | 11,09 | 13,26 | 1,93 | - | 5,97 | - | - | 99,58 |
| 5 | 48,43 | 12,45 | 17,93 | 14,21 | 2,63 | - | 3,85 | 0,36 | - | 99,86 |
| 7 | 33,05 | 15,90 | 24,13 | 21,28 | 2,25 | - | 2,93 | 0,26 | - | 99,80 |
| Нижний Тагил, Кытлым, Урал [5] | | | | | | | | | | |
| 2-2 | 61,10 | 23,50 | - | 0,72 | 1,36 | - | 9,72 | 3,4 | 0,58 | 100,42 |
| 10-2 | 48,90 | 44,70 | - | 1,10 | 1,57 | - | 3,35 | - | 0,28 | 99,90 |
| 8-1 | 13,40 | 49,90 | 27,10 | 5,65 | 3,19 | - | 0,40 | - | - | 99,64 |
| Россыпь Витватерсранд [7] | | | | | | | | | | |
| 249 | 30,10 | 23,00 | 20,10 | 22,40 | 0,60 | - | 2,30 | - | - | 98,50 |
| F11 | 47,70 | 38,10 | 1,30 | 3,70 | 4,80 | - | 3,60 | 0,50 | - | 99,70 |
| F67 | 37,10 | 13,50 | 13,10 | 29,00 | 3,90 | - | 1,90 | 0,10 | 0,50 | 99,10 |
| F41 | 54,80 | 7,80 | 7,30 | 26,40 | - | - | 5,40 | 0,10 | - | 101,80 |

Простые расчеты показывают, что для ремобилизации 1 кг платины флюидные растворы должны полностью «промыть» около 100 000 т породы с содержанием Pt в 10 мг/т и практически тут же «высадить» в виде мелких самородков или даже одного крупного самородка в одну точку, без видимых на это каких-либо физико-химических причин. Следовательно, для сбора таких огромных количеств ЭПГ, извлеченных из крупных россыпей Урала и других регионов, оцениваемых десятками или даже сотнями тонн нужны несоизмеримые с масштабами потенциальных платиноносных массивов объемы исходной магмы. Это возможно, только при длительном эволюционном кристаллизационно-ликвационном разделении ЭПГ-хромититовых рудных сегрегаций, несущих МПГ, связанных с глубинными магматическими очагами огромных размеров.

В связи с этим мною была высказана альтернативная гипотеза [2], согласно которой при фракционной кристаллизации оливина в остаточном расплаве мафической магмы концентрируются ЭПГ и хром, т.к. оливин практически не принимает эти элементы в виде примеси. В результате такого отторжения формируются локальные микроучастки оксидно-рудной ионной жидкости, обогащенные ЭПГ и Cr₂O₃, т.к. хром наряду с кремнием является одним из металлов обладающих сильной связью с анионами кислорода. Такие рудные ликваты

не смешиваются с силикатной матрицей, состоящей из полимеризованного кремнекислородного скелета, и отделяются вначале в форме мелких капелек. Затем при их слипании формируются сегрегационные хромитовые обособления обогащенные ЭПГ. Наличие примесей Fe, Cu, легкоплавких и летучих элементов, таких как Sb, As, S и других существенно снижают температуры плавления платиновых металлов. Судя по высокому содержанию сульфидных и арсенидных минералов в сростаниях с МПГ (Рисунок 1), содержание легкоплавких элементов в первичных поликомпонентных металлических жидкостях было достаточно высоким и, вероятно, достигало нескольких процентов. Например, в системе Pt-S кристаллизация платины и куперита происходит при $T = 1240^{\circ}\text{C}$, а в системе Pt-As эвтектическая кристаллизация платины и сперрилита завершается при $T = 600^{\circ}\text{C}$.

3. Окситермометрия пород Инаглинского массива

Оценка редокс-состояния пород Инаглинского массива, проводилась автором по оливин-хромшпинелевому окситермометру Боллхауза-Берри-Грина (ББГ) [8]. Значения величин летучести кислорода ($\lg f\text{O}_2$), полученные для дунитов, перидотитов, шонкинитов, хромититов и оливин-хромитовых включений в изоферроплатине Инаглинского массива, укладываются вдоль единого тренда (FMQ+(2-4)) в интервале $620\text{-}1140^{\circ}\text{C}$ (Рисунок 3). Эта полоса на 2-4 единицы $\lg f\text{O}_2$ превышает буфер фаялит-магнетит-кварц FMQ и практически полностью соответствует данным по породам платиноносных массивов Урала [9].

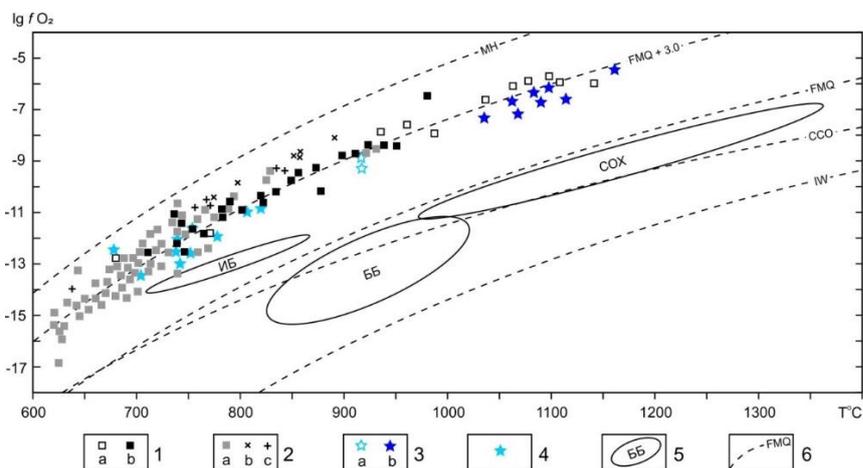


Рисунок 3 – Зависимость $\lg f\text{O}_2 - T$ для оливин-хромшпинель парагенезисов.

Инаглинский массив: 1 – в сростании с изоферроплатиной (а) и из хромититовых сегрегаций (б); 2 – дуниты (а), перидотиты (б) и шонкиниты (с). Платиноносные массивы Среднего Урала по [9]: 3 – дуниты (а) и хромититы (б) Нижнетагильского массива; 4 – дуниты Кытлымского массива. 5 – гарцбургиты и лерцолиты Бени-Бушера (ББ), срединно-океанических хребтов (СОХ) и преддужья Идзу-Бонин (ИБ) по [9]; 6 – буферные кривые магнетит-гематит (МН), фаялит-магнетит-кварц (FMQ), углерод-кислород-СО (ССО) и железо-вюстит (IW) при 1 ГПа.

При этом наблюдается закономерное снижение температурных интервалов для формирования оливин-хромитовых парагенезисов (в $^{\circ}\text{C}$): в ассоциации с изоферроплатиной – (1140-680); в хромититовых сегрегациях – (980-710); в дунитах – (930-620); перидотитах – (890-770) и шонкинитах – (840-710). Это подтверждает предположение автора о раннемагматической природе отделения и кристаллизации платина-хромититовых сегрегаций в дунитах.

По окислительно-восстановительным параметрам платиноносные зональные ультрамафит-мафитовые массивы урало-аляскинского и алданского типов близки более окисленным перидотитам с долгой историей в литосфере [10]. Они значительно отличаются от перидотитов сублитосферной мантии, в том числе графит и алмаз содержащих, например массива Бени-Бушера, а также перидотитов и базальтов срединно-океанических хребтов, формирующихся в восстановительных условиях в диапазоне между буферами FMQ, ССО и IW.

4. Выводы

Поликомпонентные твердые растворы ЭПГ, обнаруженные в россыпных и коренных месторождениях разных регионов являются первичными высокотемпературными протофазами, представляющими реликты отделения платиноидов от глубинных мафических магм. Несмотря на различные формационные принадлежности и геодинамические обстановки формирования исходных платиноносных магм они все характеризуются сложным составом, включающим все ЭПГ в разных пропорциях. В целом конечный валовый состав МПГ изменяется от высокотемпературных Os-Ru-Ir сплавов в офиолитовых комплексах через Ir-Pt-Fe ассоциации в зональных дунит-габброидных массивах урало-альпийского и алданского типов до Pt-Pd-Cu-Ni-сульфидных руд в габброидных дифференцированных интрузивах. Поликомпонентные твердые растворы Pt-Ir-Os-Ru-Rh-Fe сохраняются как высокотемпературные метастабильные фазы при быстрой консолидации вмещающих тел, а длительное становление массива приводит к распаду таких сплавов на простые составляющие с закономерно-ориентированной пластинчатой (видманштеттеновой) структурой, характерной для твердофазовых превращений. Это обусловлено высокими температурами кристаллизации ЭПГ, и для твердофазового распада поликомпонентных сплавов необходим длительный естественный отжиг, что может быть достигнуто при кристаллизации крупных зональных и дифференцированных массивов.

5. Благодарности

Работа выполнена по государственному заданию ИГАБМ СО РАН. Автор весьма благодарен коллегам, способствовавшим выполнению этой работы.

6. Литература

- [1] Rozhkov, I.S., Kitsul, V.I., Razin, L.V., Borishanskaya, S.S. Platinum of the Aldan Shield. – Moscow: Publishing House of Academy of Sciences USSR, 1962. – 119 p.
- [2] Okrugin, A.V. Origin of platinum-group minerals in mafic-ultramafic rocks: from dispersed elements to nuggets // *Canadian Mineralogist*. – 2011. – Vol. 49. – P. 1397-1412.
- [3] Cabri, L.J., Oberthur, T., Schumann, D. The mineralogy of Pt-Fe alloys and phase relations in the Pt-Fe binary system // *Canadian Mineralogist*. – 2022. – Vol. 60. – P. 1-9.
- [4] Malitch, K.N. Platinum-group elements in the clinopyroxenite-dunite massifs of the East Siberia (geochemistry, mineralogy, and genesis). – St. Petersburg: VSEGEI Press, 1999. – 296 p.
- [5] Stepanov, S.Y., Palamarchuk, R.S., Kozlov, A.V. et al. Morphology, composition, and ontogenesis of platinum-group minerals in chromitites of zoned clinopyroxenite-dunite massifs of the Middle Urals // *Russian Geology and Geophysics*. – 2020. – Vol. 61. – P. 47-67.
- [6] Mochalov, A.G., Dmitrenko, G.G., Rudashevsky, N.S., Zhernovsky, I.V., Boldyreva, M.M. Hexaferrum – (Fe, Ru), (Fe, Os), (Fe, Ir) – new mineral // *Zapiski VMO*, 1998, 5, pp. 41-51.
- [7] Feather, C.E. Mineralogy of platinum-group minerals in the Witwatersrand, South Africa // *Economic Geology*. – 1976. – Vol. 71. – P. 1399-1428.
- [8] Ballhaus, C., Berry, R., Green, D. High pressure experimental calibration of the olivine-orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer: implication for the oxidation state of the upper mantle // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 1991. – Vol. 107. – P. 27-40.
- [9] Chashukhin, I.S., Votyakov, S.L., Pushkarev, E.V., et al. Oxythermobarometry of ultramafic platinum-bearing belt of the Urals // *Geochemistry*. – 2002. – 8. – P. 846-863.
- [10] Frost, D.J., McCammon, C.A. The redox state of Earth's mantle // *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* – 2008. – Vol. 36. – P. 389-420.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ КИМБЕРЛИТОВЫХ ТРУБОК МОЛОДИНСКОГО ПОЛЯ

Николай Опарин¹, Махмутьян Мухамедьяров², Олег Олейников¹, Виктория Корнилова¹

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 корп. 3

GEOLOGICAL STRUCTURE AND MATERIAL COMPOSITION OF KIMBERLITE PIPES OF MOLODINSKY FIELD

Nikolay Oparin¹, Makhmutian Mukhamediarov², Oleg Oleinikov¹, Viktoriya Kornilova¹

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 st., Yakutsk, 677004, Russia

Annotation. This paper presents the results of studies of the material composition and structure of pipes 36/89 and 75/90 of the Middle Mesozoic Molodinsky kimberlite field. For the first time for the pipes of the Yakutian kimberlite province it was established that the upper horizons of the diatremes are composed of kimberlite tuff breccia, formed by the intrusion of partially crystallized kimberlite substrate in the sandy water-saturated slice.

1. Введение

Среднемезозойское [1] Молодинское кимберлитовое поле расположено в северо-восточной части Якутской кимберлитовой провинции. В настоящей работе на примере двух трубок 36/89 и 75/90 рассматривается вещественное строение кимберлитовых тел, сложенных необычными, исходя из петрографических особенностей, туфобрекчиями.

2. Особенности строения кимберлитовых трубок

Кимберлитовые трубки 36/89 и 75/90 расположены в пределах поля развития карбонатных пород нижнего кембрия и перекрыты четвертичными отложениями мощностью до 5 м. Слой, перекрывающий трубки, представляет собой щебнисто-глыбовые обломки известняков, погруженные в илесто-глинистую массу, над которыми располагается почвенно-растительный слой мощностью до 0,5 м. По геофизическим данным трубки в плане имеют форму овала. Размеры трубок 75/90 и 36/89 составляют 43×65 м и 30×25 м, соответственно. В силу небольшого количества заверочных скважин детализировать форму верхней части трубки 75/90 невозможно. Предположительно, это конусообразное тело. В трубке 36/89 часть скважин на глубинах 22, 63 и 70 м пересекла контакт кимберлитовых пород с вмещающими карбонатными породами, в результате чего была определена ее воронкообразная форма (Рисунок 1.).

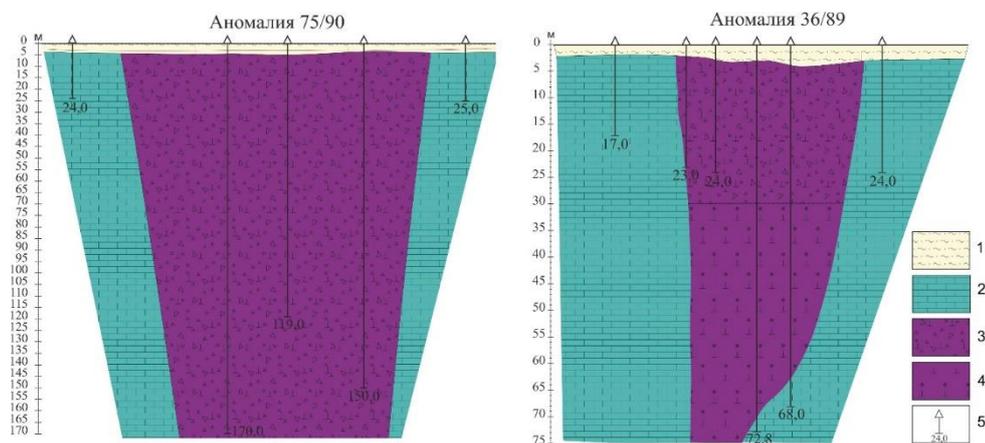


Рисунок 1 – Геологические разрезы трубок 75/90 и 36/89: 1 – четвертичные отложения, 2 – вмещающие

породы нижнего кембрия, 3 – кимберлитовая туфобрекчия, 4 – кимберлитовая брекчия, 5 – буровые скважины.

Трубка 36/89 вскрыта на глубину до 72,8 м, а 75/90 до 170 м от дневной поверхности. В этих интервалах диатремы сложены либо кимберлитовой туфобрекчией (трубка 75/90), либо кимберлитовыми брекчией и туфобрекчией (трубка 36/89) [2].

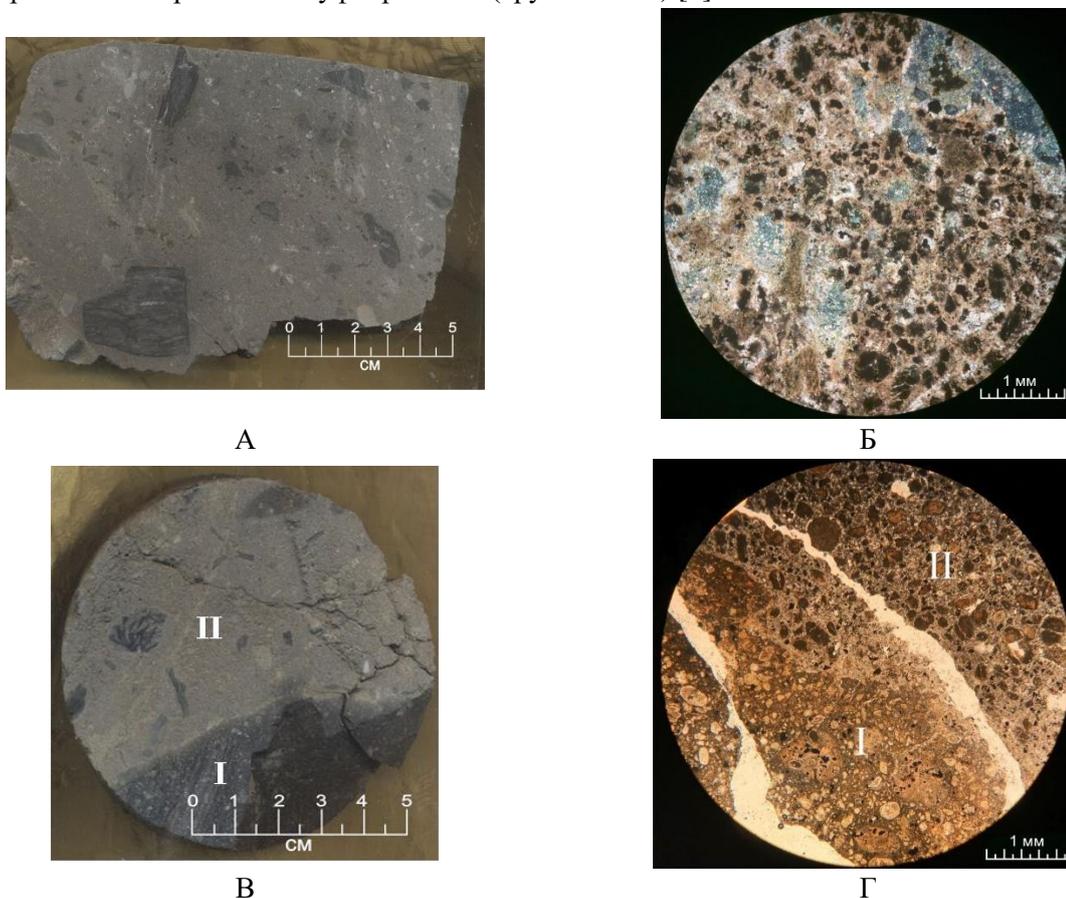


Рисунок 2 – Кимберлитовые брекчии нижних горизонтов трубки 36/89:

А – Кимберлитовая брекчия, текстура массивная, структура порфировая. Глубина 58,6 м.

Б – Мелкопорфировая структура кимберлитовой брекчии. Николи скрещены. Глубина 58,6 м.

В – Кимберлитовая брекчия (II) с обломком кимберлитовой туфобрекчии (I) ранней фазы внедрения. Глубина 55,8 м.

Г – Мелкопорфировая основная масса кимберлитовой брекчии (II), вмещающей обломок кимберлитовой туфобрекчии (I) ранней фазы внедрения, рассеченная прожилками кальцита. Николи параллельны. Глубина 55,8 м.

В строении *трубки 36/89* принимают участие три разновидности кимберлитовых пород. Верхняя часть диатремы до глубины 30 м выполнена кимберлитовой туфобрекчией. Ниже присутствует кимберлитовая брекчия. Характер границы между этими типами пород, ввиду отсутствия образцов с их непосредственным контактом, установить не удалось. На интервале 55,2-66,7 м брекчия содержит обломки кимберлитовых туфобрекчий ранней фазы внедрения (Рисунок 2, В, Г).

Нижние горизонты трубки 36/89 (30-72,8 м) сложены кимберлитовыми брекчиями серого, буровато-серого и зеленовато-серого цвета. Количество ксенолитов осадочных пород составляет 7-15 % (Рисунок 2, А). Среди обломков величиной до 4 см присутствуют серые и темно-серые известняки, мергели и битуминозные сланцы. Форма крупных обломков угловатая, мелких – угловатая, или округлая. Кроме того, на интервале глубин 55-66,7 м среди ксенолитов также присутствуют темно-серые обломки неправильной формы туфобрекчий

ранних фаз внедрения, величиной до 7 см (Рисунок 2, В, Г). Количество таких обломков неравномерное и составляет 30-50 %.

Кимберлитовые брекчии имеют массивную текстуру и мелкопорфировую структуру (Рисунок 2, Б). Содержание порфировых выделений составляет 35-50 %. Порфировые выделения представлены полными псевдоморфозами серпентина по оливину, которые также частично замещаются карбонатом и редкими таблицами флогопита. Отдельные псевдоморфозы полностью выполнены минералами группы смектита. Величина вкрапленников 0,1-1 мм и только единичные имеют размеры 2-3 мм. Форма вкрапленников преимущественно овальная. По периферии псевдоморфоз, сложенных серпентином, отмечаются тонкие каемки карбоната.

Основная масса породы состоит из ксеноморфных выделений кальцита размером до 100 мкм (30-35 %), серпентина и заместивших его минералов группы смектита (10 %), окисно-рудных минералов (2-3 %), мелких табличек барийсодержащего флогопита (0,5-1 %) и редких субизометричных зерен стронциевого фторапатита. Серпентин, флогопит и микрокристаллы окисно-рудных минералов имеют тенденцию к концентрации вокруг порфировых выделений, а на удалении от них присутствует мелко- и среднезернистый карбонат, что обуславливает неоднородную структуру основной массы. Среди окисно-рудных минералов установлены титаномагнетит, феррошпинель, хромшпинелид, ильменит и перовскит. Титаномагнетит, феррошпинель и хромшпинелид установлены в виде монокристаллов или сростков в ядрах полиминеральных атоллоидных выделений (до 150 мкм) и окружены серпентином. Форма этих агрегатов подчеркнута каймой из магнетита или оксида титана. Содержание оксида хрома в хромшпинелидах, в целом, не превышает 38,7 %, в единичных случаях достигая 63,17 %. Ильменит образует бесформенные выделения. Перовскит присутствует в виде изометричных, резорбированных кристаллов.

Верхние горизонты диатремы до глубины 30 м, а также обломки пород в составе кимберлитовой брекчии в интервале глубин 55,2-66,7 м сложены однотипными туфобрекчиями серого цвета. В них присутствуют ксенолиты осадочных (2-10 %) пород размером до 2 см, обломки мелкопорфировых кимберлитов (10-30 %) размером до 10 см, дискретные псевдоморфозы по вкрапленникам оливина (5-7 %), выполненные карбонатом или карбонатом и серпентином, а также пластинки флогопита и единичные зерна ильменита. Среди угловатых ксеногенных зерен (15-30 %), размер которых не превышает 1 мм, установлены кварц, альбит, ортоклаз, амфибол, редкие мелкие зерна эпидота и сфена. Текстура пород верхних уровней диатремы неоднородная, что обусловлено присутствием в туфобрекчиях редких, субизометричных обломков кимберлита, со сглаженными очертаниями, размером от долей мм до 10 см, по составу и текстурно-структурным особенностям идентичных кимберлитовым брекчиям нижележащих горизонтов. Одиночные псевдоморфозы по порфировым вкрапленникам оливина и единичные таблички флогопита, размер которых не превышает 0,1-0,2 мм, присутствуют как в кимберлитовых фрагментах, так в связующей массе туфобрекчии. Псевдоморфозы выполнены серпентином, смектитом или кальцитом по идиоморфному оливину. Основная масса обломков кимберлита имеет мелкопорфировую структуру и состоит из микрозернистого карбоната и редких микрокристаллов непрозрачного рудного минерала. Обломочный материал в туфобрекчии располагается в тонкозернистой связующей массе глинисто-карбонатного либо серпентин-глинисто-карбонатного состава. На близповерхностных горизонтах (до 1-2 м от поверхности диатремы) в результате процессов постмагматической карбонатизации в туфобрекчии сохранились только лейкократовые минералы, погруженные в связующую массу, представленную крупнозернистым кальцитом, поэтому порода утратила свои первичные текстурно-структурные признаки (Рисунок 3).

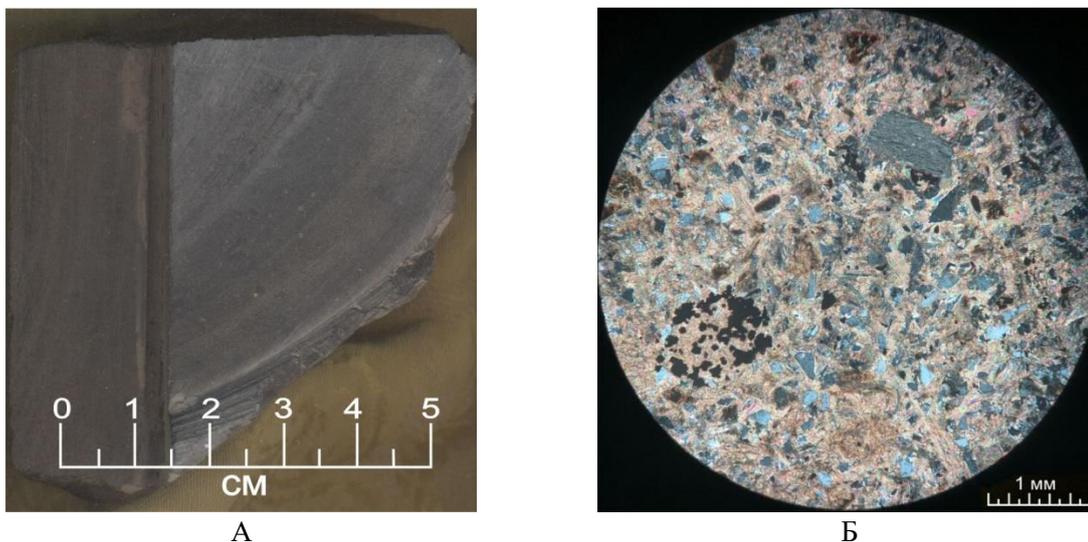


Рисунок 3 – Кимберлитовая туфобрекчия верхних горизонтов трубки 36/89, глубина 5,4 м.
 А – Мелкообломочная кимберлитовая туфобрекчия с утраченными первичными текстурно-структурными признаками.
 Б – Связующая масса кимберлитовой туфобрекчии, выполненная крупнозернистым кальцитом. Структура мелкообломочная. Николи скрещены.

Трубка 75/90 сложена карбонатизированной и гипергенно измененной кимберлитовой туфобрекчией.

Нижние горизонты диатремы (85-145 м от дневной поверхности) сложены карбонатизированной кимберлитовой туфобрекчией, наименее подвергшейся гипергенным изменениям. Текстура породы брекчиевая, неоднородная (Рисунок 4, А), обусловленная неравномерным распределением обломков мелкопорфировых кимберлитов. Общее количество кимберлитовых фрагментов составляет 20-30 %, но иногда падает до первых процентов. Ксенолиты осадочных пород (до 7 %) имеют размер 0,5-1,5 см и плавные очертания. В туфобрекчии присутствуют обломки зерен (30 %) кварца, мусковита, биотита, альбита, ортоклаза и амфибола размером от 0,02 до 0,4 мм. Угловатые фрагменты порфировых кимберлитов (до 1 см) и овальные псевдоморфозы по оливину размером от 0,2 до 1 мм нацело карбонатизированы (Рисунок 4, Б). Связующая масса кимберлитовой туфобрекчии нижних уровней кальцитовая криптозернистая и выполняет интерстиции между многочисленными обломками пород и ксенозерен лейкократовых минералов размером до 300 мкм. Основная масса кимберлитовых обломков криптозернистая и также сложена кальцитом.

Для кимберлитовых туфобрекчий, залегающих на глубине до 85 м от дневной поверхности характерна брекчиевая текстура, обусловленная присутствием около 10% ксенолитов известняков, глинистых и битуминозных сланцев как угловатой, так и овализированной формы (Рисунок 4, В). Размер обломков не превышает 1,5 см. Туфобрекчия содержит неравномерно распределённые ксенозерна кварца, альбита, ортоклаза, амфибола, мусковита и биотита количестве не более 10 %.

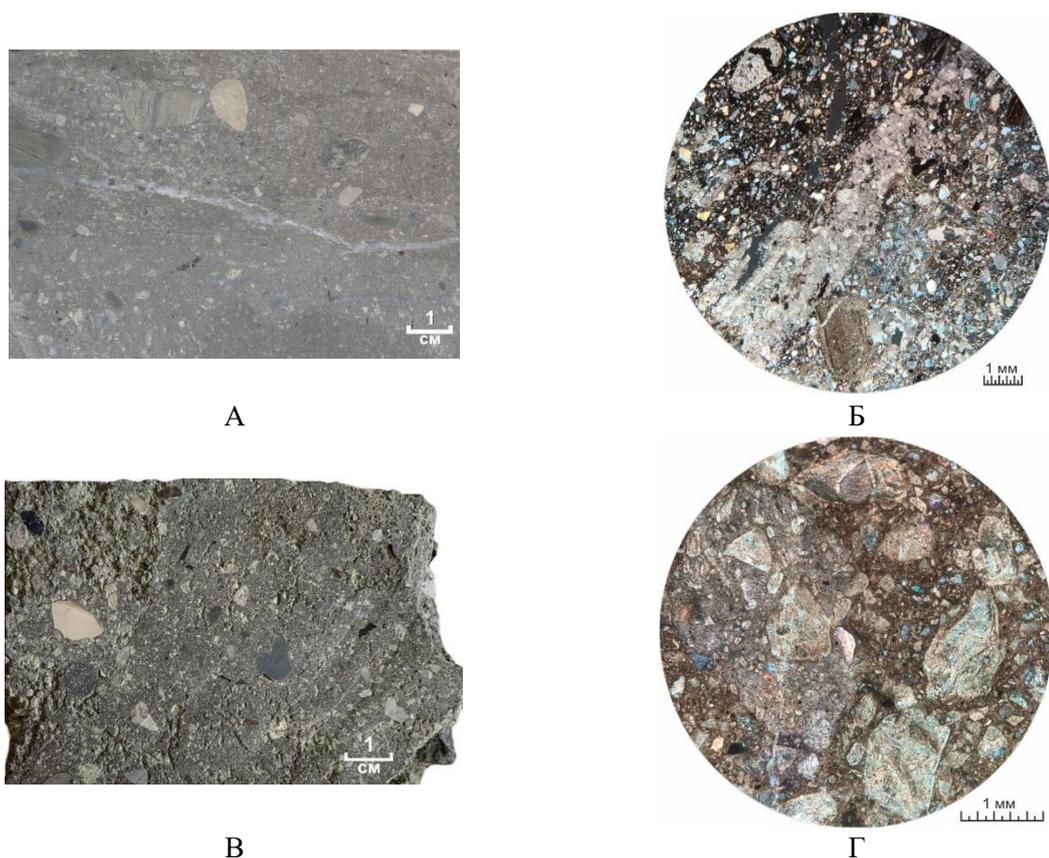


Рисунок 4 – Кимберлитовые туфобрекчии трубки 75/90:

А – Кимберлитовая туфобрекчия, текстура брекчиевая, структура неоднородная. Глубина 145,7 м.

Б – Нацело карбонатизированные овализированные обломки порфировых кимберлитов, псевдоморфозы по оливину и обломки лейкократовых минералов, погруженные в глинисто-карбонатную связующую массу. Николи скрещены. Глубина 145,7 м.

В – Выветрелая кимберлитовая туфобрекчия, с брекчиевой текстурой. Глубина 24 м.

Г – Обломки порфировых кимберлитов и псевдоморфозы по оливину частично выполнены смектитом и карбонатом. Связующая масса смектит карбонатного состава. Николи скрещены. Глубина 145,7 м.

В туфобрекчиях верхних уровней также присутствуют неравномерно распределенные обломки мелкопорфировых кимберлитов размером до 1 см, псевдоморфозы по оливину и вкрапленники флогопита (Рисунок 4, Г). Форма псевдоморфоз угловатая реже идиоморфная. Псевдоморфозы, основная масса порфировых кимберлитов и связующая масса туфобрекчий выполнены карбонатом и минералами группы смектита. В целом, количество обломочного материала, составы основной и связующей массы пород верхних и нижних горизонтов идентичны, а основное отличие заключается в меньшем объеме этапа постмагматической карбонатизации, не затронувшей верхние блоки диатремы.

3. Выводы

Проведенные исследования особенностей вещественного строения трубок 36/89 и 75/90 Молодинского поля позволяют утверждать, что верхние горизонты тел сложены кимберлитовой туфобрекчией, а нижние - кимберлитовыми брекчиями. Появление таких необычных кимберлитовых пород связано с внедрением кимберлитового расплава в водонасыщенные песчаные отложения, что приводило к взрывным процессам. Возможно, это были отложения изолированных водоемов. При внедрении происходило фрагментирование частично раскристаллизованного кимберлитового субстрата и захват многочисленных зерен песка. Ввиду того, что туфобрекчии интенсивно карбонатизированы и гипергенно изменены установить присутствие стекловатого материала в связующей массе и кимберлитовых фрагментах не представляется возможным. Форма обломков мелкопорфировой кимберлитовой брекчии и присутствие в составе породы дискретных псевдоморфоз по оливину

свидетельствует о раскристаллизованности поднимающегося фронтального материала. Исходя из количества ксеногенных зерен лейкократовых минералов, можно предположить, что мощность нелифитированных песчаных отложений, в которые внедрялся расплав, составляла не менее 10-15 м. Присутствие туфобрекчий может свидетельствовать о сравнительно небольшом эрозионном срезе исследуемых тел.

Мощности блоков, сложенных кимберлитовой туфобрекчией индивидуальны для каждой из исследуемых трубок: в 75/90 - более 170 м, а в 36/89 – 30 м. Такие различия можно объяснить разновеликими мощностями песчаных отложений водоемов, в которые происходило внедрение кимберлитового расплава. Данные породы не являются эпикластическим кимберлитом, как, например, кратерные отложения в трубках Орапа и Мвадуи [3], а образовались в процессе внедрения, после чего были карбонатизированы.

Для трубки 36/89 можно предположить два этапа формирования. На первом этапе происходило образование кимберлитовых туфобрекчий. На втором этапе кимберлитовый расплав брекчировал туфобрекчии первой фазы с образованием кимберлитовой брекчии, содержащей фрагменты туфобрекчий.

Проведенное исследование позволило установить новый для Якутской кимберлитовой провинции тип пород.

4. Благодарности

Работа выполнена по государственному заданию ИГАБМ СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект НИР 0381-2019-003.

5. Литература

- [1] Zajcev A.I., Smelov A.P. Isotopic geochronology of kimberlite formation rocks of the Yakutian province. – Yakutsk: Ofset, 2010. – 108 p.
- [2] Kornilova V.P., Nikishov K.N., Kovalski V.V., Zolnikov G.V. Atlas of textures and structures of kimberlite rocks. – Moscow: Nauka, 1983. – 157 pp.
- [3] Hawthorne J. B. Model of a kimberlite pipe // *Physics and Chemistry of the Earth*. – 1975. – Vol. 9. – P. 1-15.

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИНДИКАТОРНЫХ МИНЕРАЛОВ КИМБЕРЛИТОВ МОЛОДИНСКОГО И ТОЛУОПСКОГО ПОЛЕЙ

Мария Ощепкова¹, Махмутян Мухамедьяров², Олег Олейников¹

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

2 АО «Алмазы Анабара», 677027, Россия, г. Якутск, ул. Кирова, 18, блок Б

MORPHOLOGICAL FEATURES OF KIMBERLITE INDICATOR MINERALS OF MOLODINSKY AND TOLUOPSKY FIELDS

Mariya Oshchepkova¹, Makhmutyan Mukhamedyarov², Oleg Oleinikov¹

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

2 «Almazы Anabara» JSC, block B, 18, Kirov st., Yakutsk, 677027, Russia

Annotation. The paper presents the results of the study of morphological features of indicator minerals from eluvial-deluvial deposits and kimberlite rocks of the upper horizons of Molodinsky and Toluopsky fields. Pyrope and chromspinelide grains from kimberlite anomalies of the Middle Mesozoic Molodinsky field are characterized by the relief of magmatic genesis, as well as the surface of the postmagmatic dissolution in the form of a pyramidal relief. Surface of minerals from eluvial-deluvial deposits of the Middle Paleozoic Toluopsky kimberlite field are presented by relief of hypergenic dissolution formed in the acidic environment of the Middle Paleozoic weathering crust.

1. Введение

В целях оценки потенциальной алмазоносности кимберлитовых полей исследуются состав и морфология зерен пиропы, пикроильменита и хромшпинелида. Если химический состав минералов определяет их глубинный парагенезис и потенциальную алмазоносность объектов опробования, то морфология зерен позволяет расшифровать эндогенную и экзогенную историю зерен. На их поверхности отпечатываются процессы магматического этапа, химического выветривания и механического износа [1]. В работе представлены результаты исследования морфологических особенностей зерен пиропы, пикроильменита и хромшпинелида из коренных кимберлитовых пород верхних горизонтов аномалий и из сформированных ими элювиально-делювиальных отложений. Все тела расположены в пределах Молодинского и Толуопского кимберлитовых полей. Фотографии поверхностей зерен пиропы, пикроильменита и хромшпинелида получены при помощи электронного сканирующего микроскопа JEOL JSM-6480LV, ИГАБМ СО РАН, г. Якутск.

2. Результаты исследования

Молодинское кимберлитовое поле расположено в северо-восточной части Сибирской платформы, на юго-западном склоне Оленекского поднятия, преимущественно в бассейне р. Молодо – левого притока р. Лена. Молодинское поле имеет среднемезозойский возраст, на востоке граничит со среднепалеозойским Толуопским кимберлитовым полем [2]. В последние годы компанией «Алмазы Анабара» опробовано около 15 кимберлитовых аномалий в пределах Молодинского поля и одно тело в Толуопском. Изученные зерна отобраны из элювиально-делювиальных отложений и пород верхних горизонтов (0-4 м) кимберлитовых аномалий, вскрытых скважинами.

Гранаты

Цвет гранатов из кимберлитовых пород аномалий Молодинского поля варьирует от оранжевого до насыщенно фиолетового (лилового) цвета. Форма зерен гранатов в основном округло-овальная. В большинстве случаев вокруг минерала присутствует келифитовая оболочка преимущественно флогопитового состава, толщиной до 1 мм. Келифитовая кайма представлена в виде радиально-лучистого агрегата (Рисунок 1а), либо образует тонкое конформное покрытие

из псевдогексагональных чешуек флогопита (Рисунок 1б). Зерна с удаленной келифитовой каймой имеют «шагреневую» поверхность (Рисунок 2а). В меньшем количестве встречаются зерна с оплавленной и пологоволнистой поверхностью. Перечисленные особенности морфологии образуются на этапе глубинного (магматического) морфогенеза пиропов в кимберлите [1].

У гранатов из элювиально-делювиальных отложений аномалий Молодинского поля келифитовая кайма отсутствует. Для них характерны: рельеф магматического генезиса и шероховатая поверхность. В отдельных аномалиях у зерен наблюдается пирамидально-черепитчатый рельеф (Рисунок 2б), обусловленный постмагматическим растворением пиропов [1].

Гранаты из элювиально-делювиальных отложений аномалии Толоупского поля по составу относятся к коровым и состоят на 2/3 из алмандинового компонента. Для этих зерен характерен каплевидный рельеф кубоидного типа растворения (Рисунок 3а) и дислокационный тип растворения с множеством каналов травления (Рисунок 3б). Данные типы рельефа образуются при растворении зерен во время длительного пребывания в гипергенных условиях, характерных для среднепалеозойской коры выветривания. По данным ранних исследований кора выветривания на кимберлитовых телах Якутии была сформирована в латеритных условиях в позднем девоне [1; 3].

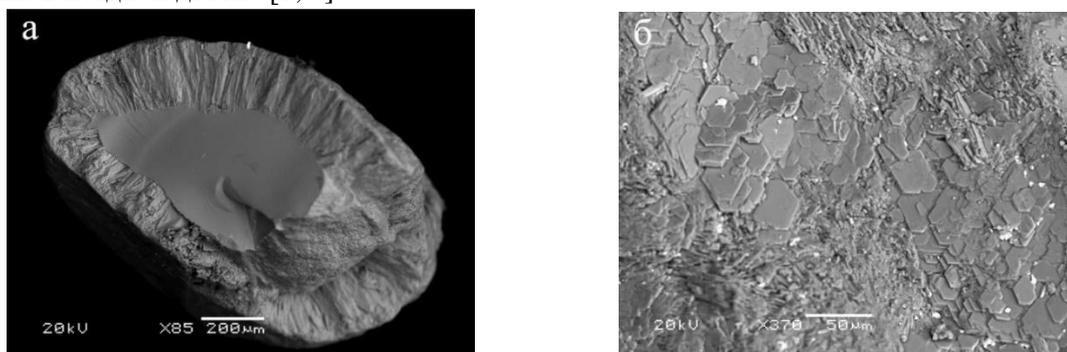


Рисунок 1 – Виды келифитовых кайм: а - келифитовая кайма радиально-лучистого строения; б - фрагмент поверхности граната с конформным покрытием псевдогексагональными пластинками флогопита. SEI.

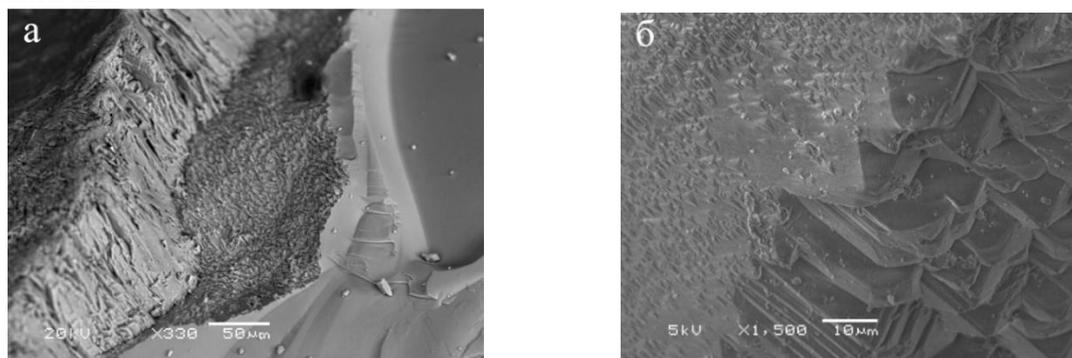


Рисунок 2 – А – «шагреневая» поверхность граната под келифитовой каймой; б - пирамидально-черепитчатый рельеф на поверхности пироба. SEI.

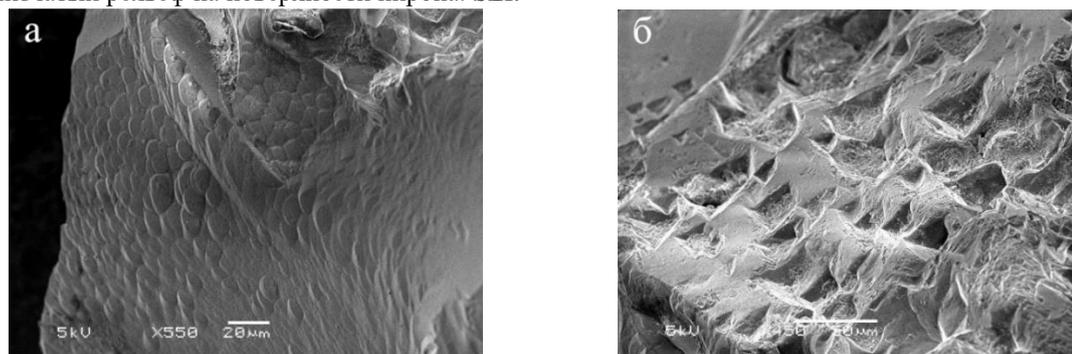


Рисунок 3 – Поверхность зерен граната Толоупского поля: а - ярко выраженный каплевидный рельеф

кубoidalного типа растворения; б - дислокационный тип – отрицательная форма рельефа со множеством каналов травления с устьями полигональной формы. SEI.

Пикроильмениты

Пикроильменит представлен желваками овальной формы с микропирамидальным рельефом (Рисунок 4а, б) и с шероховатой поверхностью, либо зернами агрегатного строения (Рисунок 5а). Наблюдаемое агрегатное строение формируется в результате перекристаллизации деформированных монокристаллов, при этом на гранях зерен присутствуют характерные округлые отпечатки включений, сброшенных на межзерновые границы [1] (Рисунок 5б). В целом морфология зерен пикроильменита из элювиально-делювиальных отложений и кимберлитовых брекчий аномалий Молодинского и Толоупского кимберлитовых полей однотипна, и имеет все характерные особенности минерала кимберлитовых пород.

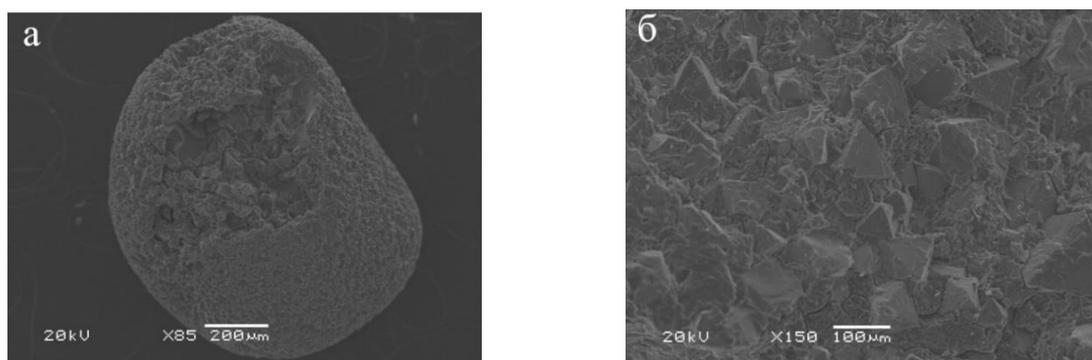


Рисунок 4 – А – желвак пикроильменита с микропирамидальным рельефом; б – увеличенный фрагмент поверхности пикроильменита с микропирамидальным рельефом. SEI.

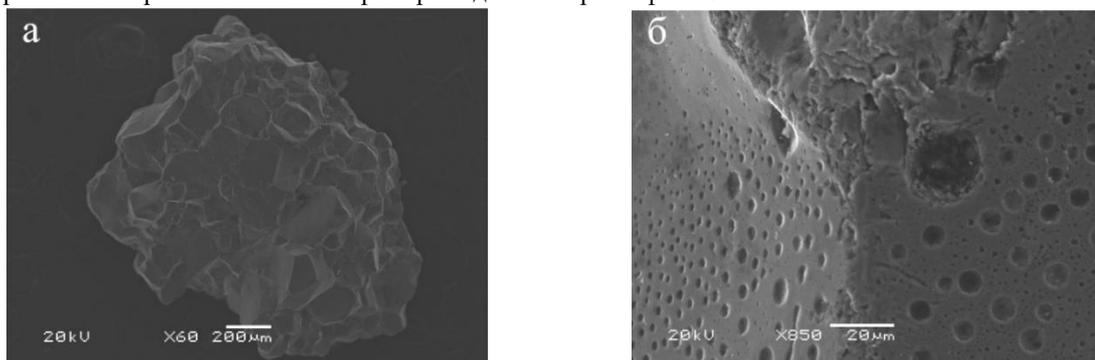


Рисунок 5 – А – зерно пикроильменита агрегатного строения; б – поверхность зерна с отпечатками включений, сброшенных на межзерновые границы. SEI.

Хромшпинелиды

Исследование хромшпинелидов из кимберлитовых пород и элювиально-делювиальных отложений аномалий Молодинского поля показало, что для зерен характерен шероховатый рельеф и магматическая коррозия первого и второго типа (Рисунок 6а, б). Хромшпинелиды встречаются в виде: обломков зерен; октаэдров с вершинами и ребрами, притупленными множеством мелких граней (Рисунок 7а); мириэдрических кристаллов (Рисунок 7б); овализированных разновидностей; в единичных случаях остросеберных октаэдров – характерных для кристаллов курунгского типа. Иногда присутствуют зерна овализированные в результате магматической коррозии второго типа, с реликтами рельефа, образованного при магматической коррозии первого типа (Рисунок 8а). Магматическая коррозия поверхности и овализация большинства зерен хромшпинелидов без следов выветривания, свидетельствуют о магматической истории исследованных минералов. Для зерен из элювиально-делювиальных отложений аномалии среднепалеозойского Толоупского поля, характерно присутствие микротрещиноватой внешней зоны (Рисунок 8б), которая свидетельствует о их пребывании в среднепалеозойской коре выветривания [1].

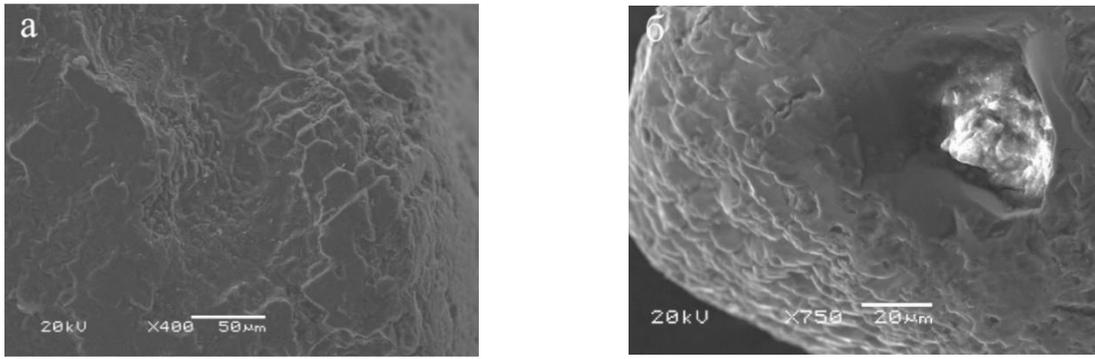


Рисунок 6 – Рельеф, образованный магматической коррозией: а - первого типа; б – второго типа. SEI.

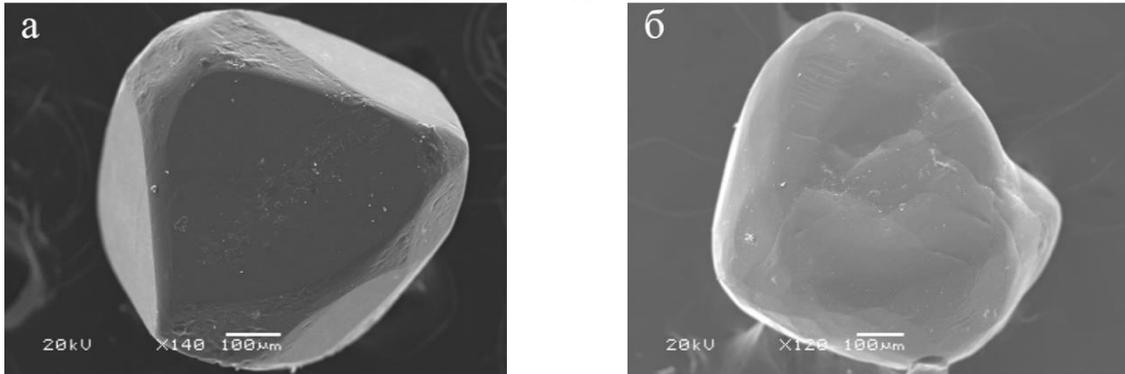


Рисунок 7 – А – октаэдр хромшпинелида с притупленными вершинами и ребрами; б – микроэдрический кристалл хромшпинелида. SEI.

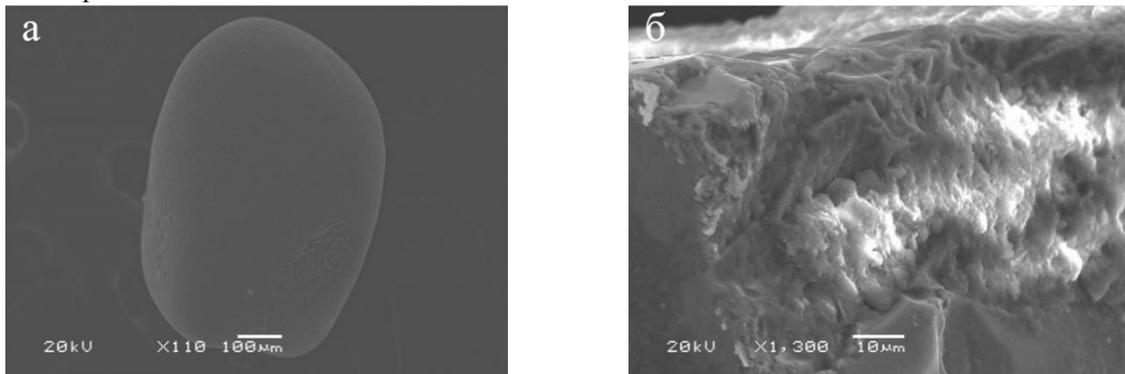


Рисунок 8 – А – овализированное зерно хромшпинелида с реликтовым участком рельефа магматической коррозии первого типа; б - скол ребра октаэдра хромшпинелида Толуопского поля, микротрещиноватость внешней зоны зерна. SEI.

3. Выводы

Исследование показало, что минералы индикаторы кимберлитов среднемезозойского Молодинского поля обладают рельефом магматического генезиса, поверхностью со следами растворения в виде пирамидально-черепитчатого рельефа и минимальным механическим износом. Установленные микротрещиноватая поверхность зерен хромшпинелидов и гипергенный рельеф растворения коровых гранатов алмадин-пиропового состава однозначно указывает на принадлежность содержащей их аномалии к среднепалеозойскому Толуопскому полю, так как такие особенности рельефа могли образоваться только в среднепалеозойской коре выветривания. Кроме того, наличие зерен с рельефом гипергенного растворения указывает на минимальный эрозионный срез кимберлитовых тел Толуопского поля.

Таким образом, изученные зерна гранатов и хромшпинелидов из разновозрастных кимберлитовых полей отличаются друг от друга по особенностям рельефа поверхности. Проведенное исследование показывает, что морфология зерен из элювиально-делювиальных отложений может быть использована для косвенного определения возраста кимберлитового тела по морфологии минералов спутников.

4. Литература

- [1] Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н., Похиленко Н.П. Поисковая минералогия алмазов. – Новосибирск: Академическое изд-во "Гео", 2010. – 650 с.
- [2] Зайцев А.И., Смелов А.П. Изотопная геохронология пород кимберлитовой формации Якутской провинции. – Якутск: Офсет, 2010. – 108 с.
- [3] Шамшина Э.А. Коры выветривания кимберлитовых пород Якутии. – Новосибирск: Наука, 1979. – 151 с.

КРИСТАЛЛОГЕНЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ УНИКАЛЬНОЙ ФОРМЫ АЛМАЗА «МАТРЕШКА» И ПОДОБНЫЕ НАХОДКИ КРИСТАЛЛОВ

Антон Павлушин¹, Диана Коногорова²

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

2 ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова»,
119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, 1

CRYSTALLOGENETIC CAUSES OF THE UNIQUE SHAPE OF THE MATRYOSHKA AND SIMILAR CRYSTAL FINDS

Anton Pavlushin¹, Diana Konogorova²

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

2 Lomonosov Moscow State University, 1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

Annotation. The unusual shape of the Matryoshka diamond, which is a diamond crystal with a cavity containing a diamond crystal freely moving in it, continues to attract the close interest of many researchers. A comprehensive mineralogical and crystallographic analysis of an unusual sample, as well as other similar diamond crystals, suggests that it was formed as a result of mutual disorientation of crystals during their growth and presence the twin of diamond subindividualities, which formed both the core (inclusion) and the shell (containing diamonds). The twinning planes (111) in the contacting crystals of the inclusion and host were in a sub-perpendicular position to each other during their simultaneous growth. The captured inclusion diamond prevented the normal development of the diamond, which became its case. The diamond grew rapidly along the direction of its own twin boundary and constantly generated new growth layers that eventually converged around a small trapped double crystal cluster during metric selection. The analysis of diamond crystals of a similar shape confirms the ontogenetic model of their origin as a consequence of the capture of diamond inclusions that prevented the rapid growth of the twin crystal in the direction of the twin boundary.

1. Введение

Алмаз «Матрешка» найденный в 2019 году при разработке АК «АЛРОСА» тр. Нюрбинская получил мировую известность как уникальный случай нахождения кристалла алмаза в полости другого более крупного индивида по принципу строения русской деревянной игрушки. Алмаз продолжает привлекать интерес многих исследователей в контексте его парадоксального для мантийного минерала происхождения. Открытие вызвало оживленные дискуссии и многочисленные попытки объяснить природу уникальной формы алмаза «Матрешка». Согласно основной гипотезе возникновения его необычной формы, опубликованной после тщательно изучения алмаза в нью-йоркской лаборатории Геммологического института Америки GIA [1, 2], ранее между внутренним алмазом и алмазным футляром существовала волокнистая прослойка алмаза, а их рост происходил последовательно, слой за слоем, образуя зональную форму. Затем, на заключительном этапе, волокнистая зона была растворена путем проникновения флюида внутрь алмаза через тонкие (порядка 0.2-0.3 мм) отверстия, обнаруженные в футляре. Однако этим выводам противоречил ряд наблюдений, позволяющих говорить о том, что внутренний алмаз и футляр продолжительное время росли одновременно, соприкасаясь друг с другом [3]. Об этом свидетельствовало наличие на стенке футляра и алмазном ядре идентичного как отпечаток рисунка индукционной штриховки (рисунок 1). Кроме того отмечено, что на внутренней поверхности полости и находящемся в нем кристалле практически отсутствуют следы растворения, которое, как предполагается, уничтожило ранее

существовавшую пористую зону, благодаря растворам проникшим через отверстия в алмазе [1, 2, 4], что также противоречит гипотезе высказанной самими авторами. Основной задачей настоящего исследования являлось провести ревизию ранее известных фактов, и используя комплексный минералогический и кристаллографический анализ необычного образца и подобных ему находок получить полноценную картину образования алмазов типа «матрешка»



Рисунок 1 – Алмаз «Матрешка» и совмещение отпечатков индукционной штриховки на внутренней поверхности полости и содержащемся в ней алмазе для восстановления первоначальной позиции алмазного включения. Рентгеновский микротомограф.

2. Морфологический анализ алмаза «Матрешка»

Уже в первых работах, посвященных изучению алмаза, обращено внимание, что футляр алмаза и содержащийся в нем подвижный алмаз являются шпинелевыми двойниками. Кроме того, даже при беглом оптическом изучении алмаза «Матрешка» под биноклем обращает внимание присутствие на стенке полости внутри кристалла заметного углубления, покрытого штриховкой, составленной из множества одинаковых по форме замкнутых многоугольных линий (рисунок 1). Такой же по форме, но выпуклый ступенчатый рельеф с замкнутыми линиями уступов присутствует на ядре алмаза, заключенного в полости. По восстановленному прежнему положению алмаза-узника в футляре можно заключить, что захваченный кристалл препятствовал развитию вмещающего алмаза расположившись на фронте роста его двойниковой границы (рисунок 1).

В месте его захвата двойниковым сростком образовался входящий угол сложенный гранями октаэдра постепенно оформившийся в полость ограниченную кристаллографическими поверхностями роста. Свободно перемещаться кристалл внутри алмаза стал лишь после его отрыва от внутренней поверхности полости футляра вдоль индукционной границы срастания, что обычно легко происходит между кристаллами совместного роста.

Полость между стенками футляра и алмазом была заполнена матийными сульфидами, о чем свидетельствуют включения, обнаруженные в области двойникового шва пересекающего футляр «Матрешки». Их уничтожению и удалению из полости могли способствовать перепады

давления в природной среде, а также термохимическая обработка в агрессивных средах в процессе обогащения алмазоносного концентрата и многостадийной очистки кристаллов.

3. Находки кристаллов алмаза типа «матрешка»

В 2022 году из тр. Нюрбинская ожидаемо извлечен новый «алмаз-матрешка» (рисунок 2), точнее его прототип, отражающий все подробности образования оригинального кристалла типа «macle». Треугольная вершина шпинелевого двойника с входящим зеркальным углом на границе двойникования по (111) имеет глубокую выемку с нависающими над ней краями, в которой заключен двойниковый сросток кристаллов алмаза, имеющий возможность, не выпадая, перемещаться в пространстве впадины. Найденный экземпляр прекрасно демонстрирует процесс захвата незакономерно ориентированного индивида алмаза кристаллом в направлении роста границы двойникования при встрече препятствия в виде кристалла алмаза преградившего фронт роста (рисунок 2).



Рисунок 2 – Прототип алмаза типа «матрешка» из тр. Нюрбинская в виде шпинелевого двойника с мелким двойниковым сростком кристаллов, который свободно перемещается в открытой полости алмаза. Модель его захвата фронтом роста двойниковой границы пролегающей на месте входящего угла образованного гранями октаэдра [5, 6].

Кроме описанных [5, 6] пяти новых и ранее известных находок включений алмаза, содержащихся в открытых полостях сдвойникованных кристаллов типа “macle”, обнаружен еще один пример подобного алмаза из тр. Удачная (рисунок 3). Он полностью соответствующий изложенной модели захвата включения двойниковой границей в направлении внешнего угла образованного октаэдрическими сегментами двойникового сростка (рисунок 3). Помимо включений алмаза, известен эффективный захват включений двойниковой границей шпинелевых двойников октаэдрических кристаллов алмаза граната, оливина, и другими минералами сингенетическими алмазу [7, 8]. Известно, что границы двойникования служат непрерывным генератором новых слоев роста, превосходя в скорости развития другие направления и грани алмаза, благодаря чему его контактные шпинелевые двойники обычно приобретают в ходе кристаллизации резко уплощенную форму. Таким образом, двойник захватывает более мелкий индивид, оказавшийся на пути развития плоскости двойникования, огибая его границы новыми тангенциальными слоями роста граней октаэдра.

Возникновение полости в кристалле происходит за счет препятствующего его росту индивида и постепенно вокруг захваченного кристалла образуется футлярообразная ограненная кристаллическая постройка, которая также быстро замыкает пространство в направлении ускоренного роста двойниковой границы не успевающую зарости алмазом камеру содержащую алмаз-узник. Далее диффузия в полости футлярообразного двойника прекращается, и дальнейшее ее зарастание становится невозможным. Наличие включений сульфидов в пределах

границы двойникования алмаза «Матрешка» сконцентрированных непосредственно у стенки полости позволяет предположить, что она также была заполнена сульфидными минералами, а средой его кристаллообразования являлся металл-сульфид-углеродный расплав при относительно низких P-T параметрах, отвечающих верхней мантии Земли.

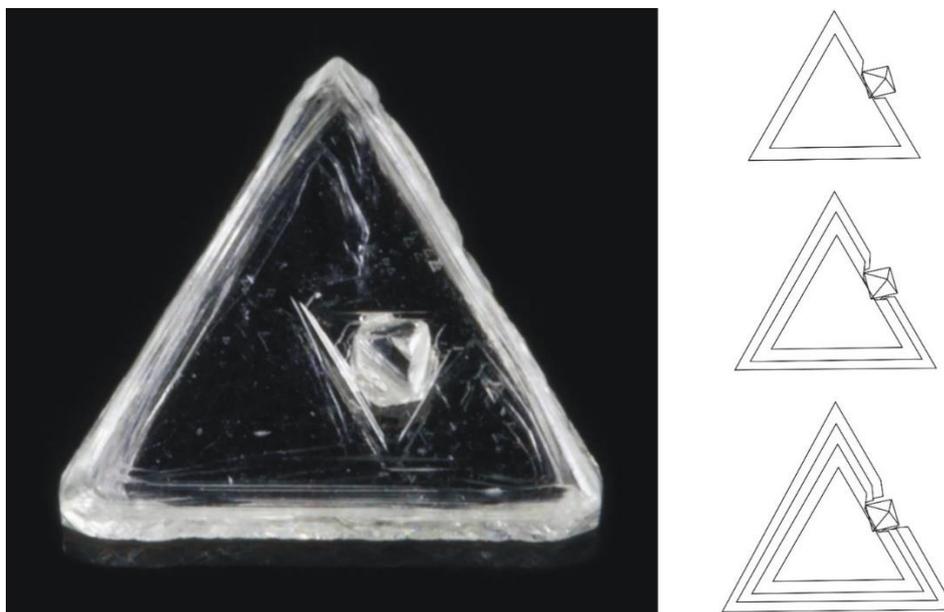


Рисунок 3 – Шпинелевый двойник с открытой полостью содержащий кристалл алмаза (0.99 ct) из трубки Удачная (фото ©RobLavinsky&irocks.com) и модель захвата включения алмаза границей двойникования в направлении внешнего двугранного угла [5, 6].

4. Выводы

По установленному положению алмаза-узника в футляре алмаза “Матрешка” можно с полной уверенностью заключить, что захваченный кристалл препятствовал развитию вмещающего алмаза, расположившись на фронте его роста провоцируя между ними метрический отбор, и появление кристаллографически ограненного входящего угла формирующего стенку футляра. Сам факт наличия индукционной границы между захваченным алмазом и вмещающим его футлярообразным кристаллом свидетельствует, что они соприкасались, и в течение этого периода их рост происходил одновременно. А самое важное, это говорит об отсутствии между ними предполагаемой волокнистой или пористой скелетной зоны роста как основного условия механизма возникновения алмаза “Матрешка” и показывает несостоятельность ранее озвученной альтернативной гипотезы [1, 2, 4].

Для алмаза “Матрешка” и его аналогов нами определено два механизма захвата включений алмаза посредством быстрого роста алмаза-хозяина в направлении границы двойникования встретившей препятствующий развитию сингенетический или ранее образованный кристалл. Они различаются типом двойниковой границы, представляющей собой входящий либо внешний угол, образованный зеркально симметричными гранями октаэдра компонентов шпинелевого двойника.

5. Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта НИР ИГАБМ СО РАН и учебного плана аспиранта геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

6. Литература

[1] Wang, W., Yazawa E., Persaud S., Myagkaya E., D’Haenens-Johansson U., Moses T.M. Lab Notes: Formation of the “Matryoshka” diamond from Siberia // *Gems & Gemology*. – 2020. – 56(1). – P. 127-129.

- [2] Fritsch E. (2021) Revealing the formation secrets of the Matryoshka diamond // *The Journal of Gemmology*. – 37(5). – P. 528-533.
- [3] Коногорова Д.В., Ковальчук О.Е. и др. Уникальный алмаз из трубки Нюрбинская // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. – 2020. – 25(2). – С. 45-55.
- [4] Бескованов В.В. О возможном механизме образования алмаза-матрешки // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы северо-востока России, Материалы XII Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 65-летию ИГАБМ СО РАН*. – Якутск: изд. СВФУ, 2022. – С. 283-286.
- [5] Павлушин А.Д., Коногорова Д.В. Кристаллогенетические предпосылки возникновения уникальной формы алмаза “Матрешка” – эффект захвата алмазного включения двойником кристаллов алмаза // *Геохимия*. – 2023. – том 68. – № 3. – С. 271-284.
- [6] 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. – No. 3. – P. 252-264.
- [7] Павлушин А.Д., Соболев Н.В. Морфология сингенетичных включений оливина и граната в шпинелевых двойниках алмаза // *Материалы Юбилейного съезда Российского минералогического общества «200 лет РМО»*. – С-Петербург, 2017. – Том 1. – С. 92-94.
- [8] Соболев Н.В., Сереткин Ю.В., Логвинова А.М., Павлушин А.Д., Угапьева С.С. Кристаллографическая ориентировка и геохимические особенности минеральных включений в алмазах // *Геология и геофизика*. – 2020. – Т. 61. – № 5-6. – С. 774-793.

СВОЙСТВА И СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗЛИЧНЫХ СОРТОВ БИВНЯ МАМОНТА

Евгения Петухова¹, Тускул Соловьев¹, Татьяна Исакова¹, Глеб Ботвин¹, Вячеслав Петров¹,
Валерия Павлова¹, Александр Чириков¹, Андрей Федоров²

1 ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН», 677980, г. Якутск, ул. Петровского, 2

2 ФГБУН ФИЦ «ЯНЦ СО РАН» «Институт проблем нефти и газа СО РАН»,

677007, Россия, г. Якутск, ул. Автодорожная, 20

PROPERTIES AND STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF DIFFERENT GRADES OF MAMMOTH TUSK

Evgeniya Petukhova¹, Tuskul Solovyov¹, Tatiana Isakova¹, Gleb Botvin¹, Vyacheslav Petrov¹,
Valeria Pavlova¹, Alexander Chirikov¹, Andrey Fedorov²

1 FRC "The Yakut Scientific Centre of the SB RAS", 2, Petrovsky str., Yakutsk, 677980, Russia

2 Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, 20, Avtodorozhnay str., Yakutsk, 677007, Russia

Annotation. The paper presents the results of the study of structure of various grades mammoth tusk by X-ray diffraction analysis and infrared spectroscopy. The results of research of moisture saturation and physical-mechanical properties in compression depending on the grade and humidity of samples are given. It is established that tusks of mammoth of III and IV grades are distinguished by greater mineralization and the presence of a greater number of microdefects. It is shown that physical and mechanical properties of tusks directly depend on their moisture content: dried samples are characterized by higher values of durability at compression, indistinct dependence of anisotropic properties on grade; overmoistened samples have 4-7 times lower durability in comparison with control samples. The obtained results can be used to determine the characteristics of the environment, in which mammoth tusk was buried before its extraction and in the future to establish the peculiarities of their degradation.

1. Введение

Бивень мамонта (БМ) – уникальное сырье биогенного происхождения. Рыночная стоимость БМ достаточно высока, однако она определяется их сортностью. В настоящее время оценка сортности БМ производится в основном по внешним признакам – целостности, наличия, количества и глубины трещин, длины фрагментов и пр. Однако, практика показывает, что скорость деградации исследуемого сырья существенно зависит от вмещающей среды, из которой БМ был извлечен. Наиболее распространено обнаружение костных остатков в вечномерзлых отложениях, из которых БМ извлекают методом гидроразмыва, а также извлечение со дна разнообразных водоемов, в которых они аккумулируются после выпадения из эродирующих прибрежных эдомных отложений. В данной работе представлены результаты исследования физико-механических свойств БМ и некоторых структурных характеристик в зависимости от их сортности, определенной согласно современной нормативной документации, а также в зависимости от влажности исследуемого сырья.

2. Основная часть

Для изучения свойств БМ в зависимости от содержания влаги и от их сортности, были приобретены бивни разных сортов. Определение сортности проводили на основе разработанного Национальным мамонтовым фондом Республики Саха (Якутия) и Всемирным музеем мамонта (г. Якутск) документа «Технические условия на ископаемый бивень и его обломки, добываемые на территории Республики Саха (Якутия) ТУ 421-001-92», а также с учётом более раннего документа «Кость мамонтовая в сырье, ТУ 41-07-006-81», использовавшегося СПО «Северкварцсамоцветы» в 1982-84 гг. В зависимости от сохранности,

помимо коллекционного бивня, который довольно редко встречается, сырье подразделяют на 4 сорта (Рисунок 1) [1].

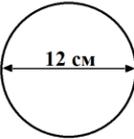
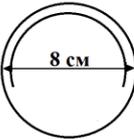
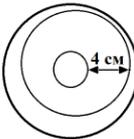
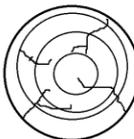
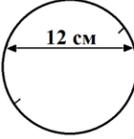
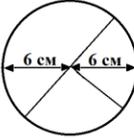
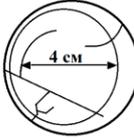
| 1 сорт | 2 сорт | 3 сорт | 4 сорт |
|---|---|---|---|
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |

Рисунок 1 – Сорта бивня мамонта.

Согласно существующей нормативной документации к I сорту относят БМ без повреждений, приведших к утратам (кроме прижизненных); вещество бивней сухое, без трещин, минимальный диаметр при выходе из альвеолы – 10 см; фрагменты без трещин, диаметр минимальный – 10 см, длина минимальная – 30 см. Ко II сорту относят бивни целые или повреждённые с утратами в альвеолярной и/или в свободной части; вещество бивней влажное или сухое, с отдельными (не более 3-х) продольными трещинами глубиной до 30% диаметра; диаметр минимальный – 7,5 см; фрагменты с трещинами (не более 3-х), диаметр минимальный – 7,5 см, длина минимальная – 20 см. Бивни III сорта представляют собой бивни целые или повреждённые с утратами в альвеолярной и/или в свободной части; вещество бивней влажное или сухое, с несколькими продольными трещинами глубиной до 50% диаметра и/или с концентрическими трещинами в краевой зоне; диаметр минимальный – 5 см; длина минимальная – 10 см. БМ IV сорта (синонимы: «несортовой материал», щепа) – это фрагменты бивней в виде обломков или щепы (редко – сильно разрушенные бивни) с многочисленными продольными и кольцевыми трещинами и расслоениями; гидроксипатит (костная ткань) и/или коллаген частично дегидратированы (обезвожены); параметры – без ограничений. Основными компонентами БМ, как и практически любой другой костной ткани, являются гидроксипатит (ГАП), коллаген и вода. Структурные характеристики исследованных образцов и соотношение компонентов в них определяли методами рентгенофазового анализа (РФА) и ИК-спектроскопии.

На первом этапе было проведено исследование образцов БМ методом РФА. РФА проведен на дифрактометре D2 PHASER (Bruker, Германия) при следующих условиях: $\text{CuK}\alpha$ -излучение – 30 кВ, 10 мА; интервал 4,5-65° (2θ). Для идентификации минералов использована база данных PDF-2/Release 2011 RDB. Метод РФА позволяет определить минеральный состав исследуемых проб. Установлено, что тип получаемой дифрактограммы практически не зависит от сорта БМ – основной составляющей является ГАП. Однако в БМ III и IV сортов выявлено появление следовых количеств минерала ньюберит, образование которого происходит в условиях кислой среды и высокой влажности в результате диссоциации ионов гидрофосфата и магния [2]. Кроме ньюберита, наиболее часто в составе костных тканей возможно выявить вивианит, метавивианит, сантабарбарейт, струвит, боберит и др., по содержанию которых возможно определить степень окисления палеонтологических костных остатков и оценить условия их захоронения [3].

ИК-спектроскопические исследования (ИК-спектрометр «NicoletProtégé 460») показали, что в зависимости от сортности изменяется интенсивность характеристических пиков большинства

функциональных группировок. К примеру, на Рисунке 2 представлена зависимость между интенсивностью характеристических полос коллагеновой составляющей и сортностью БМ.

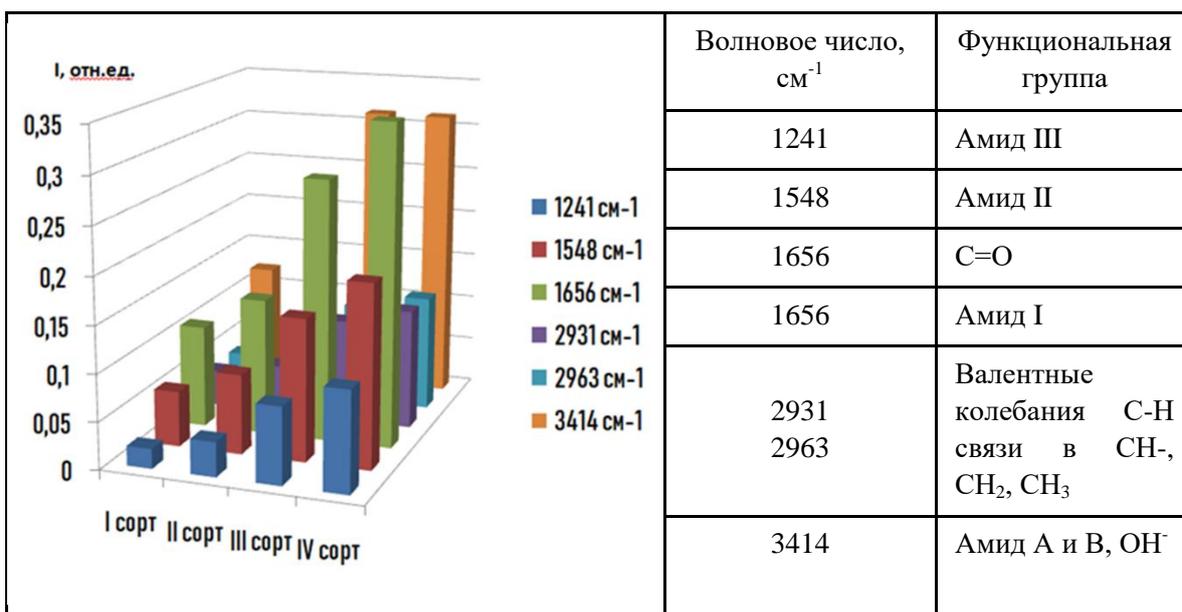


Рисунок 2 – Зависимость интенсивности характеристических частот поглощения коллагеновой составляющей БМ от его сорта.

Поскольку рост интенсивности наблюдается для всех выделенных характеристических полос, был выполнен расчет соотношения интенсивностей минеральной и коллагеновой составляющих. Для вычисления были выбрана полоса при 1036 см⁻¹, характеризующая антисимметричное валентное колебание P-O в PO₄³⁻ ν₃ и полоса при 1548 см⁻¹, соответствующая колебаниям группы Амид II (N-H). Эти полосы выбраны как наиболее интенсивные на ИК-спектрах. Результаты расчета представлены в Таблице 1.

Таблица 1 – Относительные интенсивности колебаний различных составляющих БМ и их соотношение.

| Тип колебания | Сорт БМ | | | |
|---|---------|-------|-------|-------|
| | I | II | III | IV |
| Антисимметричное валентное колебание P-O в PO ₄ ³⁻ ν ₃ | 0,187 | 0,237 | 0,393 | 0,505 |
| Амид II (N-H) | 0,059 | 0,085 | 0,151 | 0,194 |
| P-O/ N-H | 3,169 | 2,788 | 2,603 | 2,603 |

Видно (Таблица 1), что соотношение минерального и органического компонентов постепенно снижается от I сорта к III, аналогичные соотношения для БМ III и IV сортов, равны. Полученный результат свидетельствует о том, что при деградации костных тканей окисление и разрушение минеральной составляющей протекает интенсивнее, чем органической части [4], а на определенном этапе, скорости разрушения данных компонентов выравниваются. Безусловно полученный результат интересен, однако для его подтверждения требуется проведение дополнительных экспериментальных исследований и набор статистики при исследовании других образцов БМ различных сортов.

Как нами было показано в ранее выполненных работах [5], физико-механические характеристики БМ существенно зависят от влажности исследуемого материала. Этот вопрос достаточно существенен, так как практика показывает, что переувлажненные бивни (извлеченные из водной среды), характеризуются значительно более высокой скоростью деградации при хранении, что вызвано интенсивной потерей материалом влаги, в результате

чего интенсифицируются процессы растрескивания. Для установления максимального влагонасыщения материала БМ различных сортов, образцы были просушены при температуре 60°C в течение 24 часов и переувлажнены (хранили в водной среде в течение 6 недель). Сроки просушивания и увлажнения определялись приобретением материалом постоянной массы. В таблице 2 представлены результаты исследования массы образцов до и после сушки/вымачивания.

Таблица 2 – Изменение массы после сушки/вымачивания

| Сорт БМ | Изменение массы после просушивания, % | Изменение массы после переувлажнения, % | Общее изменение массы, % |
|---------|---------------------------------------|---|--------------------------|
| I | -5,83 | +11,28 | 17,11 |
| II | -8,15 | +12,82 | 20,97 |
| III | -4,26 | +20,26 | 24,52 |
| IV | -6,14 | +22,17 | 28,31 |

Видно (Таблица 2), что общее изменение массы возрастает при переходе от I сорта к IV. По количеству влаги, которое материал может потерять/впитать можно косвенно судить о его пористости. При деградации материал высыхает, теряет часть компонентов, растрескивается и его пористость растет [6]. Наличие большого количества дефектов – пор, микротрещин и пр. приводит к тому, что материал может впитать значительно больше влаги.

В таблице 3 представлены результаты исследования физико-механических свойств исходных (контрольных), высушенных и переувлажненных образцов из БМ различных сортов. Показатель прочности при сжатии определяли на универсальной испытательной машине Z600 (Zwick/Roell, Германия) при следующих условиях: предварительная нагрузка – 40 Н; скорость приложения предварительной нагрузки – 10 мм/мин; скорость испытания – 1 мм/мин. Так как БМ характеризуется значительной анизотропностью [7], испытания проводили расположив образцы по направлению вдоль и поперек тела бивня.

Таблица 3 – Прочность при сжатии образцов из БМ (МПа).

| Сорт БМ | Высушенные | | Исходные (контроль) | | Вымоченные | |
|---------|------------|---------|---------------------|---------|------------|---------|
| | Вдоль | Поперек | Вдоль | Поперек | Вдоль | Поперек |
| I | 185,7 | 169,9 | 141,8 | 102,9 | 35,8 | 29,2 |
| II | 235,0 | 168,5 | 117,0 | 77,5 | 21,4 | 23,6 |
| III | 226,7 | 219,2 | 161,6 | 149,1 | 26,4 | 23,4 |
| IV | 238,5 | 166,2 | 150,3 | 127,7 | 22,1 | 20,2 |

Видно (Таблица 3), что анизотропия прочности исходных (контрольных) образцов при переходе от I к IV сорту постепенно снижается. Анизотропия прочностных характеристик у переувлажненных образцов практически отсутствует, а прочность в общем случае снижается в 4-7 раз по сравнению с исходными образцами ниже. Анизотропия свойств высушенных образцов выражена неочетливо, закономерности между сортностью и степенью анизотропии прочностных характеристик в продольном и поперечном направлениях не выявлено. Прочность высушенных образцов до 2х раз выше, по сравнению с контрольными образцами.

3. Выводы

Исследованы некоторые структурные характеристики БМ различных сортов. Показано, что БМ III и IV сортов более минерализованы. Установлено, что на начальном этапе деградация минеральной составляющей протекает интенсивнее, а затем скорость окисления и разрушения минеральной и органической составляющей выравниваются, однако данный факт следует подтвердить статистически. Выявлено, что микропористость БМ растет со снижением их сортности, что сказывается на особенностях влагопоглощения. Прочностные характеристики

образцов БМ напрямую зависят от влажности образцов, что возможно использовать для определения среды, из которой БМ был извлечен при добыче.

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] Decree of the Head of the Republic of Sakha (Yakutia) of August 13, 2018 No. 649-RG "On approval of the Concept for the development of the collection, study, use, processing and sale of paleontological materials of the mammoth fauna in the Republic of Sakha (Yakutia)" - URL: <http://docs.cntd.ru/document/550166534/>
- [2] Freund A., Eggert G., Kutzke H., Barbier B. On the Occurrence of Magnesium Phosphates on Ivory // *Studies in Conservation*. – 2002. – Vol. 47(3). – P. 155-160.
- [3] 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). – P. 22284-22291.
- [4] Zolotarev V.M. Investigation of the Mineralization Process of Biosystems by IR Diffuse Reflection Spectroscopy Methods // *Optics and Spectroscopy*. – 2014. – Vol. 4. – P. 645-660.
- [5] Solov'ev T.M., Petukhova E.S., Botvin G.V., Kolesova E.S., Petrov V.V. The Effect of Storage Conditions on Physical Properties of Mammoth Tusks // *Polymer Science, Series D*. – 2022. – Vol. 15. – P. 724-728.
- [6] Fernández-Jalvo Y., Sánchez-Chillón B., Andrews P., Fernández-López S., Martínez L.A. Morphological Taphonomic Transformations of Fossil Bones in Continental Environments and Repercussions on Their Chemical Composition // *Archaeometry*. – 2002. – Vol. 44. – P. 353-361.
- [7] Girya E. Y., Khlopachev G. A. Experimental Data on the Splitting and Knapping of Mammoth Tusk and Reindeer Antlers // *À coup d'éclats*. – 2018. – P. 325-340.

**ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ СОЛЕНОСНОЙ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ФОРМАЦИИ
СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО СКЛОНА АЛДАНСКОЙ АНТЕКЛИЗЫ И
ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ**

Александр Погодаев^{1,2}, Иван Рудых³

1 Р АО «Туймаданефтегаз», ул. Курашова, 44а, г. Якутск, 677005, Россия

2 ФГБУН ФИЦ «ЯНЦ СО РАН» «Институт проблем нефти и газа СО РАН»,
677007, Россия, г. Якутск, ул. Автодорожная, 20

3 ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова»,
677000, Россия, г. Якутск, ул. Белинского, 58

**HYDRODYNAMIC FEATURES OF THE FORMATION OF DEPOSITS OF THE
SALT-BEARING HYDROGEOLOGICAL FORMATION OF THE
NORTHWESTERN SLOPE OF THE ALDAN ANTECLISE AND ADJACENT
TERRITORIES**

Alexander Pogodaev^{1,2}, Ivan Rudyh³

1 JSC "Tuimaadaneftegaz", 44a Kurashov St., Yakutsk, 677005, Russia

2 Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, 20, Avtodorozhnay str., Yakutsk, 677007, Russia

3 North-Eastern Federal University, 58, Belinsky str., Yakutsk, 677000, Russia

Annotation. In Yakutia, carbonate rocks are one of the most important reserves for increasing the resource base of oil and gas in such areas as the Syugdzherskaya saddle, the Berezovskaya Depression, the north-western slope of the Aldan anteklise, the southern side of the Vilyui syncline. Signs of oil and gas in carbonate rocks are found under salt-bearing bundles, and can also be controlled by interlayers of clay limestones, dolomites. The industrial significance of the horizons of the Charskaya formation was confirmed by testing parametric well No. 2210, and drilling materials of well 647-1PM. The Mukhtinskoye gas field has been discovered with an abnormal value of reservoir pressure in the deposits. The nature of the specified anomaly has been established. The nature of the pressures is hydrostatic, the magnitude of these pressures is determined by the weight of the reservoir fluid column, which provides hydraulic coupling within the framework of the salt formation. The oil and gas accumulation zone is becoming widespread.

1. Введение

Гидрогеологические исследования получили довольно широкое распространение в практике поисково-разведочных работ на нефть и газ в большинстве нефтегазоносных районах Восточной Сибири. Нефтегазопроисходящая гидрогеология закономерно выделилась в самостоятельную отрасль на стыке традиционной, классической гидрогеологии и геологии нефти и газа. Её основу также составляют принципиальные положения классической артезианской теории в части формирования водонапорных систем глубоких горизонтов с необходимыми прикладными уточнениями. До настоящего момента в нефтяной гидрогеологии не существует единого эталона сравнения пластовых давлений, но в качестве такового используется термин «условное гидростатическое давление», т.е. понятие «аномальности» не получило абсолютно строгого научного обоснования, а если нет эталона сравнения, то и само понимание аномальности носит, в некотором смысле, относительный характер. Количественные критерии отнесения пластовых давлений в разряд аномальных, а также общепринятая методика расчета коэффициента аномальности до сих пор являются дискуссионными и требуют дальнейшего изучения.

По высказываниям А.А. Карцева, гидрогеологическим исследованиям в Восточной Сибири необходимо уделять самое серьезное внимание и шире использовать их как для выявления и конкретизации наиболее перспективных участков, так и для уточнения точек заложения скважин при разведке уже выявленных залежей, особенно при разведке литологически экранированных.

Многие вопросы гидрогеологических условий нефтегазоносности Сибирской платформы рассматривались в работах А.С. Анциферова, В.И. Вожова, А.А. Граусмана, Л.А. Грубова, А.И. Сурнина, А.Б. Фукса, В.П. Шабалина, Ю.И. Яковлева и других специалистов, которые положены в основу современной практики поисково-разведочных работ.

В текущее десятилетие получили развитие исследования природы и характера аномального давления пластовой системы пермо-триаса Вилуйской синеклизы, связанные с уточнением существующих представлений о гидрогеологических и гидродинамических условиях формирования и сохранности газоконденсатных залежей неджелинского резервуара Хапчагайского мегавала. Подготовлено научное обоснование роли подземной гидродинамики, как одного из ведущих факторов контроля размещения пермо-триасовых газовых залежей, позволившее выявить новые закономерности в поведении вмещающей водонапорной системы, определяемые условиями напряженного состояния гидродинамического поля, связанного с проявлением аномально-высокого пластового давления (АВПД). Дано объяснение одной из возможных причин низкого коэффициента заполнения газом гигантской пермской ловушки неджелинского резервуара, и представлено обоснование наклонных флюидных контактов (ГВК) в пермских газовых залежах [1].

Также объектами повышенного внимания длительный период являются установленные зоны аномально-низких пластовых давлений (АНПД) Сибирской платформы, к которым приурочены преобладающие объемы запасов углеводородов. На площади Непско-Ботуобинской антеклизы, в пределах которой выделена Непско-Ботуобинская нефтегазоносная область (НБ НГО), по материалам научных исследований ЯНЦ СО РАН, открытые месторождения составляют единую зону нефтегазонакопления с близким механизмом образования. При этом энергетическое состояние пластовой флюидной системы на локальном уровне и в региональном плане определяется исключительно динамикой газовых флюидов, формирующих значительные скопления в виде газовых месторождений и газовых шапок нефтяных залежей, а также углеводородным газом, находящемся в водорастворенном состоянии. Динамические же проявления в движении собственно рассольных вод охарактеризованы как локальные.

На основе выполненного анализа установлено, что в пределах северо-восточной части НБ НГО с особыми условиями флюидодинамического режима резервуара подсолевого комплекса с АНПД, получил развитие процесс вторичного переформирования залежей, который происходит непосредственно в границах масштабного пьезоминимума. В целом зона низких давлений сохраняет благоприятные условия как газосборная территория. Одним из очевидных доказательств наличия причинно-следственной связи между понижением температуры недр НБ НГО и снижением пластового давления до аномально низких значений, можно считать сопоставимые величины этих двух взаимозависимых явлений [2].

В целом особенности региональной гидродинамики Сибирской платформы свидетельствуют, о масштабном развитии современных миграционных процессов, которые наиболее активны на участках гидродинамических аномалии регионального характера (АНПД, АВПД). К таким территориям с аномальными значениями пластовых давлений приурочены крупные месторождения газа и нефти. Показатель «аномальности» в определенных случаях может служить дополнительным поисковым критерием оценки перспектив новых территорий.

2. Перспективная зона нефтегазонакопления северо-западного склона Алданской антеклизы

Мухтинское газовое месторождение, открыто АО «Туймаданефтегаз» в 2022 году в пределах северо-западного склона Алданской антеклизы на Мухтинском лицензионном участке (рисунок

Главной особенностью венд-кембрийских отложений, на рассматриваемой территории, является наличие в них мощных соленосных толщ, которые являются определяющим элементом в гидрогеохимическом и гидродинамическом строении пластовых водоносных систем. В целом это обеспечивает значительное своеобразие гидрогеологических комплексов и разделяющих их флюидоупоров. Кембрийский перспективный нефтегазоносный комплекс (НГК), включающий эльгяно-толбачанскую, олекминско-чарскую и ичери-метегерскую группы продуктивных горизонтов, сложен сульфатно-карбонатными отложениями нижнего и среднего кембрия. Широкое распространение солей в интервале данного комплекса отложений обеспечивает необходимые условия для экранирования пластовых залежей, которые образуют локальные скопления в пределах всей толщи отложений составляющей до 800-1000 метров.

В карбонатных толщах, залегающих в интервале разреза от кровли юрегинской свиты до подошвы верхоленской серии в продуктивных и водоносных горизонтах встречены пластовые давления в диапазоне величин от аномально низких, до аномально высоких. Подобная дифференциация характерна для Кемпендйской, Березовской, Ыгыаттинской впадин и Северо-Западного склона Алданской антеклизы.

По принятой схеме гидрогеологического районирования Мухтинское месторождение расположено в пределах северо-восточной периферии Березовского Артезианского бассейна (АБ) III порядка. Бассейн характеризуется большой засоленностью пластовых вод, затрудненным характером водообмена внутри комплексов, пониженным температурным режимом глубоких горизонтов, а также различием в проявлении динамики и химизма пластовых вод в выделяемых водоносных комплексах. В нефтегазовой гидрогеологии юга Сибирской платформы используется деление разреза на гидрогеологические формации: подсолевая, соленосная и надсолевая, которые в свою очередь разделяются на водоносные комплексы, и далее на водоносные горизонты. Гидрогеологическая стратификация разреза в основных чертах совпадает с геологическим делением осадочного чехла на нефтегазоносные комплексы.

Гидрогеологический разрез подсолевой формации осадочного чехла содержит воды рифейского, вендского и венд-кембрийского комплексов. Преобладающий химический состав вод хлоридный натриевый (Бысахтахская, Верхнечерендейская, Курдарарская, Бордонская, Ыстынахская площади) с диапазоном минерализации от 250 до 300 г/л и кальциево-натриевый и натриево-кальциевый (Бысытых-Кюельская, Олекминская, Усть-Бирюкская площади).

Гидрогеологический разрез соленосной формации осадочного чехла включает в себя нижнекембрийский и среднекембрийский водоносные комплексы. Отложения этой формации имеют региональное распространение и широко развиты в Березовском АБ. Нижнекембрийские отложения содержат пласты солей в юрегинской и чарской свитах. Водоносные (рассолоносные) горизонты представлены доломитами, доломит-ангидритами, известняками, переслаивающимися с пластами ангидритов (гипсов) и каменной соли. Пластовые воды в этих формациях почти повсеместно представлены рассолами хлоридного кальциево-натриевого, натриево-кальциевого и магниево-кальциевого состава с минерализацией 320-400 т/л и более, а водорастворенные газы (ВРГ) по составу в основном метанового и азотно-метанового типа.

Гидрогеологическая изученность водовмещающих комплексов в целом неравномерна, и весьма ощутимый недостаток такой информации существует по соленосной гидрогеологической формации, которая ранее не рассматривалась в качестве основного объекта поисков залежей и поэтому зачастую проходила без опробования. В гидродинамическом отношении разрез соленосной формации по вертикали является переходной зоной от активного водообмена, к затрудненному, характерному для подсолевой формации. И вероятно поэтому для него может быть свойственна гидравлическая форма передачи давления.

Как свидетельствуют материалы последних лет Кембрийский НГК во многом недоразведан и перспективы его, вероятно, будут существенно уточняться в процессе проведения нефтегазопоисковых работ в сторону увеличения. Потенциал комплекса не реализован. В пределах Непско-Ботуобинской антеклизы, на Бахчинском ЛУ в 2015 г. в скважине 156-2П при

испытании карбонатных коллекторов олекминской и нижнетолбачанской свиты нижнего кембрия получен приток газа с конденсатом и нефтью ($Q_{г+н}=32,3$ тыс.м³/сут; $Q_{к+н}=2,2$ м³/сут, шайба 8 мм). В скважине 680-1П при испытании карбонатных коллекторов чарской свиты нижнего кембрия получен слабый приток газа ($Q_{г}=6,8$ тыс.м³/сут. Ø4/8 мм), при испытании карбонатных коллекторов нижнетолбачанской свиты получен приток газа ($Q_{г}=20,6$ тыс.м³/сут Ø4/12мм).

На северном склоне Алданской антеклизы открыто Мухтинское газовое месторождение. Здесь при относительно неглубоком залегании, до 1100 м, газовой залежи пластовое давление значительно выше гидростатического (14,6 МПа), является ли это положительным фактором для установленной зоны нефтегазонакопления, или характеризует жесткую ограниченность открытой залежи. Вопрос необходимо рассматривать в сопоставлении с результатами гидрогеологического опробования соседних структур, выбор определялся достоверностью и полнотой данных полученных при опробовании, для удобства сравнения представлены в табличном виде (таблица 1).

В **Сыгдахской скважине № 410** отложения водоносного комплекса вскрыты в составе толбачанской (322м) и эльгянской (69 м) свит в интервале 3316-3707 м. В процессе бурения интервала наблюдались интенсивные газопроявления, скважина переливала водой уд. веса 1,29 – 1,30 г/см³ с растворенным газом дебитом на устье 18-20 м³/сут. Статическое давление на устье закрытой скважины установилось за 24 часа и составило 16 атм. Расчетное пластовое давление на глубине 3660 м составляет 485 кг/см². Пластовая вода с минерализацией 427 г/л. Содержание брома в пластовой воде 2,407 г/л; йода – 0,030 г/л. ГВС: УВ-газов 45-60 %, азота 40-55 %.

В **Усть-Мархинской скважине № 1** отложения толбачанской свиты вскрыты на глубине 3816 м, вскрытая мощность отложений 194 м, забой скважины находится в отложениях свиты на глубине 4010 м. Интервал исследования 3874-3942 м (-3751,7 - -3819,6) КИИ-2М-146, с двумя пакерами. Дебит пластовой воды при самоизливе на устье скважины составил 17,3 м³/сут., удельный вес пластовой воды 1,34 г/см³. КВД в течении 4 часа 15 мин., давление через 1 час 45 мин. возросло до 7 атм и сохранялось в течении 2,5 час. Расчетное пластовое давление составило 524,9 кг/см² на глубине 3865 м. Пластовая температура, определенная максимальным термометром на глубине 3932 м составила +63,8. Газ горючий, содержит шесть компонентов от метана до гексана включительно. Минерализация пластовой воды 467 г/л, тип воды хлоркальциевый, с содержанием брома 2,59 кг/м³, йода 0,092 кг/м³.

Таблица 1 – Вертикальные градиенты пластовых давлений в отложениях соленосной гидрогеологической формации, кембрийский НГК, (северо-запад Алданской антеклизы, Вилюйская синеклиза)

| Структура, № скважины | интервал испытания м | давление пласт. Р кг/см ² | t пласт. градус С | Глубина замера, м Н | уд. вес воды г/см ³ / минерализация г/л | Вертикальный градиент Р (кг/см ² /10м) Р/Н |
|-----------------------|----------------------|--------------------------------------|-------------------|---------------------|--|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Сыгдахская № 410 | 3583 - 3669 | 485 | +50 | 3660 | 1,3 / 427 | 1,32 |
| Усть-Мархинская № 1 | 3874 – 3942 | 524,9 | +63,8 | 3932 | 1,34 / 467 | 1,33 |
| Мухтинская № 2210 | 1088 - 1107 | 151,03 | +8 | 1095 | Газ, | 1,38 |

Основываясь на данных, представленных в таблице 1, в рамках простых логических умозаключений без предвзятости к сугубо формальным признакам, можно утверждать что, главной причиной, определяющей величины пластовых давлений на рассматриваемой территории является гравитационная составляющая водонапорной, рассолоносной системы кембрийского НГК. Сделать такой вывод подсказывает сравнение значений по удельному весу

пластовой воды (столбец 6) и вертикального градиента пластового давления (столбец 7). Иными словами природа пластовых давлений является гидростатической, величина этих давлений определяется весом столба пластового флюида, обеспечивающим гидравлическую связь в рамках соленосной формации. Таким образом, в действительности, приведенные значения пластовых давлений, с точки зрения концептуальных положений артезианской теории, характеризуют не гидрогеологическую изолированность территории, а могут указывать на открытость, возможность свободного водообмена и гидродинамическое единство всех пород осадочного чехла.

По классической схеме водонапорные системы в явной или скрытой форме должны иметь область питания или создания напора, область транзита и область разгрузки. Между областями питания и разгрузки располагается условного вида гидравлическое пространство, в котором значения пластовых давлений в флюидах, "определяются исключительно весом столба жидкости, а также и потерями напора, если жидкость движется" (Гуревич А.Е., 1969).

По материалам исследований А.А. Граусмана, а также по представлениям других авторов, на работы которых он ссылается в своей публикации, зона гидростатических пластовых давлений способна распространяться на глубины 2-3 км, а при благоприятных условиях режим инфильтрационного типа может существовать до глубины 5-6 км. Максимальная глубина возможной гидравлической связи глубинных вод с поверхностными водами по порам и трещинам оценивается примерно в 6 км [4].

3. Заключение

Проблеме формирования пластовых давлений в геогидродинамических системах осадочного чехла и движению глубокозалегающих подземных вод посвящено большое число работ. К настоящему времени накоплен огромный фактический материал по замерам пластовых давлений в водоносных горизонтах осадочного чехла. Фрагментарное рассмотрение гидродинамики пластовых систем водоносных комплексов под конкретную задачу не всегда может обеспечить объективность получаемых результатов. Для формирования обновленных представлений, в частности, о гидродинамической зональности подземных вод для условий Сибирской платформы необходимы современные масштабные и комплексные исследования.

4. Литература

- [1] Pogodaev A.V. The influence of the abnormally high reservoir pressure regime on the conditions of formation and preservation of gas deposits in the Upper Permian deposits of the Napchagai megawall // Oil and gas geology. Theory and practice. – 2018. – Vol. 13. – No. 4
- [2] Pogodaev A.V., Sevostyanova R.F. Hydrodynamic conditions of deposits of the subsalt hydrogeological formation of the Nepsko-Botuobinskaya anteklise (on the example of the Verkhnevilyuchansky deposit) // Geology and mineral resources of the North-East of Russia: Materials of the XII All-Russian Scientific and Practical Conference (Yakutsk, March 23-25, 2022). – Yakutsk: Publishing House: Northeastern Federal University named after M.K. Ammosov, 2022. – P. 544-548.
- [3] Pogodaev A.V., Matveev A.I. Preliminary results of deep exploratory drilling on the north-western slope of the Aldan anteklise // Geology and oil and gas potential of the Republic of Sakha (Yakutia): problems of exploration and development [Electronic resource]: collection of abstracts of the All-Russian Scientific Conference / Yakutsk, (August 11, 2022, Yakutsk). – Kirov: Publishing House of ICITO, 2022. – P. 79-80. DOI: 10.52376/978-5-907623-22-4
- [4] Grausman A.A. On the nature of pressures in fluid systems of sedimentary basins.// Geology of oil and gas. – 1999. – № 11-12. – P. 49-56.

**ТИПОХИМИЗМ И ЗОЛОТОНОСНОСТЬ ПИРИТА И АРСЕНОПИРИТА
ИЗ МЕТАСОМАТИТОВ ОРОГЕННЫХ ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ВЕРХОЯНО-КОЛЫМСКОЙ ПРОВИНЦИИ**

Лена Полуфунтикова^{2,1}, Валерий Фридовский¹, Максим Кудрин¹, Ярослав Тарасов¹

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

**TYPOCHEMISTRY AND GOLD CONTENT OF PYRITE AND ARSENOPYRITES
FROM METASOMATITES OF OF OROGENIC GOLD DEPOSITS
OF THE VERKHOYANO-KOLYMA PROVINCE**

Lena Polufuntikova^{2,1}, Valery Fridovsky¹, Maxim Kudrin¹, Yaroslav Tarasov¹

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

Annotation. The results of studying the chemical composition of pyrite (Py₃) and arsenopyrite (Apy₁) from metasomatites of orogenic deposits of Verkhoyano-Kolyma province are presented and the interrelations between mineral-forming and impurity elements in connection with their gold content are analyzed. Typomorphic features and specific features characteristic of Py₃ and Apy₁ of early and late rhogenic gold deposits of the southern sector of the Allahun metallogenic zone and the central sector of the Yano-Kolyma metallogenic belt are identified.

1. Введение

Сульфидная минерализация из проксимальных метасоматитов изучена на орогенных золоторудных месторождениях южного сектора Аллах-Юньской металлогенической зоны (Булар, Дуэт, Оночолох, Хотунское, Маринское) и центрального сектора Яно-Колымского металлогенического пояса (Мало-Тарынское, Бадран, Хангаласс, Вьюн, Шумный). Она представлена ассоциацией пирит (±пирротин) + арсенопирит. Пирротин присутствует в незначительных количествах в виде отдельных микровключений во вмещающих породах, в пирите и арсенопирите. Метасоматическая ассоциация пирит+арсенопирит наиболее значимая и проявлена на всех изученных объектах. Нами изучены типоморфные особенности метасоматических пирита (Py₃) и арсенопирита (Apy₁) и проанализированы взаимосвязи между минералообразующими и примесными элементами в связи с их золотоносностью, что важно при переоценки ресурсного потенциала известных орогенных месторождений на территории Верхояно-Колымской провинции.

Химический состав пирита и арсенопирита определялся по стандартной методике рентгеноспектральным методом на микроанализаторе Camebax-Micro (ИГАБМ СО РАН).

2. Результаты исследований

Для раннеорогенных месторождений Булар, Дуэт, Оночолох, Хотунское южного сектора Аллах-Юньской металлогенической зоны (ЮС АЮМЗ) характерно преобладание арсенопирита₁ (Apy₁), короткопризматической и ромбовидной формы размером от долей до 2-5 мм, реже до первых см. Пирит₃ (Py₃) формирует редкую вкрапленность кристаллов кубической формы размером до 1,0 мм. На познеорогенных месторождениях центрального сектора Яно-Колымского металлогенического пояса (ЦС ЯКМП) главным рудным минералом проксимальных метасоматитов является Py₃ кубической и пентагондодекаэдрической формы размером от 1-1.5 мм до 2-3 мм, для интрузивных тел (дайки месторождений Вьюн и Шумный)

характерны метакристаллы размером до 5 мм. Ару1 имеет призматическую форму и размер от долей до 1-1,5 мм.

Пирит3 из метасоматитов всех изученных месторождений имеет нестехиометрический состав ($S/Fe= 1.88-2.13$), что характерно для золотоносного пирита [2, 3]. Степень отклонения от стехиометрии на ранне- и позднеорогенных объектах различна, что влияет на механизм изоморфного замещения в кристаллической решетке и вхождение в состав сульфидов элементов-примесей. Содержание Fe изменяется в достаточно широких пределах (рис.1., А), на одном объекте наблюдается как его дефицит, так и избыток. Пирит3, в основном, характеризуется дефицитом S, который компенсируется примесью As (рис.1, Б, В).

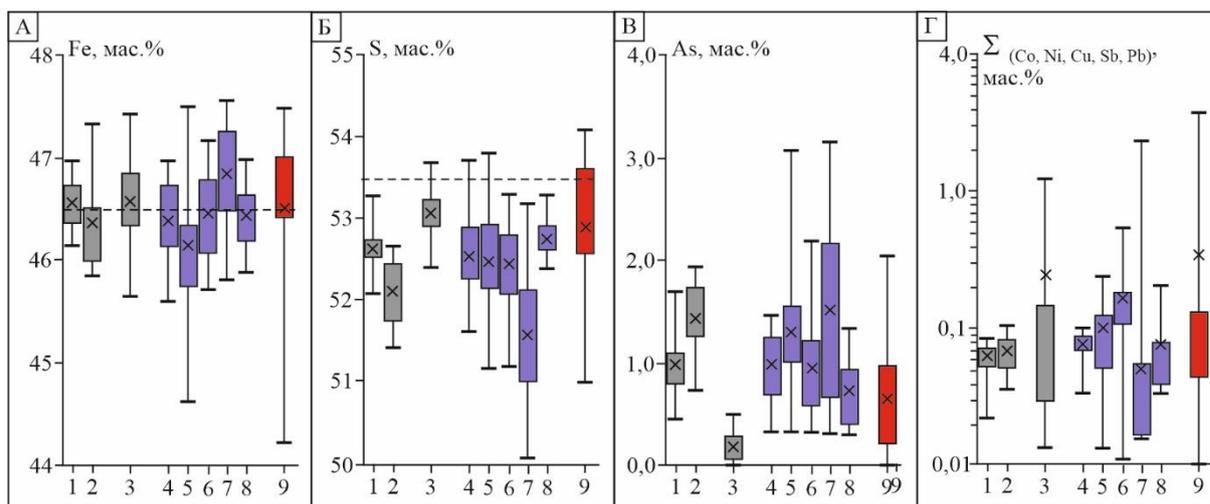


Рисунок 1 – Вариации состава пирита из метасоматитов орогенных золоторудных месторождений ЮС АЮМЗ (1 – Дуэт; 2 – Оночолох; 3 – Маринское) и ЦС ЯКМП (4 – Мало-Тарынское; 5 – Бадран; 6 – Хангаласс; 7 – Вьюн (песчаники и алевролиты); 8 – Шумный (песчаники и алевролиты); 9 – Вьюн, Шумный (дайки)). Линии Fe=46.55 мас. % и S=53.45 мас. %, соответствуют стехиометрическому составу пирита. Нижняя граница метки X в прямоугольниках обозначают среднее значение, а нижняя и верхняя части каждого прямоугольника обозначают соответственно первый и третий квартили.

Индикаторной примесью пирита является As. Его содержание в метасоматическом пирите достигает 2-3 мас. %. Типоморфными примесями, присутствующими в количествах выше предела обнаружения ЕРМА анализа являются Co, Ni, Cu, Sb, реже Pb (рис. 1, Г), преобладают зерна с $\Sigma (Co, Ni, Cu, Sb, Pb) < 0,15\%$. Для раннеорогенных месторождений ЦС АЮМЗ отмечается меньшая вариативность в содержании главных элементов, а содержания As не превышают 2,0 мас.%. В объеме кристаллов отмечается секториальность распределения As и присутствие безмышьяковистых участков как в центральной, так и краевой частях. Для позднеорогенных месторождений ЦС ЯКМП характерна значительная изменчивость состава минералообразующих элементов и значимая роль элементов-примесей. Содержание As в 90% замеров превышает 0,5 мас.% и максимальные значения достигают 3,0 мас.%. Характерно зональное распределение примеси As: центральная (C_{As} до 3.07%), промежуточная ($C_{As} < 2.0\%$) и краевая (C_{As} до 2.20%) зоны. В Py3 прослеживается обратная корреляция между содержаниями S и As, которая иллюстрирует механизм вхождения As в структуру пирита путем изоморфного замещения $S \rightarrow As^{1-}$ (рис. 2, А). На всех изученных объектах Co является постоянной примесью в Py3. В Py3 из раннеорогенных месторождений $C_{Co}=0,02-0,08$ мас. % ($V_{\sigma} = 28-39$), а из позднеорогенных месторождений диапазон изменчивости концентраций более широкий ($C_{Co}=0,01-0,21$ мас.%), достигая на Маринском месторождении 1,23 мас.%. Для Py3 раннеорогенных месторождений соотношения $Ni/Co < 1.0$ (рис. 2, Б), что характеризует пирит с низкой проводимостью и вероятностью вхождения в его состав изоморфных примесей Au [4]. Для позднеорогенных месторождений ЦС ЯКМП в 20% анализов $Ni/Co > 1.0$, что является положительным критерием золотоносности Py3.

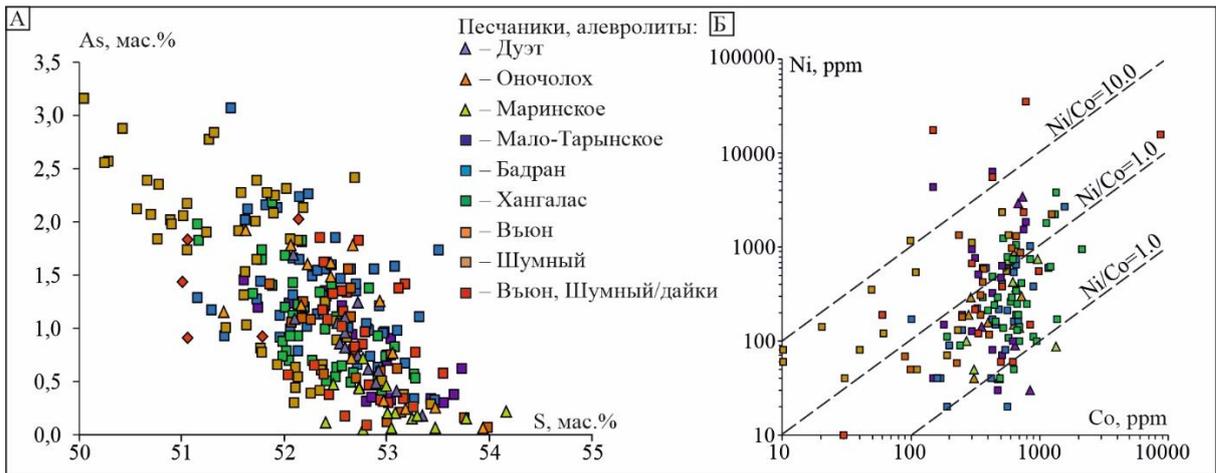


Рисунок 2 – Диаграммы, показывающие взаимосвязь между главными и индикаторными элементами-примесями в РуЗ.

А – соотношение содержаний S и As; Б – диаграмма соотношений концентраций Ni и Co.

Для арсенопирита из проксимальных метасоматитов орогенных золоторудных месторождений ЮС АЮМЗ и ЦС ЯКМП характерна нестехиометричность составов и большие вариации содержаний Fe, S и As (рис. 3, А-В). Типоморфными примесями, присутствующими в количествах выше предела обнаружения ЕРМА анализа являются Co, Ni, Cu и Sb (рис. 2, Г) и 70% замеров Σ (Co, Ni, Cu, Sb, Pb) $< 0,15\%$. Все изученные арсенопириты характеризуются избытком S и дефицитом As с устойчивой обратной корреляционной связью между этими элементами (r от $-0,80$ до $-0,98$) (рис. 4, А). При этом, дефицит As наиболее отчетливо проявлен в Ar_{u1} раннеорогенных месторождений ($S/As=1,11-1,41$), а среди арсенопиритов позднеорогенных месторождений отмечаются зерна с содержанием мышьяка близким к стехиометрическому.

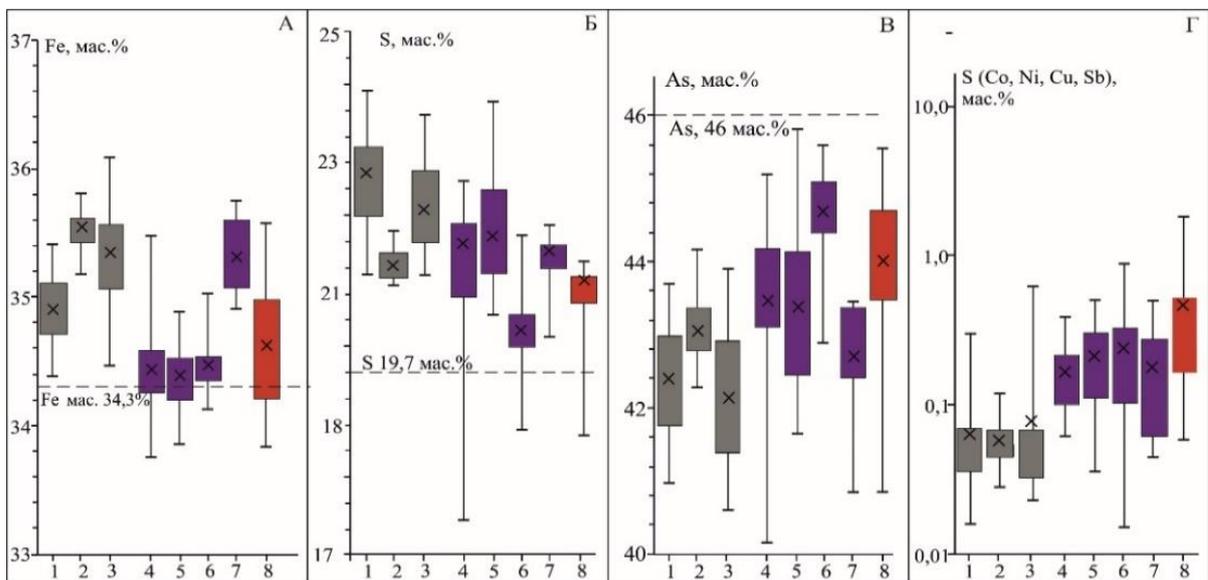


Рисунок 3 – Вариации состава арсенопиритав из метасоматитов орогенных золоторудных месторождений ЮС АЮМЗ (1 – Хотунское; 2 – Булар; 3 – Оночолох) и ЦС ЯКМП (4 – Хангалас, 5 – Бадран, 6 –; Мало-Тарынское, 7 – Вьюн (песчаники и алевролиты), 8 – Вьюн (дайки)). Линии Fe 34,3%, S 19,7%, As 46,0% соответствуют стехиометрическому составу арсенопирита. Нижняя граница метки X в прямоугольниках обозначают среднее значение, а нижняя и верхняя части каждого прямоугольника обозначают соответственно первый и третий квартили.

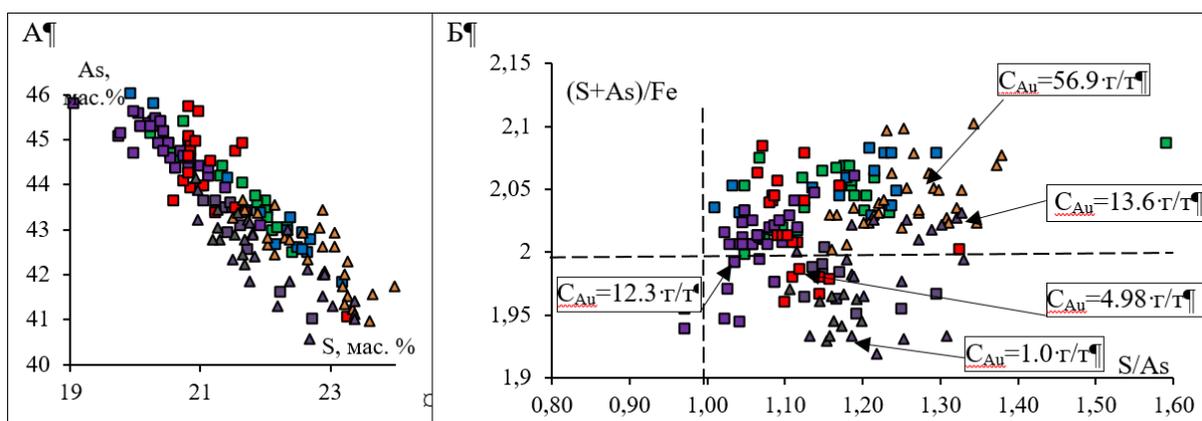


Рисунок 4 – Диаграммы, показывающие взаимосвязь между главными элементами в Au_3 . А – соотношение содержаний S и As; Б – соотношений S/As и (S+As)/Fe. Пересечение линий S/As=1 и (S+As)/Fe=2 соответствует химической стехиометрии [6]. Условные обозначения смотри на рис. 2.

Для арсенопирита 1 из позднеорогенных золоторудных месторождений ЦС ЯКМП характерно близстехиометрическое содержание Fe. Дефицит железа в кристаллической решетке компенсируется за счет изоморфных примесей Co, Ni, а также Au. Обедненность железом золотоносных арсенопиритов и вероятность замещения железа золотом отмечались [5, 6, 7]. В нашей недавней работе [8] была показана обратная зависимость Au и Fe в Au_3 месторождения Хангалас, при повышенных содержаниях $Au > 2$ г/т была установлена сильная обратная корреляция ($r=-0.9$), а при содержаниях $Au < 1$ г/т – корреляция отсутствует ($r= -0.18$). Эти данные подтверждают ранее установленное на примере месторождения Хангалас изоморфное замещения $Fe \rightarrow Au$ в структуре арсенопирита [8]. Для арсенопирита из раннеорогенных золоторудных месторождений ЮС АЮМЗ характерен избыток Fe, малые количества элементов-примесей и их низкая золотоносность (рис. 4, В).

3. Выводы

Анализ химического состава сульфидов метасоматической ассоциации позволил выделить типоморфные признаки и специфические особенности, характерные для Pu_3 и Au_1 ранне- и позднеорогенных золоторудных месторождений ЮС АЮМЗ и ЦС ЯКМП.

Для Pu_3 ранне- и позднеорогенных месторождений характерен нестехиометрический состав ($S/Fe= 1.88-2.13$) и дефицит S (за редким исключением), который компенсируется примесью As. Типоморфными примесями пирита, присутствующими в количествах выше предела обнаружения ЕРМА анализа являются As, Co, Ni, Cu, Sb, реже Pb. Индикаторной примесью является As, максимальные концентрации которого фиксируются в Pu_3 позднеорогенных месторождений (C_{Au} до 3,0 мас.%). В Pu_3 установлена устойчивая отрицательная корреляционная связь $S \rightarrow As$ (Au), что может указывать на возможность их изоморфного замещения. Значения отношения Ni/Co в пирите 3 из позднеорогенных месторождений ЦС ЯКМП характерны для пирита с повышенной проводимостью и золотоносностью.

Арсенопирит 1 из раннеорогенных месторождений ЮС АЮМЗ имеет нестехиометрический состав ($S/As=1,11-1,41$), избыток Fe и S, дефицит As (рис. 4, В). Состав Au_1 из позднеорогенных месторождений ЦС ЯКМП характеризуется меньшим отклонением от стехиометрии и повышенной золотоносностью (C_{Au} до 160 ppm). Обогащение Au_1 из раннеорогенных месторождений ЮС АЮМЗ серой свидетельствует о его кристаллизации при более высокой температуре и летучести S и, как следствие, низкой золотоносности. Типоморфными примесями арсенопирита, присутствующими в количествах выше предела обнаружения ЕРМА анализа являются As, Co, Ni, Cu и Sb, но на раннеорогенных месторождениях их сумма редко превышает 0,1 мас. %. Характер корреляционных связей между минералообразующими элементами и элементами-примесями указывает на устранение дефицита As за счет избыточного содержания S, а недостаток Fe в кристаллической решетке компенсируется за счет изоморфных примесей Co, Ni, а также Au.

4. Благодарности

Исследование выполнено по плану НИР ИГАБМ СО РАН (№ темы FUEM-019-004).

5. Литература

- [1] Voroshin S.V. Tyukova E.E., Composition and paragenesis of arsenopyrite in deposits and host rocks of the Upper Kolyma region (to interpret the genesis of sulfide associations)// SVKNII FEB RAS. – Magadan, 2007. – 107 p. (translated from English).
- [2] Belikova, G.I.; Salikhov, D.N.; Berdnikov, P.G. On the question of gold isomorphism in pyrite // Geol. Collect. GI USC RAS, 2002. – 3. – P. 190-193. (translated from English).
- [3] Novogorodova M.I., Gamyarin G.N., Tsepina A.I. Typomorphism of gold-bearing sulfides and their mineral associations // New data on the typomorphism of minerals. – Moscow: Nauka, 1980. – P. 44-57. (translated from English).
- [4] Large, R.R.; Maslennikov, V.V. Invisible Gold Paragenesis and Geochemistry in Pyrite from Orogenic and Sediment-Hosted Gold Deposits // Minerals. – 2020. – 10. – 339. URL: <https://doi.org/10.3390/min10040339>.
- [5] Fleet M.E., Mumin A.H. Gold-bearing arsenian pyrite and marcasite and arsenopyrite from Carlin Trend gold deposits and laboratory synthesis // Amer. Miner. – 1997. – v. 82. – P. 182-193
- [6] Kovalev, K.R.; Kalinin, Y.A.; Naumov, E.A.; Kolesnikova, M.K.; Korolyuk, V.N. Gold content of arsenopyrite of gold-sulfide deposits of East Kazakhstan // Geol. Geophys. – 2011. – 52. – P. 225–242 (translated from English).
- [7] Sazonov, A.M.; Kirik, S.D.; Silyanov, S.A.; Bayukov, Y.A.; Tishin, P.A. Typomorphism of arsenopyrite of the Blagodatnoye and Olympiada gold deposits (Yenisei Ridge) // Mineralogy. – 2016. – 3. – P. 53-70. (translated from English)
- [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. – 11. – 403 p. <https://doi.org/10.3390/min11040403>.

**МИНЕРАЛЫ МАНТИЙНЫХ КСЕНОЛИТОВ ИЗ ОБЛОМКА КИМБЕРЛИТА,
НАЙДЕННОГО В РАЙОНЕ РЕКИ СИВИКАГНА**

Людмила Похиленко¹, Валентин Афанасьев¹, Николай Похиленко^{1,2}, Владимир Королук¹,
Николай Карманов¹

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

**MINERALS OF THE MANTLE XENOLITHS FROM A KIMBERLITE PIECE
FOUND IN THE AREA OF THE SIVIKAGNA RIVER**

Lyudmila Pokhilenko¹, Valentin Afanasiev¹, Nikolay Pokhilenko^{1,2}, Vladimir Korolyuk¹,
Nikolay Karmanov¹.

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

2 Novosibirsk State University, 2, Pirogova st., Novosibirsk, 630090, Russia

Annotation. The mineralogy of xenolith and microxenolith from a kimberlite fragment found in the area of the Sivikagna River on the surface of tuffs has been studied. No kimberlite bodies have been found in this area before, so this find is of not only mineralogical, but also exploration interest. The studied rocks, initially of different parageneses, were subsequently subjected to early phlogopitization, late serpentinization and chloritization. These events testify to the repeated impact of aqueous fluid on this mantle block. Two inclusions of rare-metal silicates in the fissured amphibole of the xenolith are considered as a result of multi-stage carbonatite influence on the rock before being captured by kimberlite.

1. Введение

Река Сивикагна является левым притоком Нижней Тунгуски и находится в пределах мезозойского вулканогенно-осадочного комплекса (Рисунок 1). Нами исследован образец, представляющий собой обломок кимберлита с мантийным ксенолитом, обнаруженный в маршруте на поверхности туфов. Образец любезно предоставлен нам из коллекции В. П. Губаревой, работавшей на этой территории в 1990-1991 гг. Находка сама по себе уникальна, так как кимберлитовые тела в данном районе не зафиксированы. На основании изучения этого образца, а также по другим материалам этого района (образец офиолита, индикаторные минералы кимберлитов, найденные в 1977-1980 гг. в процессе геологической съемки масштаба 1:50000 на восточном борту Тунгусской синеклизы в бассейне реки Большая Сивикагна) готовится специальная статья. Здесь мы представляем узкое детальное исследование минералогии данного мантийного ксенолита, а также микроксенолита, обнаруженного при химическом анализе минералов кимберлита. Анализ проведен с помощью электронного микроскопа JEOL JXA-8100 (JEOL, Токио, Япония) и с использованием сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA3 LMU, оснащенного Oxford Instruments INCA-450, в «Центре коллективного пользования научным оборудованием много-элементных и изотопных исследований СО РАН» (г. Новосибирск, ИГМ). Методики анализа подробно описываются в работах [1,2].

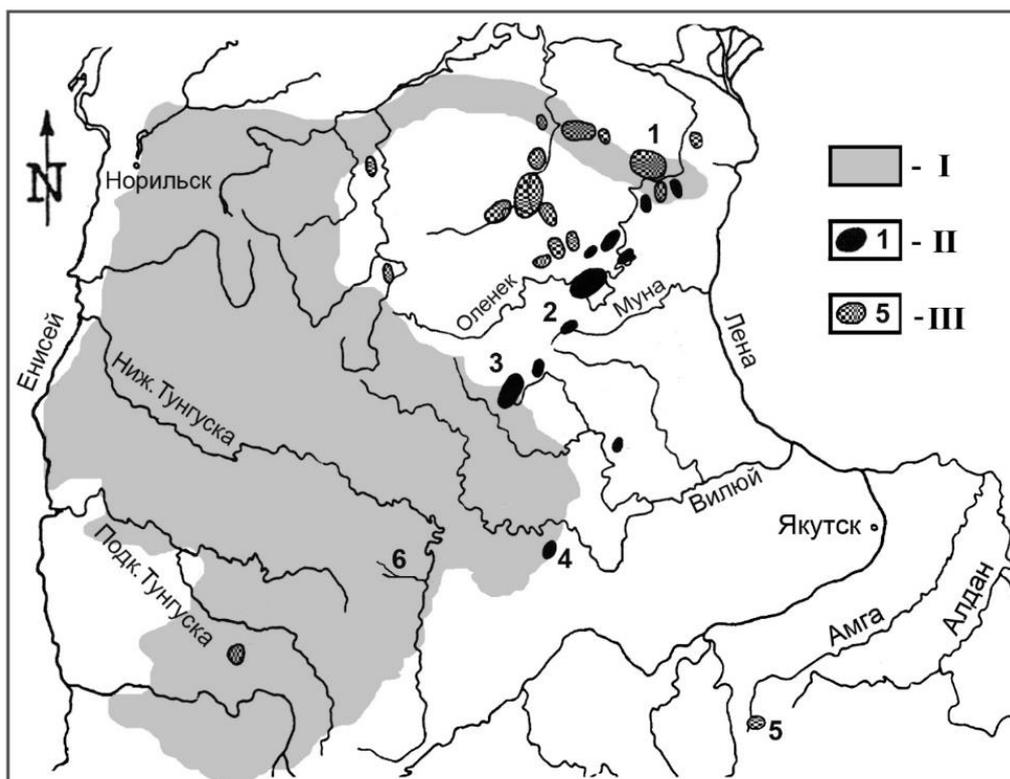


Рисунок 1 – Обзорная карта Сибирской платформы.

I – мезозойский вулканогенно-осадочный комплекс, включающий породы трапповой формации и послетрапповые осадочные образования; II – кимберлитовые поля среднепалеозойского возраста; III – кимберлитовые поля мезозойского возраста. 1 – Беенчиме-Куойкское поле, 2 – Верхнемунское поле, 3 – Далдыно-Алаakitский алмазоносный район, 4 – Мирнинское поле, 5 – Чомполинское поле (дайка Алданская), 6 – р.Сивикагна.

2. Минералогия мантийного ксенолита и микроксенолита

Мантийный ксенолит (Кс) размером $\sim 2.5 \times 2.5 \times 2 \text{ см}^3$, являющийся представителем ряда клинопироксенит–верлит, местами обогащен гранатом (Рисунок 2а,б). Минералы в ксенолите распределены очень неравномерно. По клинопироксену обильно развивается амфибол, в трещинах оливина отмечается серпентин. В амфиболе встречаются пластины флогопита в сростании с кристаллами шпинели. Микроксенолит (Мк) размером $1.7 \times 0.8 \text{ мм}^2$ обнаружен в одной из изучаемых пластин при анализе минералов вмещающего кимберлита (Рисунок 2б,в). Мк представлен сростками клинопироксена и флогопита с вкрапленностью хромита; заметно серпентинизирован.



Рисунок 2 – Ксенолит и микроксенолит в обломке кимберлита, найденного в районе р. Сивикагна: (а) – аншлиф с обогащенным гранатом участком ксенолита; (б) – пластина с амфиболитизированной частью ксенолита и скоплениями оливина на границе с кимберлитом; (в) – микроксенолит в кимберлите, фото сканирующего электронного микроскопа в режиме обратно-рассеянных электронов.

Клинопироксен в Кс ярко-зеленого цвета. Зерна (реликты зерен) размером до 200 мкм сильно растресканы и большей частью замещены амфиболом. Состав однородный. Реликты зерен Мк имеют размер, аналогичный размеру зерен пироксена из Кс, и также однородный состав (Таблица 1), однако несколько отличный по трехвалентным катионам. Средние значения Al_2O_3 в мас.% составляют для пироксенов из Кс и Мк 1.79 и 0.55, соответственно, Cr_2O_3 – 1.50 и 2.47, соответственно. На классификационном треугольнике клинопироксены из Кс и Мк располагаются в поле Авгита (Рисунок 3).

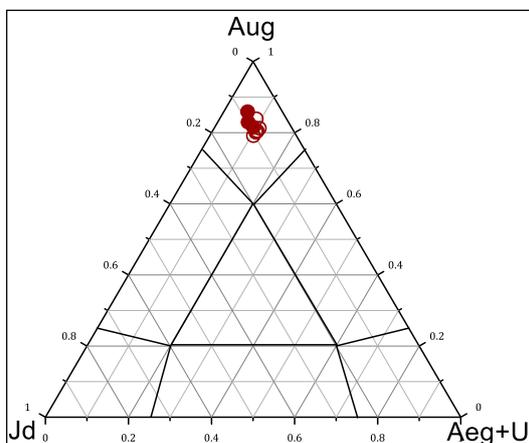


Рисунок 3 – Классификационный треугольник Эгирина-Авгита-Жадита, где Aeg – эгирин ($NaFe^{3+}Si_2O_6$), U – юриит ($NaCrSi_2O_6$), Aug – авгит ($CaMgSi_2O_6 + FeMgSi_2O_6 + Mg_2Si_2O_6 + Fe_2Si_2O_6$), Jd – жадит ($NaAlSi_2O_6$). Кружки закрашенные – клинопироксены ксенолита; кружки полые – клинопироксены микроксенолита.

Оливин в Кс бесцветный. Изометричные зерна размером 50-200 мкм имеют однородный состав (Таблица 1) и содержат трещины, заполненные серпентином. В отдельных зернах встречаются редкие ламели шпинели.

Гранат в Кс темно-розовый. Зерна размером до 3 мм образуют скопления в безоливиновой части образца; в других частях встречаются единичные зерна, реже – сростки зерен до 0.7 мм с ламелями рутила. Состав граната однородный (Таблица 1). На диаграмме Cr_2O_3 –CaO [3] он попадает в поле малохромистых лерцолитов, где также располагаются гранаты пироксенитов.

Шпинель различной морфологии и широкого спектра составов обнаружена в Кс. Шпинель присутствует в виде мелкой вкрапленности в амфиболе, сростков с флогопитом, ламелей в оливине и флогопите. Наиболее широкие вариации демонстрируют Al_2O_3 и Cr_2O_3 (9 – 44 и 24.5 – 55 мас.%, соответственно), FeO и MgO варьируют в меньшей степени (12.5 – 23.5 и 11 – 19 масс.%, соответственно).

Шпинель из Мк представлена вкрапленностью октаэдрических зерен во флогопите; размер зерен до 20 мкм. По составу эта шпинель резко отличается от шпинели из Кс, прежде всего, большей хромистостью, высокой титанистостью и практически полным отсутствием глинозема (Таблица 1, Рисунок 4).

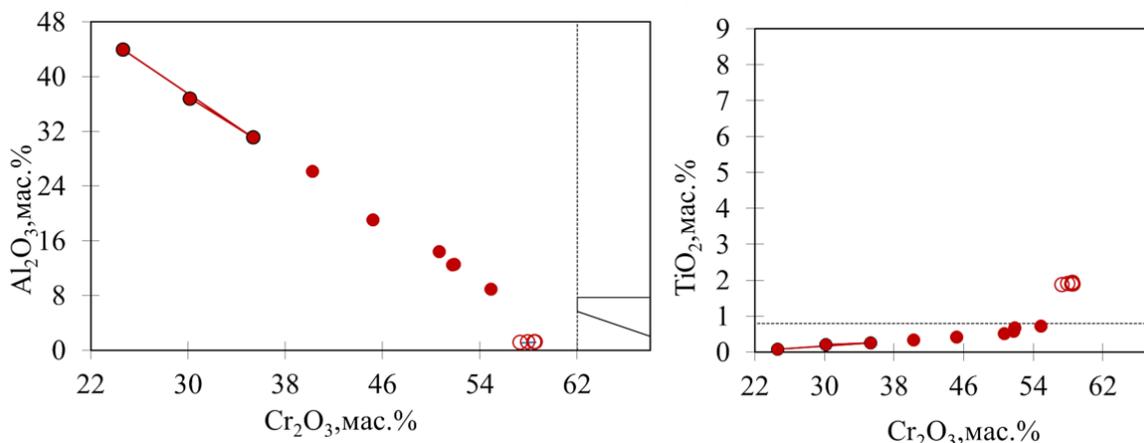


Рисунок 4 – Диаграммы составов шпинелей из ксенолита и микроксенолита. Кружки закрашенные – клинопироксены ксенолита; кружки полые – клинопироксены микроксенолита; составы одного зонального зерна соединены линиями.

Амфибол в Кс травянисто-зеленый. Образует ламели в клинопироксене, замещает его частично или полностью, занимая большие площади образца. Вариации состава по Al_2O_3 , Cr_2O_3 , MgO незначительны (9–11.5, 1.5–2, 19.5–21 мас.%, соответственно). Согласно пересчету составов [4], это Са-амфибол эденит-паргаситового ряда. Составы даны в Таблице 2.

Флогопит в Кс проявляется в виде отдельных пластин размером до 500 мкм. Встречаются редко. Более мелкие пластины образуют сростания со шпинелидом. Крупные пластины содержат ламели шпинели и часто имеют отличную по составу краевую зону (Таблица 2). Пластины флогопита из Мк составляют 50% образца. Самые крупные из них достигают 200 мкм. Содержат вкрапленность кристаллов шпинели, описанных выше.

Редкометалльные силикаты обнаружены в Кс (Рисунок 5). Два включения сложного минерального состава найдены в трещиноватом амфиболе. Первое, размером 160×60 мкм², зональный с прожилком, состав которого ближе всего к составу монацита. Второе значительно меньшего размера (примерно 40×15 мкм²) отстоит от первого на 200 мкм. Предварительный анализ на сканирующем электронном микроскопе близок к пересчету спектра с электронного микрозонда. В Таблице 3 приводятся нормализованные результаты разных зон включения 1 и анализ включения 2.

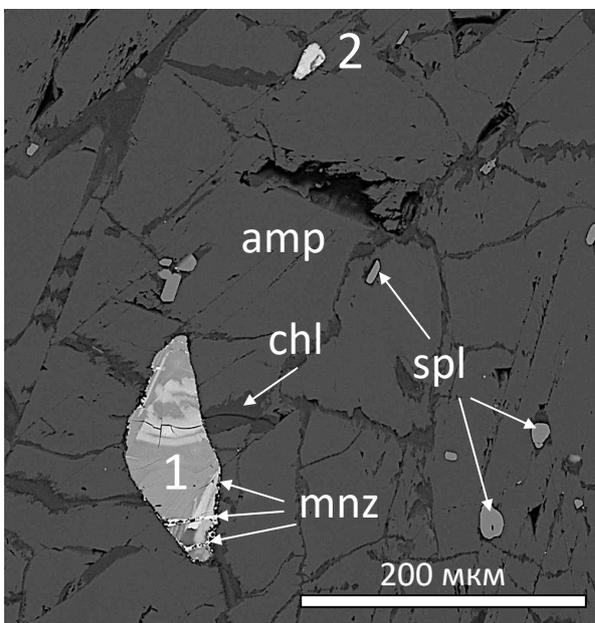


Рисунок 5 – Редкометалльные силикаты (1,2) с прожилками монацитового (mnz) состава в трещиноватом амфиболе (amp) с вкрапленностью шпинели (spl). Трещины в амфиболе заполнены хлоритом (chl). Отчетливо видна хаотичная зональность крупного зерна (1). Изображение в обратно-рассеянных электронах.

Таблица 1 – Химический состав породообразующих минералов ксенолита и микроксенолита из обломка кимберлита, найденного в районе р. Сивикагна, мас. %.

| Mineral | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Cr ₂ O ₃ | FeO | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | NiO | Rb ₂ O | Total |
|----------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------------------|------------------|-------|-------------------|-------|
| Срх Кс | 54.38 | 0.131 | 2.128 | 1.578 | 2.130 | 0.082 | 16.03 | 21.35 | 2.049 | 0.007 | 0.015 | н.о | 99.9 |
| Срх Кс | 54.52 | 0.119 | 1.368 | 1.331 | 2.001 | 0.088 | 16.18 | 22.15 | 1.487 | 0.003 | 0.028 | н.о | 99.3 |
| Срх Кс | 54.70 | 0.105 | 1.861 | 1.582 | 2.142 | 0.090 | 15.98 | 21.63 | 1.836 | 0.022 | 0.002 | н.о | 100 |
| *Срх Мк | 55.73 | 0.00 | 0.30 | 2.15 | 2.16 | н.о | 16.32 | 23.02 | 1.56 | н.о | н.о | н.о | 101.2 |
| *Срх Мк | 55.79 | 0.00 | 0.47 | 2.46 | 2.24 | н.о | 16.05 | 22.37 | 2.01 | н.о | н.о | н.о | 101.4 |
| *Срх Мк | 54.02 | 0.23 | 0.43 | 2.50 | 2.23 | н.о | 15.67 | 22.19 | 1.77 | н.о | н.о | н.о | 99.0 |
| *Срх Мк | 55.15 | 0.00 | 0.89 | 2.67 | 2.37 | н.о | 15.59 | 21.97 | 2.08 | н.о | н.о | н.о | 100.7 |
| *Срх Мк | 55.49 | 0.00 | 0.45 | 2.59 | 2.42 | н.о | 16.05 | 22.09 | 1.95 | н.о | н.о | н.о | 101.1 |
| *Срх Мк | 54.58 | 0.00 | 0.77 | 2.46 | 2.25 | н.о | 15.52 | 22.23 | 1.98 | н.о | н.о | н.о | 99.8 |
| Ol Кс | 40.22 | 0.025 | 0.020 | 0.009 | 8.158 | 0.085 | 50.36 | 0.000 | 0.000 | 0.004 | 0.356 | н.о | 99.2 |
| Ol Кс | 40.75 | 0.017 | 0.004 | 0.003 | 8.261 | 0.126 | 50.81 | 0.006 | 0.000 | 0.000 | 0.292 | н.о | 100.3 |
| Grt Кс | 41.67 | 0.143 | 21.54 | 2.628 | 7.928 | 0.424 | 20.23 | 5.229 | 0.025 | 0.006 | 0.010 | н.о | 99.8 |
| Grt Кс | 41.59 | 0.137 | 21.64 | 2.546 | 8.469 | 0.454 | 20.10 | 5.112 | 0.018 | 0.002 | 0.000 | н.о | 100.1 |
| *Spl Кс | 0.34 | 0.57 | 12.43 | 51.77 | 22.31 | 0.49 | 10.9 | 0.21 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 99.0 |
| *Spl Кс | 0.00 | 0.68 | 12.51 | 51.89 | 22.9 | 0.00 | 11.03 | 0.25 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 99.3 |
| *Spl Кс | 0.00 | 0.52 | 14.45 | 50.66 | 19.79 | 0.52 | 12.9 | 0.2 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 99.03 |
| Spl Кс | 0.18 | 0.72 | 8.938 | 54.90 | 23.59 | 0.426 | 11.10 | 0.33 | 0.000 | 0.013 | 0.069 | н.о | 100.3 |
| Spl Кс | 0.05 | 0.33 | 26.12 | 40.24 | 18.40 | 0.276 | 14.45 | 0.00 | 0.047 | 0.062 | 0.091 | н.о | 100.1 |
| Spl Кс | 0.11 | 0.41 | 19.04 | 45.21 | 21.61 | 0.338 | 12.50 | 0.30 | 0.000 | 0.018 | 0.079 | н.о | 99.62 |
| Spl-z Кс | 0.00 | 0.21 | 36.83 | 30.14 | 16.61 | 0.242 | 16.24 | 0.01 | 0.044 | 0.010 | 0.109 | н.о | 100.5 |
| Spl-z Кс | 0.02 | 0.25 | 31.16 | 35.33 | 17.97 | 0.262 | 15.14 | 0.01 | 0.000 | 0.005 | 0.095 | н.о | 100.2 |
| Spl-z Кс | 0.07 | 0.09 | 43.99 | 24.63 | 12.56 | 0.157 | 18.80 | 0.02 | 0.000 | 0.002 | 0.087 | н.о | 100.4 |
| *Spl Мк | 0.00 | 1.88 | 1.15 | 58.61 | 29.11 | 0.54 | 8.69 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 100 |
| *Spl Мк | 0.26 | 1.92 | 1.15 | 58.54 | 29.11 | 0.65 | 8.59 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.46 | 100.7 |
| *Spl Мк | 0.00 | 1.87 | 1.08 | 57.37 | 28.43 | 0.00 | 8.66 | 0.00 | 0.00 | 0.17 | 0.00 | 0.43 | 98 |
| *Spl Мк | 0.00 | 1.88 | 1.15 | 58.49 | 28.75 | 0.48 | 8.67 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.36 | 0.00 | 99.8 |
| *Spl Мк | 0.26 | 1.90 | 1.17 | 58.00 | 29.33 | 0.52 | 8.18 | 0.00 | 0.00 | 0.16 | 0.00 | 0.00 | 99.5 |

Анализ проведен с использованием электронного микрозонда; * анализ проведен с использованием сканирующего электронного микроскопа. Н.о – не определялся. Spl-z – пятнисто-зональное зерно шпинели.

Таблица 2 – Химический состав амфибола и флогопита из ксенолита и микроксенолита из обломка кимберлита, найденного в районе р. Сивикагна, мас. %.

| | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Cr ₂ O ₃ | FeO | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | BaO | NiO | H ₂ O ⁺ | Total |
|----------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------------------|------------------|-------|-------|-------------------------------|-------|
| *Amp Кс | 45.89 | 0.00 | 10.68 | 1.97 | 3 | 0.00 | 19.65 | 10.51 | 4.21 | 0.48 | н.о | 0.00 | н.о | 96.38 |
| *Amp Кс | 45.5 | 0.38 | 11.2 | 2.06 | 3.19 | 0.00 | 19.77 | 10.45 | 4.15 | 0.49 | н.о | 0.00 | н.о | 97.21 |
| *Amp Кс | 45.42 | 0.35 | 10.35 | 1.96 | 3.09 | 0.00 | 19.77 | 10.35 | 4.07 | 0.48 | н.о | 0.00 | н.о | 95.84 |
| *Amp Кс | 45.76 | 0.43 | 10.66 | 1.65 | 3.1 | 0.00 | 19.49 | 10.27 | 4.12 | 0.41 | н.о | 0.00 | н.о | 95.89 |
| *Amp Кс | 47.39 | 0.47 | 10.18 | 1.49 | 3.4 | 0.00 | 20.76 | 10.26 | 4.18 | 0.52 | н.о | 0.39 | н.о | 99.03 |
| *Amp Кс | 47.32 | 0.4 | 10.24 | 1.36 | 3.28 | 0.00 | 20.41 | 10.44 | 4.15 | 0.39 | н.о | 0.00 | н.о | 97.99 |
| *Amp Кс | 47.54 | 0.38 | 10.39 | 1.33 | 3.24 | 0.00 | 20.46 | 10.33 | 4.29 | 0.46 | н.о | 0.31 | н.о | 98.72 |
| Amp Кс | 47.49 | 0.405 | 8.863 | 1.880 | 2.977 | 0.073 | 20.33 | 10.31 | 4.447 | 0.452 | н.о | 0.061 | 3 | 100.3 |
| Amp Кс | 47.28 | 0.373 | 8.946 | 2.020 | 2.931 | 0.078 | 20.08 | 10.28 | 4.476 | 0.463 | н.о | 0.061 | 3 | 99.99 |
| Amp Кс | 47.71 | 0.413 | 8.825 | 1.763 | 3.032 | 0.083 | 20.32 | 10.20 | 4.399 | 0.456 | н.о | 0.061 | 3 | 100.3 |
| Amp Кс | 45.96 | 0.336 | 11.41 | 1.563 | 3.284 | 0.088 | 19.54 | 10.18 | 4.458 | 0.411 | н.о | 0.059 | 3 | 100.3 |
| Amp Кс | 47.53 | 0.384 | 9.288 | 2.140 | 3.070 | 0.072 | 20.13 | 10.23 | 4.467 | 0.463 | н.о | 0.053 | 3 | 100.8 |
| Amp Кс | 47.81 | 0.431 | 8.780 | 1.724 | 2.996 | 0.069 | 20.58 | 10.31 | 4.686 | 0.478 | н.о | 0.057 | 3 | 100.9 |
| Amp Кс | 46.51 | 0.376 | 10.53 | 1.411 | 3.129 | 0.066 | 19.98 | 10.33 | 4.417 | 0.446 | н.о | 0.042 | 3 | 100.2 |
| Phl Кс | 38.44 | 0.43 | 15.47 | 1.61 | 3.27 | 0.00 | 24.33 | 0.00 | 2.82 | 6.12 | 0.89 | н.о | н.о | 93.39 |
| Phl-ц Кс | 39.75 | 0.380 | 16.65 | 0.946 | 2.694 | 0.028 | 25.16 | 0.000 | 1.386 | 6.948 | 3.257 | 0.125 | 3 | 100.5 |
| Phl-к Кс | 40.64 | 0.402 | 16.88 | 1.342 | 2.919 | 0.033 | 24.58 | 0.001 | 0.928 | 8.256 | 0.482 | 0.100 | 3 | 99.66 |
| *Phl Мк | 42.87 | 0.33 | 11.6 | 0.25 | 3.04 | 0.00 | 28.12 | 0.00 | 0.00 | 10.2 | 0.00 | 0.00 | н.о | 96.42 |
| *Phl Мк | 42.49 | 0.3 | 11.41 | 0.29 | 2.78 | 0.00 | 26.85 | 0.00 | 0.35 | 10.36 | 0.00 | 0.00 | н.о | 94.83 |
| *Phl Мк | 42.21 | 0.37 | 11.26 | 0.32 | 2.79 | 0.00 | 26.98 | 0.00 | 0.27 | 10.38 | 0.00 | 0.31 | н.о | 94.89 |
| *Phl Мк | 42.51 | 0.00 | 11.3 | 0.25 | 2.75 | 0.00 | 26.88 | 0.00 | 0.39 | 10.34 | 0.00 | 0.28 | н.о | 94.7 |
| *Phl Мк | 42.42 | 0.32 | 11.36 | 0.28 | 2.8 | 0.00 | 26.8 | 0.00 | 0.35 | 10.29 | 0.00 | 0.28 | н.о | 94.89 |
| *Phl Мк | 38.51 | 0.00 | 10.35 | 0.28 | 11.87 | 0.00 | 25.5 | 0.00 | 0.35 | 9.22 | 0.00 | 0.00 | н.о | 96.09 |

Анализ проведен с использованием электронного микрозонда; * анализ проведен с использованием сканирующего электронного микроскопа. Н.о – не определялся. Phl-ц – основная часть крупного зерна флогопита, Phl-к – край зерна. H₂O⁺ – при микрозондовом анализе количество воды было задано заранее.

Таблица 3 – Химический состав редкометалльных силикатов из ксенолита в обломке кимберлита, найденного в районе р. Сивикагна, мас.%.

| | 1-1 | 1-2 | 1-3 | 1-4 | 1-5 | 1-6 | 1-7 ⁺ | 1-8 ⁺ | 1-9 ⁺ | 1-10 | 1-11 | 1-12 | 2 | 1-5* |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------|------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|--------|
| SiO ₂ | 28.14 | 20.39 | 18.12 | 19.8 | 27.45 | 30.93 | 5.7 | 2.93 | 4.63 | 18.24 | 15.32 | 23.81 | 8.66 | 20.863 |
| TiO ₂ | 0.87 | 0.94 | 0.72 | 0.69 | 1.04 | 0.95 | 0.9 | 0.58 | 0 | 2.35 | 2.04 | 0 | 0 | 0.815 |
| Al ₂ O ₃ | 12.59 | 8.6 | 7.48 | 8.05 | 12.7 | 13.94 | 2.38 | 1.07 | 1.6 | 10.91 | 6.31 | 12.93 | 3.06 | 10.381 |
| Cr ₂ O ₃ | 3.81 | 3.04 | 2.61 | 2.94 | 4.05 | 3.49 | 1.65 | 0 | 0 | 11.64 | 3.98 | 0.67 | 3.68 | 4.115 |
| FeO | 4.95 | 3.9 | 3.32 | 3.78 | 5.23 | 4.89 | 1.44 | 1.38 | 1.24 | 5.77 | 3.59 | 4.17 | 2.63 | 6.086 |
| MnO | 1.22 | 0.86 | 0.98 | 0 | 1.01 | 0.74 | 0 | 0 | 0 | 1.75 | 1.03 | 0 | 0 | 1.42 |
| MgO | 5.34 | 3.49 | 2.94 | 3.02 | 5.64 | 5.36 | 2.1 | 1.03 | 2.86 | 20.7 | 4.05 | 25.98 | 3.47 | 4.054 |
| CaO | 9.2 | 8.17 | 8.07 | 8.29 | 9.19 | 10.02 | 6.81 | 5.38 | 4.89 | 6.39 | 10.72 | 2.52 | 6.07 | 9.594 |
| BaO | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.52 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SrO | 0 | 0.97 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.53 | 2.03 | 1.81 | 0 | 4.71 | 0 | 1.15 | 0 |
| Ce ₂ O ₃ | 14.27 | 18.36 | 19.1 | 19.84 | 14.23 | 13.87 | 23.47 | 27.5 | 26.44 | 7.87 | 20.86 | 9.84 | 21.31 | 17.91 |
| La ₂ O ₃ | 14.72 | 21.55 | 23.75 | 23.02 | 13.97 | 14.02 | 28.16 | 27.23 | 25.16 | 7.67 | 22.47 | 11.73 | 28.29 | 17.47 |
| Pr ₂ O ₃ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.34 | 1.28 | 1.57 | 0 | 0 | 0 | 1.28 | 0 |
| Nd ₂ O ₃ | 1.08 | 0 | 1.25 | 0 | 1.09 | 0 | 1.13 | 2.8 | 3.25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2.127 |
| ThO ₂ | 3.34 | 3.19 | 2.91 | 2.87 | 3.72 | 1.78 | 3.98 | 0.72 | 0 | 5.52 | 4.94 | 0.59 | 5.97 | 5.165 |
| P ₂ O ₅ | 0.46 | 6.54 | 8.39 | 7.7 | 0.37 | 0 | 19.4 | 26.06 | 25.03 | 0 | 0 | 7.77 | 14.42 | 0 |
| SO ₃ | 0 | 0 | 0.36 | 0 | 0.31 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.19 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Total | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

Анализ проведен с использованием сканирующего электронного микроскопа; * пересчет спектра, записанного с использованием электронного микрозонда. 1-n – разные зоны крупного зерна, 2 – мелкое зерно, ⁺ – «моноцитный» прожилок в 1.

С помощью известных баз данных [5,6] не удалось однозначно идентифицировать эти минералы, являющиеся, по-видимому, результатом неоднократного воздействия на породу карбонатитовых расплавов и представляющих смесь наложенных составов.

3. Выводы

На основании полученных в ходе минералогических исследований данных можно сделать несколько общих выводов:

1. Ксенолит и микроксенолит, найденные в обломке кимберлита относятся к разным мантийным парагенезисам. Оба парагенезиса обогащенные, содержащие большие количества клинопироксена, который в ксенолите позже замещается амфиболом.
2. И ксенолит, и микроксенолит подверглись ранней флогопитизации.
3. Серпентинизация и хлоритизация пород свидетельствуют о присутствии значительного количества воды во флюиде, воздействовавшем на них в поздние периоды формирования.
4. Наличие редкометальных силикатов в трещиноватом амфиболе ксенолита является явным признаком карбонатитового влияния на породу до ее захвата кимберлитом.

4. Благодарности

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН.

5. Литература

- [1] Korolyuk, V.N., Lavrent'ev, Y.G., Usova, L.V., Nigmatulina, E.N. JXA-8100 microanalyzer: Accuracy of analysis of rock-forming minerals // *Rus. Geol. Geophys.* – 2008. – Vol. 49. – P. 165-168.
- [2] Lavrentev, Y.G., Karmanov, N.S., Usova, L.V. Electron probe microanalysis of minerals: Microanalyzer or scanning electron microscope? // *Rus. Geol. Geophys.* – 2015. – Vol. 56. – P. 1154-1161.
- [3] Sobolev, N., Lavrent'ev, Y.G., Pokhilenko, N., Usova, L. Chrome-rich garnets from the kimberlites of Yakutia and their parageneses // *Contrib. Mineral. Petrol.* – 1973. – Vol. 40. – P. 39-52.
- [4] Lockok, A.J. An Excel spreadsheet to classify chemical analyses of amphiboles following the IMA 2012 recommendations // *Computers & Geosciences.* – 2014. – Vol. 62. – P. 1-11.
- [5] Mineralogy Database. URL: <https://www.webmineral.com/>
- [6] URL: <https://www.MinDat.org>

ОСОБЕННОСТИ ПОЯВЛЕНИЯ И ЭВОЛЮЦИИ АЛМАЗОВ В ЛИТОСФЕРНОЙ МАНТИИ ДРЕВНИХ ПЛАТФОРМ

Николай Похиленко^{1,2}, Людмила Похиленко¹, Валентин Афанасьев¹, 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

FEATURES OF DIAMOND GENERATION AND EVOLUTION IN THE ANCIENT PLATFORM LITHOSPHERIC MANTLE

Nikolay Pokhilenko^{1,2}, Lyudmila Pokhilenko¹, Valentin Afanasiev¹, Nikolay Tychkov¹

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

2 Novosibirsk State University, 2, Pirogova st., Novosibirsk, 630090, Russia

Annotation. The first diamonds in the history of the Earth appeared in the Archaea ~ 3.7-3.6 ago when the lower boundary reaches the growing lithosphere of the parameters that meet the stability of the diamond ($P > 5.5$ GPa, $T > 1400^{\circ}\text{C}$) from the melts or silicate with an admixture of the carbonate component, or from sulfide with dissolved carbon. The vast majority of U-type lithospheric diamonds were formed about 400 million years later in the cooled lithospheric mantle (LM). The exposure to metasomatic agents of silicate type, associated with a progressive increase in oxygen potential in the system, led to corrosion, or the complete destruction of diamonds. The development of the processes of secondary enrichment of depleted peridotites LM was associated with the dynamic activation of the lower parts of the lithosphere. The scale of the secondary enrichment of certain sections of the initially depleted and diamond-bearing peridotites LM with metasomatic agents of carbonate and silicate type in the zone of interaction between the lithosphere-asthenosphere were directly related to the scale and level of the average diamond grade of the manifestations of kimberlite metasomatism, fixed in the fields of different ages over these sites.

1. Введение

Процессы образования алмазов в литосфере Земли происходили при ее формировании и были достаточно разнообразными в широком временном диапазоне [1,2], в разных по составу средах, в широком диапазоне P-T параметров, но всегда в области стабильности алмазов. Вероятно, что большинство литосферных алмазов U-типа образовалось при процессах декарбонизации карбонатитовых расплавов/флюидов в начальных стадиях вторичного метасоматического обогащения истощенных перидотитов карбонатитовыми агентами в интервалах глубин, отвечающих области P-T параметров стабильности алмаза, в уже заметно остывшей литосферной мантии (ЛМ) [3,4,5]. Характер эволюции вещества литосферы, протекавшей позже в диапазоне глубин, отвечающем области стабильности алмаза, позволял алмазам сохраниться, либо быть уничтоженными полностью или частично [5-7]. Целью настоящей работы является анализ результатов комплексного изучения ксеногенного мантийного материала из разновозрастных кимберлитовых полей Сибирской платформы (СП), включающий оценку различий в составе и строении ЛМ СП как под полями разновозрастных, так и разновозрастных кимберлитов, а также оценку интенсивности вторичного обогащения перидотитов ее ЛМ в ряду возрастов проявлений кимберлитов. Особое значение имеет оценка вариаций уровней вторичного обогащения ЛМ, особенно вторичного обогащения силикатного типа и его связи с масштабами генерации протокимберлитовых расплавов и уровнями алмазоносности кимберлитов.

2. Условия и время появления алмазов

Самые древние алмазы появились в литосферной мантии (ЛМ) Земли в архее на рубеже 3.7–3.6 млрд. лет назад, когда нижние уровни нарастающей литосферы достигли глубин, где значения P-T параметров, отвечали области стабильности алмаза [2]. С учетом высоких значений тепловых потоков ($\sim 50 \text{ mW/m}^2$) и степеней частичного плавления примитивного вещества планеты в процессах формирования литосферы P-T параметры ($P > 5.5 \text{ ГПа}$, $T > 1400^\circ \text{ C}$) и соответствующие им глубины ($> 180 \text{ км}$) начала формирования наиболее ранних алмазов в литосфере Земли были значительно выше минимальных значений ($\sim 4 \text{ ГПа}$, $\sim 900^\circ \text{ C}$ и 140 км), характерных для процессов формирования алмазов в уже заметно остывшей литосфере примерно на 400 млн. лет позже, в среднем архее [1,3,4]. Характер процессов формирования самых ранних алмазов в «горячей» литосфере и более поздних, в остывшей, был разным. Ранние алмазы кристаллизовались из расплавов: силикатных с примесью карбонатного компонента, либо из сульфидных с растворенным углеродом [2,3]. Поздние – при процессах декарбонизации просачивающихся низковязких карбонатитовых расплавов/флюидов в начальных стадиях вторичного метасоматического обогащения истощенных перидотитов карбонатитовыми агентами в интервалах глубин, отвечающих области P-T параметров стабильности алмаза, уже заметно остывшей к рубежу ~ 3 млрд. лет ЛМ [5,6,9].

Имеющаяся обширная база данных по определению диапазона возрастов образования алмазов U-типа подобного происхождения показывает, что их абсолютное большинство появилось в остывшей литосфере в интервале 3.2–2.6 млрд. лет, хотя имеется некоторое количество значений как в более древней части диапазона (\sim до 3.4 млрд. лет), так и в более молодой (\sim до 2.4 млрд. лет) [1,5]. В последнее время появились данные о возможности образования алмазов во время протекания процессов, связанных с генерацией протокимберлитовых расплавов (нарастание радиально-лучистых алмазных кайм, либо образование мелких кристаллов) [10,11].

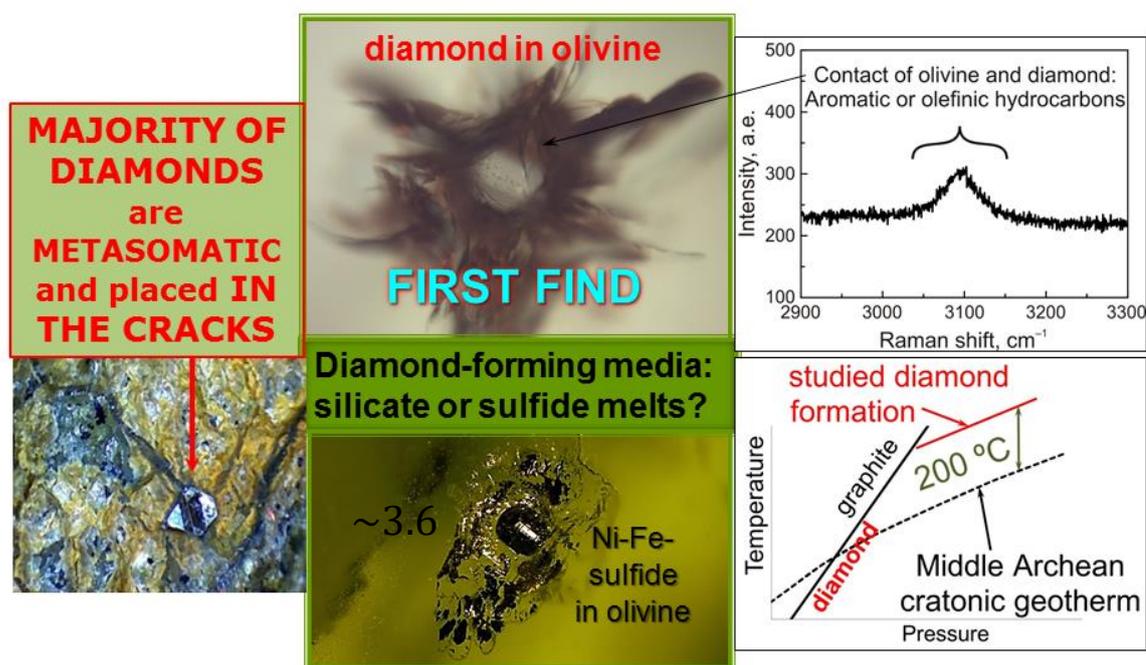


Рисунок 1 – Внешний вид (фото сверху в центре) и сравнение условий образования самых древних алмазов (граница эоархея и палеоархея, $\sim 3,6$ млрд. лет), в нарастающей по мощности литосферы при процессах частичного плавления протопланетного вещества Земли при достижении ее нижней границей значений области стабильности алмаза (Pokhilenko et al., 2023) в сравнении с таковыми для алмазов образовавшимися в среднем архее (3,2–2,6 млрд. лет) при метасоматической проработке истощенных перидотитов несколько остывшей ЛМ (\sim на 200° C , схема на нижнем правом рисунке).

Варианты сценариев процессов динамической, термодинамической и химической эволюции вещества литосферы в диапазоне глубин, отвечающем значениям P-T параметров области стабильности алмаза, протекавших в протерозойское и фанерозойское время, позволяли образовавшимся в архее алмазам сохраниться полностью, частично, либо полностью быть уничтоженными. Уничтожение алмазов в ЛМ древних платформ было во многом связано с характером и интенсивностью процессов вторичного обогащения истощенных перидотитов нижних частей ЛМ (материнских пород для литосферных алмазов U-типа) метасоматическими агентами силикатного типа [7,8]. Воздействие таких агентов, сопряженное с прогрессивным увеличением потенциала кислорода в системе, приводило либо к разным степеням коррозии алмазов, либо к их полному уничтожению. Возникновение и развитие процессов вторичного обогащения истощенных перидотитов ЛМ было прямо связано с масштабом и интенсивностью динамической активизации нижних частей литосферы, в свою очередь связанной со степенями деформированности перидотитов, повышением температуры и условий для просачивания расплавов/флюидов в породах нижних уровней литосферы. Сценарии и масштабы вторичного обогащения определенных участков изначально истощенных и алмазоносных перидотитов ЛМ метасоматическими агентами карбонатитового и силикатного типа в зоне взаимодействия литосфера-астеносфера были прямо связаны с масштабами и уровнем средней алмазоносности проявлений кимберлитового метасоматизма, фиксируемых в виде разновозрастных полей над этими участками [12]. Вторичное обогащение, скорее всего, в большей степени связано с возникновением стрессовых деформаций в блоках пород низов литосферы, появлением деформированных перидотитов, их разогреву на 150–200°C от исходных температур равновесия и резкому повышению их проницаемости за счет на порядки увеличившейся суммарной поверхности зерен оливина деформированных перидотитов. Анализ результатов изучения ксеногенного мантийного материала из разновозрастных кимберлитовых полей Сибирской платформы (СП) делает предпочтительным вариант развития силикатного метасоматоза перидотитов в динамически активных зонах взаимодействия литосфера-астеносфера [7,8,12]. Эти же результаты показывают наличие существенных различий в составе и строении ЛМ СП как под полями разновозрастных, так и одновозрастных кимберлитов [12]. Последовательное уменьшение мощности литосферы СП и общее увеличение интенсивности вторичного обогащения перидотитов ее ЛМ идут в ряду возрастов проявлений кимберлитов среднего палеозоя: средний палеозой – нижний и средний триас – верхняя юра и связываются с воздействием на нижние уровни литосферы среднепалеозойского и пермо-триасового плюма [7,8,12,13]. Значительные вариации уровней вторичного обогащения, особенно вторичного обогащения силикатного типа, по-видимому, прямо связаны с масштабами генерации протокимберлитовых расплавов и уровнями алмазоносности кимберлитов, выносящих на поверхность материал из вертикальных разрезов ЛМ различной мощности и разной интенсивности мантийного метасоматического обогащения, определяющей сохранность алмазов ЛМ.

3. Выводы

Самые древние алмазы появились в литосферной мантии (ЛМ) Земли в архее на рубеже 3.7-3.6 млрд. лет назад, когда нижние уровни нарастающей литосферы достигли глубин, отвечающих области стабильности алмаза. Большая часть литосферных алмазов U-типа образовалась при процессах декарбонизации карбонатитовых расплавов/флюидов в начальных стадиях вторичного метасоматического обогащения истощенных перидотитов карбонатитовыми агентами в интервалах глубин области стабильности алмаза, в относительно остывшей литосферной мантии. Вариации интенсивности вторичного обогащения перидотитов ЛМ силикатными агентами, вероятно, прямо связаны с масштабами генерации протокимберлитовых расплавов в зоне взаимодействия литосфера-астеносфера и интенсивностью уничтожения алмазов в истощенных перидотитах менее глубинных уровней литосферной мантии.

4. Благодарности

Исследования выполнялись в рамках программы базового проекта ИГМ СО РАН. Авторы благодарны Аналитическому центру многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН (Новосибирск, Россия), где проводились аналитические исследования.

5. Литература

- [1] Shirey, S.B., Cartigny, P., Frost, D.J., Keshav, S., Nestola, F., Nimis, P., Pearson, D.G., Sobolev, N.V., Walter, M.J. Diamonds and the geology of mantle carbon // *Rev. Mineral. Geochem.* – 2013. – Vol. 75(1). – P. 355-421.
- [2] Pokhilenko, L., Pokhilenko, N., Malkovets, V., Alifirova, T. The Earliest Generation of Diamond: The First Find of a Diamond Inclusion in Kimberlitic Olivine // *Minerals*. – 2023. – 13. – 36 p.
- [3] Zhimulev, E.I., Chepurov, A.I., Sinyakova, E.F., Sonin, V.M., Chepurov, A.A., Pokhilenko, N.P. Diamond crystallization in the Fe-Co-S-C and Fe-Ni-S-C systems and the role of sulfide-metal melts in the genesis of diamond // *Geochem. Int.* – 2012. – Vol. 50. – P. 205-216.
- [4] Sobolev, N.V., Pokhilenko, N.P., Efimova, E.S. Xenoliths of diamondiferous peridotite in kimberlites and the origin of diamond // *Soviet Geol. Geophys.* – 1984. – Vol. 25. – P. 63-80.
- [5] Pokhilenko, N.P., Pearson, D.G., Boyd, F.R., Sobolev, N.V. Megacrystalline Dunites: Sources of Siberian Diamonds // *In Annual Report of Director Geophysical Laboratory, Carnegie Institution: Washington, DC, USA, 1991.* – P. 11-18.
- [6] Pokhilenko, N.P., Agashev, A.M., Litasov, K.D., Pokhilenko, L.N. Carbonatite metasomatism of peridotite lithospheric mantle: Implications for diamond formation and carbonatite-kimberlite magmatism // *Russ. Geol. Geophys.* – 2015. – Vol. 56. – P. 280-295.
- [7] Pokhilenko, N., Sobolev, N., Kuligin, 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. 7th Intern. Kimberlite Conf. Red Roof Design, Cape Town, 1999.* – P. 689-698.
- [8] Howarth, G.H., Barry, P.H., Pernet-Fisher, J.F., Baziotis, I.P., Pokhilenko, N.P., Pokhilenko, L.N., Bodnar, R.J., Taylor, L.A., Agashev, A.M. Superplume metasomatism: Evidence from Siberian mantle xenoliths // *Lithos*. – 2014. – Vol. 184-187. – P. 209-224.
- [9] Shimizu, N., Pokhilenko, N., Boyd, F., Pearson, D. Trace element characteristics of garnet dunites/harzburgites, host rocks for Siberian peridotitic diamonds // *Proc. 7th Intern. Kimberlite Conf. Red Roof Design, Cape Town, 1999.* – P. 773-782.
- [10] Shimizu, N., Sobolev, N.V. Young peridotitic diamonds from the Mir kimberlite pipe // *Nature*. – 1995. – Vol. 375. – P. 394-397.
- [11] Araujo, D.P., Griffin, W.L., O'Reilly, K.J., Grant, T., Ireland, T., Holden, P., van Achterberg, E. Microinclusions in monocrystalline octahedral diamonds and coated diamonds from Diavik, Slave Craton: Clues to diamond genesis // *Lithos*. – 2009. – Vol. 112S. – P. 724-735.
- [12] Pokhilenko, N.P., Afanasiev, V.P., Agashev, A.M., Pokhilenko, L.N., Tychkov, N.S. Lithospheric mantle composition and structure variations under the Siberian Platform kimberlite fields of different ages // *Geodynamics and Tectonophysics*. – 2022. – 13. – 4.
- [13] 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.1–12.

ВОЗРАСТ АЛМАЗАНОСНЫХ АЛЬНЕИТОВ ТАЙМЫРА

Василий Проскурнин, Андрей Романов, Олег Петров, Сергей Сергеев, Мария Проскурнина,
Нина Виноградова, Дмитрий Ремизов, Евгений Богомолов
ФГБУ Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П.
Карпинского, 199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Средний пр-т В.О., 74

AGE OF DIAMOND-BEARING ALNEITES OF TAYMYR

Vasiliy Proskurnin, Andrey Romanov, Oleg Petrov, Sergey Sergeev, Maria Proskurnina,
Nina Vinogradova, Dmitriy Remizov, Evgeniy Bogomolov
Karpinsky Russian Geological Research Institute, 74, Sredny av, St. Petersburg, 199106, Russia

Annotation. Diamond-bearing alneites of Moorovs' complex in Taymyr, discovered by N. Urvantsev in 1929, recently sampled during the State geological mapping of 1M-scale. For its U-Pb isotope geochronology, we separated accessory perovskites from two alneite samples and performed SIMS SHRIMP-IIe analytical study. Obtained weighted U-Pb age is $230,2 \pm 6,3$ Ma ($n=13$), that corresponds to the Karnian and Noriysk stratigraphic border in Late Triassic. Revealed alien zircon grains (2657 ± 17 , 1723 ± 18 , 1572 ± 24 Ma) certainly indicate the age of intruded low-crustal rocks (from Late Archaean to Late Karelian). Alneite' WR Nd and Sr isotopic composition is close to the initial mantle ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512658$; $\epsilon_{\text{Nd}}(0) = 0,4$; $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}) = 0.704867$). Our new data indicate the essential role of the homogenous plume source in Mid-Late Triassic for so-called «Taymyr hot spot», as well as support the possibility to find out the rich diamond-bearing rock complexes in the Russian central Arctic region.

Полуостров Таймыр – один из первых регионов России, где прогнозировалась алмазоносность [1, 2, 3]. Основанием этому послужили образцы Н.Н. Урванцева, отобранные из даек в 1929 г. на правом берегу р. Верхняя Таймыра, в 17 км выше устья р. Горбиты (сопка Бонато). При их изучении В.С. Соболевым рассматриваемые породы отнесены к альнеитам, близким к сопровождающим кимберлиты мелилитовым базальтам Южной Африки, а Г. Г. Моором в 1941 г. – к слюдяным кимберлитам. Позднее из двух даек слюдяных кимберлитов (альнеитов) геологами НПО «Аэрогеология» (В.С. Скундин и др., 1976 ф; Э.Л. Фишер и др., 1978, в составе последнего объекта В.С. Гильденблатом, А.М. Марголиным, В.В. Григорьевым проведены поисковые работы на участке Бонато-Север) было выделено 3 микроалмаза размером 0,12, 0,15 и 0,3 мм и весом 0,03-0,05 мг (методом термохимического разложения). Кроме алмазов в данных породах установлены гранат (в т.ч. пироп, меланит), хромдиопсид, пикроильменит, перовскит и самородное золото.

При создании Государственной геологической карты третьего поколения масштаба 1 000 000, лист S-46 [4] алмазоносные альнеиты были выделены в мооровский комплекс, названный в честь Генриха Генриховича Моора. В тектоническом отношении алмазоносные альнеиты выявлены на крайнем юге Таймырской раннекиммерийской складчатой системы в пределах Янгодо-Горбитского выступа [5], где они приурочены к Фадьюкудинско-Котуйской кольцевой гравимагнитной аномалии (рисунок 1), связываемой с «Горячим пятном Таймыра» [6]. Комплекс представлен четырьмя дайками северо-восточного простирания протяженностью от 200 до 1500 м и мощностью от 1,0 до 4,2 м. Они прорывают терригенные угленосные отложения поздней перми и позднепермско-раннетриасовые базальты и силлы долеритов. Экзоконтактовые изменения выражены в ороговиковании терригенных пород (0,3-0,5 м) и карбонатитизации, биотитизации.

Альнеиты представляют собой массивную, среднезернисто-гетерозернистую ультрамафическую жильную породу с пятнисто-атакситовой текстурой и полифировой лампрофировой (криптовой) и пойкилитовой структурой. Главными породообразующими

минералами являются флогопит, составляющий от 30 до 50% объема породы, повсеместно развитый удлиненно-призматический мелилит (15-25%), призматический и удлиненно-призматический ортопироксен и клинопироксен (10-15%), короткопризматический оливин (5-10%). Мелилит формирует скопления субидiomорфных призм, выполняющие участки между порфиroidными темноцветными минералами.

Неравномерно развитые порфиroidные вкрапленники представлены многочисленными неплотно соприкасающимися друг с другом фенокристами рыжеокрашенного таблитчато-призматического флогопита. Последние в качестве пойкилитовых вростков включают короткопризматические зерна оливина, более редкие призмы диопсид-авгита, авгита и удлиненно-призматические кристаллы мелилита. Следует отметить, что оливин и мелилит в фенокристах и более мелких выделениях тотально диафорированы с формированием псевдоморфных микролито-зернистых агрегатов соответственно карбонат-серпентин (хризолит)-талк-хлорит-боулингитового и карбонат-слюдисто-хлоритового составов.

Мезостазис, связывающий фенокристы и интрателлурические включения, раскристаллизован в пятнисты бурый микролито-зернистый плагиоклаз-эпидот-хлорит-карбонат-серпентин-цеолит-гидрослюдистый агрегат (до 10-15%) местами со сферолитовой структурой и примесью девитрифицированного вулканического стекла (до 1-3%), отмечается интерстиционный анальцим. Кроме этого, в мезостазисе встречаются относительно мелкие субидiomорфные зерна флогопита, клинопироксена, оливина, призмочки мелилита и многочисленные ксеноморфные выделения зеленовато-бурого (до черного) граната - меланита, гидромеланита, желтовато-окрашенного андрадита.

Широко развитые акцессорные минералы представлены игольчато-призматическими кристаллами апатита, цирконом, титанитом, рутилом, скоплениями мелких кубиков пироклора и перовскитом с оторочками рудного минерала. Рудные минералы (3-5%) представлены магнетитом, титаномагнетитом, ильменитом, пиритом. Химический состав перовскита близок к идеальному (CaTiO_3) с незначительной примесью Nb_2O_5 (до 1,09 вес. %), Na_2O (до 1,58 вес. %). Петрографо-минералогическая характеристика свидетельствует, что по наличию мелилита рассматриваемые породы не могут являться лампроитами, присутствие же меланита характерно для слюдяных кимберлитов и альнеитов. Формационная принадлежность пород мооровского комплекса требует дальнейшего изучения [7].

Породы мооровского комплекса недосыщены кремнеземом ($\text{SiO}_2 = 36,2-36,9$ мас. %) и обладают высокой щелочностью ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 3,41-4,01$ мас. %). На TAS-диаграмме, соответственно, располагаются в области щелочных пикритов. Они характеризуются высокой калиевоcтью ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 0,06-0,46$), высокой магниальностью ($\text{MgO} = 9,14-17,1$ мас. %) и высокой титаниcтостью ($\text{TiO}_2 = 4,09 - 4,56$ мас. %). По соотношениям $\text{MgO} - \text{K}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3$ и $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ относятся к щелочным лампрофирам [8].

К геохимическим особенностям альнеитов относятся повышенные содержания таких крупноионных литофилов, как Ba (1510-2410 г/т); Sr (489-1360 г/т), Rb (60-90,4 г/т), а также высокочарядных элементов Nb (108-133 г/т), РЗЭ (348-547 г/т) и Pd (0,01-0,02 г/т), Ni (130-206 г/т). Все породы даек характеризуются резким превышением LREE над HREE, обогащением U, Th, отчетливыми минимумами по K, Zr и Ti (рисунок 2). Спектры распределения альнеитов практически совпадают со средним спектром кимберлитов, по крайней мере, по характеру. Очевидно, что это внутриплитный глубинный магматизм при мощной континентальной коре и литосфере. При этом контаминация коровым материалом отсутствует. Повышенные относительно кимберлита содержания РЗЭ связаны с повышенной щелочностью (ближе всего к кимберлиту низкощелочной обр. BN-16). Он, вероятно, обогащен плагиоклазом и, соответственно, истощен РЗЭ относительно общего уровня. Просматривается тенденция роста этих концентраций с ростом кремнеземистости в процессе слабой дифференциации.

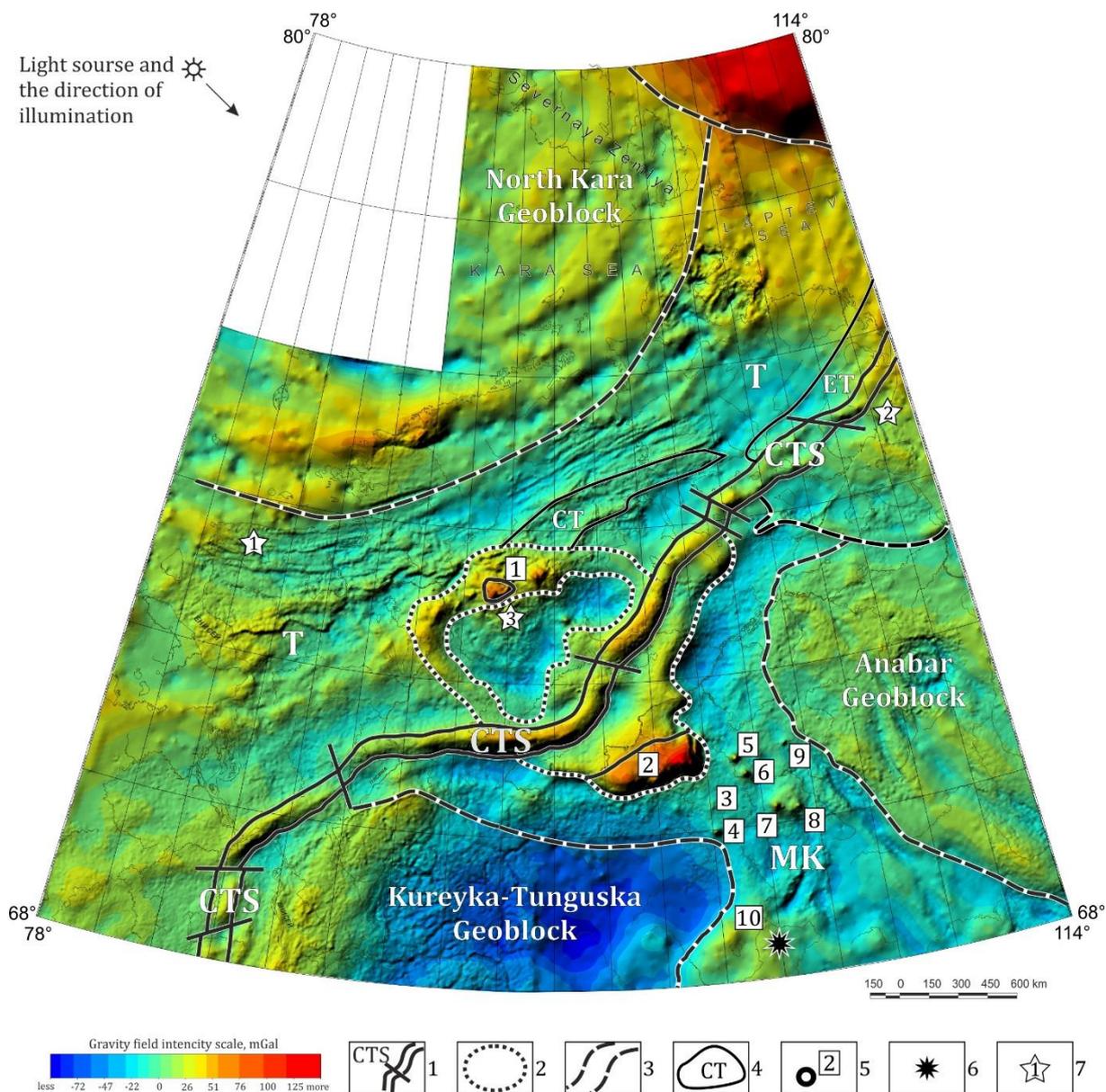


Рисунок 1 – Схема расположения алмазоносных альнеитов сопки Бонато, крупнейших интрузивных массивов раннего-позднего триаса и площадей развития стронций-бариевых карбонатитов относительно «Горячего пятна Таймыра» на карте гравитационного поля [6]. Редукция Буге, плотность промежуточного слоя 2,67 г/м³. Уровень условный (цветной псевдорельеф). Масштаб 1:10 000. Составлена в ВИРГ-Рудгеофизике, 2002.

1 – Центрально-Таймырский шов; 2 – Фадьюкудинско-Котуйская кольцевая гравиметрическая аномалия; 3 – границы геоблоков (Анабарского, Курейско-Тунгусского, Северо-Карского) и межгеоблоковых зон - карбонатитовых провинций: Маймеча-Котуйской (МК) и Таймырской (Т); 4 – таймырские карбонатитовые ареалы: ET – Восточно-Таймырский, CT – Центрально-Таймырский; 5 – крупнейшие интрузивные массивы раннего-позднего триаса: Дюмталейский (1), Гулинский (2), Далбыхская группа интрузий (3), Бор-Урях и Кара-Мени (4), Одихинча (5), Кугда (6), Маган (7), Ыраас (8), Немакит (9), Ессей (10); 6 – Харамайское кимберлитовое поле; 7 – прогнозируемые алмазоносные поля в связи с лампроитами (1), карнийскими россыпями и флюидно-эксплозивными бречиями (2); алмазоносными альнеитами р. Горбита (3).

долеритах (до 0,2 м). Две дайки альнеитов были опробованы в 2010 г. А.П. Романовым и С.В. Ладугиным для петрологического и изотопно-геохронологического изучения.

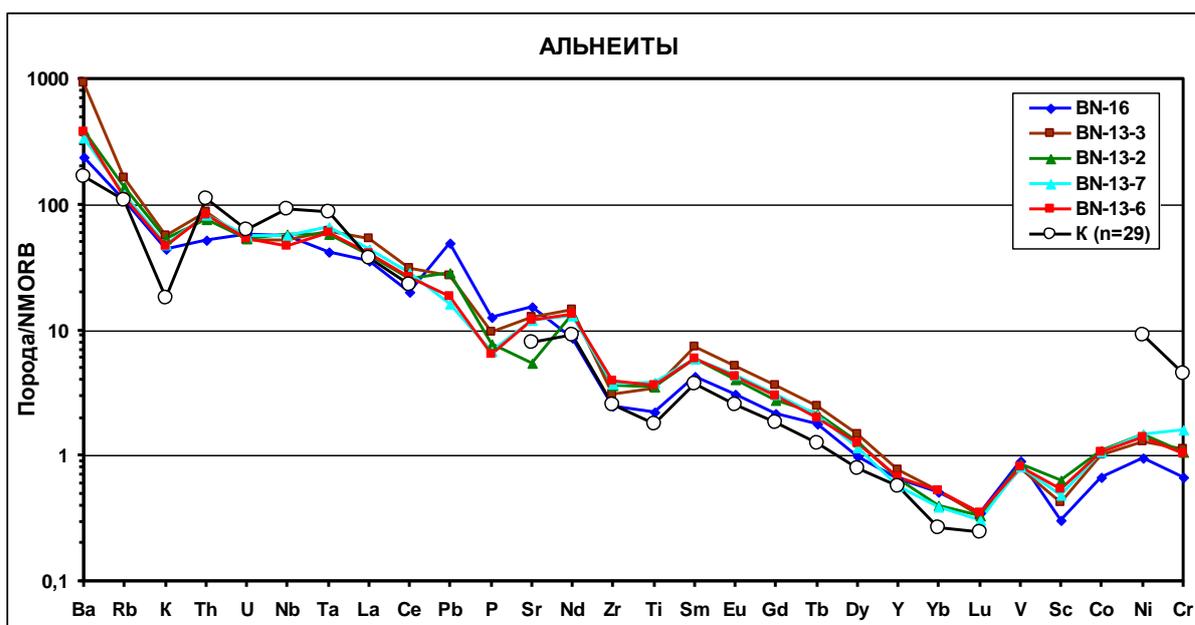


Рисунок 2 – Спайдер-диаграмма альнеитов мооровского комплекса (нормировано на NMORB [9] с дополнениями). К – кимберлит (среднее из 29 обр.).

Возраст пород мооровского комплекса определяется как поздне триасовый. Для определения изотопного U-Pb возраста пород были выделены зерна перовскитов из двух проб альнеитов (BN-13-7, BN-13-2) и имплантированы в эпоксидную смолу вместе с зернами стандартов перовскита Тажеран. Далее они были сошлифованы и приполированы приблизительно на половину своей толщины. Затем на шайбу наносилось золотое покрытие в установке катодно-вакуумного распыления в течение одной минуты при силе тока 20 мА. Для выбора мест (точек) датирования на поверхности зерен использовались изображения в режиме обратно-рассеянных электронов (BSE), отражающие минеральную гетерогенность перовскитов. Накопление BSE проводилось на сканирующем электронном микроскопе CamScan MX2500. Измерения U-Pb изотопных отношений в перовските производились на вторично-ионном микрозонде высокого разрешения SIMS SHRIMP-IIe в ЦИИ ФГБУ «ВСЕГЕИ» по методике, описанной в статье Ireland et al. [10]. Интенсивность первичного пучка молекулярных отрицательно заряженных ионов кислорода составляла 4 нА, диаметр пятна (кратера) ~ 35 мкм при глубине 2 мкм. В качестве международного стандарта U-Pb изотопных отношений использовался перовскит из скарна Тажерановского комплекса (Восточная Сибирь, Россия). $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ отношения нормализовались на значение 0.074465, что соответствует возрасту 463 млн. лет [11]. Погрешности единичных анализов (отношений и возрастов) приводятся на уровне 1σ , погрешности вычисленных по линиям смешения возрастов приводятся на уровне 2σ . Обработка полученных данных осуществлялась с использованием программ SQUID [12] и ISOPLOT/EX [13].

Было проанализировано 8 зерен перовскита из пробы BN-13-7 и 5 зерен перовскита из пробы BN-13-2. Нескорректированные на обыкновенный свинец измеренные отношения $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ и $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ (Total) были нанесены на диаграммы с конкордией в координатах Тера-Вассербурга. Постулируя исходную конкордантность U-Pb системы перовскита, строилась линия смешения между радиогенной и обыкновенной Pb компонентами. Пересечение этой линии с осью ординат соответствует отношению $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ в обыкновенном свинце. В целом, средневзвешенный U-Pb возраст перовскита из двух проб альнеитов мооровского комплекса (рисунок 3) составляет $230,2 \pm 6,3$ млн. лет ($n=13$), что соответствует карнийскому веку позднего триаса.

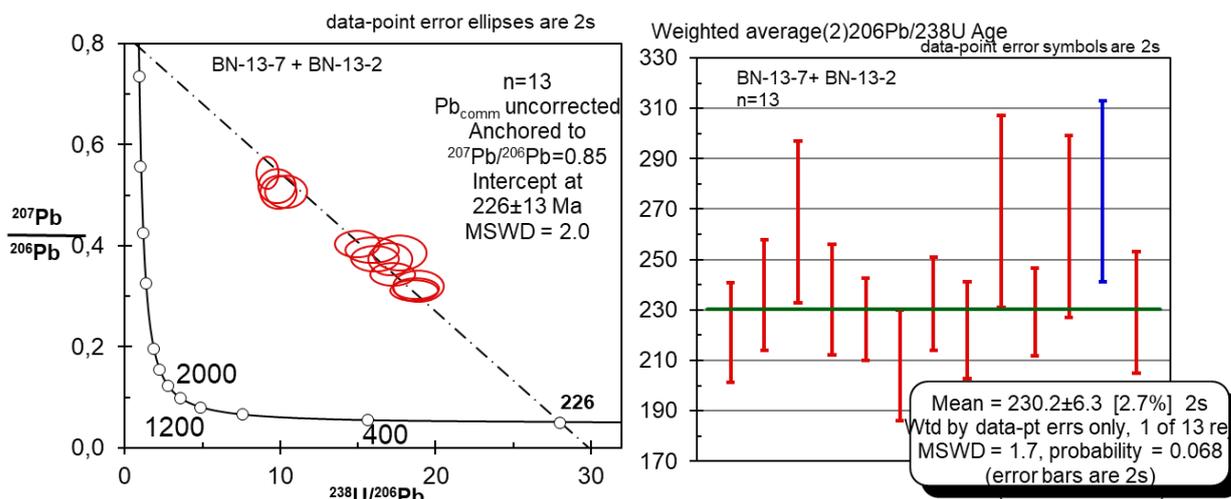


Рисунок 3 – Результаты датирования перовскитов из проб альнеитов BN-13-2 и BN-13-7.

Кроме перовскитов из этих же проб альнеитов были выделены с помощью тяжёлых жидкостей и магнитной сепарации три зерна циркона (два из пробы BN-13-7 и одно - BN-13-2), которые были датированы в ЦИИ ВСЕГЕИ на SIMS SHRIMP-IIe по стандартной методике. Все погрешности приведены для доверительного интервала 2σ. Зерна цирконов коричневые, полупрозрачные с трещинами, длина 80-120 мкм, удлинение 1.5-2.2. В катодолюминесцентном изображении имеют слабое свечение и следы магматической зональности. По результатам U-Pb датирования для цирконов получены конкордантные возраста 1572±24 млн. лет (содержание U = 175, Th = 64, Th/U = 0.38, зерно BN-13-7.1), 2657±17 млн. лет (U = 99, Th = 47, Th/U = 0.50, зерно BN-13-7.2), 1723 ±18 млн. лет (U = 594, Th = 74, Th/U = 0.13, зерно BN-13-2.1). Эти цирконы характеризуют возрасты интродуцированных пород нижних горизонтов коры в этом районе (от AR₂ до PR₁).

Модельный возраст протолита альнеитов по Sm-Nd валовому анализу при $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0,0957$ составляет $T_{\text{DM}2} = 747$ млн. лет. Изотопный состав Nd и Sr альнеитов сопки Бонато (BN-13-7) близок к составу примитивной мантии или однородному хондритовому резервуару (CHUR): ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) = 0.512658; $\epsilon_{\text{Nd}}(0) = 0,4$; $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = 3,3$; ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) = 0.704867±14. Посттрапповый характер внедрения даек альнеитов в совокупности с изотопно-геохимическими данными свидетельствуют о влиянии однородного плюмового источника в среднем-позднем триасе, который можно связать с эволюцией «Горячего пятна Таймыра» [6].

Таким образом, полученный впервые карнийский возраст для алмазоносных альнеитов Таймыра свидетельствует о более широком развитии посттраппового алмазоносного магматизма [1,2,3,4,7,14 и др.], подтверждая возможность выявления и решения проблемы коренных источников для уникальных россыпей алмазов севера Сибирской платформы.

Литература

- [1] Sobolev V.S. Peculiarities of magmatic manifestations and metallogeny of platforms on the example of the Siberian traps formation // Proc. XVII International Geological Congress. – Moscow, 1937. – P. 134-135.
- [2] Moor G. G. Micaceous kimberlites in the north of the central Siberia // Dokl. Akad. Nauk SSSR. – 1941. – V. XXXI. – № 4. – P. 361-363.
- [3] Vakar V.A. On the question of the probable diamond content of Taimyr // Inform. bull. NIIGA. – Leningrad: Nedra, 1958. – Issue. 8. – P. 49-51.
- [4] State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). Taimyr-Severnaya Zemlya series. Sheet S-46 - Tareya. Explanatory note // V.F. Proskurnin, G.V. Schneider, A.V. Gavrish, A.P. Romanov et.al. – SPb.: VSEGEI Cartographic Factory, 2016. – 490 p. + 23 insets.
- [5] Pogrebitsky Yu.E. Paleotectonic Analysis of the Taimyr Fold System. – L.: Nedra, 1971. – 248 p. (Proceedings of NIIGA. Vol. 166).

- [6] Proskurnin P.F., Petrov O.V., Saltanov V.A. Is the hot spot of Taimyr an ore-bearing trace of the Siberian (Icelandic) plume? // *Fundamental problems of tectonics and geodynamics. Volume 2. Materials of the LII Tectonic Conference.* – M.: GEOS, 2019. – P. 187-191.
- [7] Romanov A.P. Lamproites and kimberlites of Gorny Taimyr // *Russian Arctic: geological history, Metallogeny, Geoecology.* Chief editors: D.A. Dodin, V.S. Surkov. – SPb: VNIIOkeangeologia, 2002. – P. 291-299.
- [8] Bergman S.C. Lamproites and other potassium-rich igneous rocks: A review of their occurrence, mineralogy and geochemistry: Geological Society Special Publication. 1987, v. 30, doi:10.1144/GSL.SP.1987.030.01.08.
- [9] McDonough, W.F., Sun, S.-S. The composition of the Earth // *Chemical Geology.* – 1995. – Vol.120. – P. 228.
- [10] Ireland, T.R., Compston, W., Williams, I.S. & Wendt, I. U-Th-Pb systematics of individual perovskite grains from the Allende and Murchison carbonaceous chondrites // *Earth and Planetary Sci. Lett.*, 1990. – 101. – P. 379-387.
- [11] Kinni P. D., Griffin B. Dzh., Heamjen L. M. et al. Determination of U-Pb ages of perovskites from Yakut kimberlites by the ion-ion mass spectrometric (SHRIMP) method // *Geologija i geofizika.* –1997. –Vol. 38. – No. 1. – P. 91-99.
- [12] Ludwig, K.R.. User 's manual for Isoplot/Ex, Version 2.10, A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1999, No.1a, 2455 Ridge Road, Berkeley CA 94709, USA.
- [13] Ludwig, K.R. SQUID 1.00, A User's Manual; Berkeley Geochronology Center Special Publication. 2000, No.2, 2455 Ridge Road, Berkeley, CA 94709, USA.
- [14] Grakhanov S.A., Proskurnin V.F., Petrov O.V., Sobolev N.V. Triassic Diamondiferous Tuffaceous–Sedimentary Rocks in the Arctic Zone of Siberia // *Russian Geology and Geophysics.* – Novosibirsk State University. – 2022. – Vol. 63. – No. 4. – P. 458–482.

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ СПЕЦИАЛИЗАЦИЯ УГЛЕЙ ВЕРХНЕ-АЛДАКАЙСКОГО УЧАСТКА АЛДАКАЙСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Николай Пуляев, Чэмэлиинэ Семенова

ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова»,
677000, Россия, г. Якутск, ул. Белинского, 58

GEOCHEMICAL SPECIALIZATION OF COALS OF THE VERHNE- ALDAKAYSKY OF THE ALDAKAYSKY DEPOSIT

Nikolay Puliayev, Chameliine Semenova

North-Eastern Federal University, 58, Belinsky str., Yakutsk, 677000, Russia

Annotation. The theses speak of the extensive development of coal deposits in South Yakutia, which are localized in superimposed disconnected depressions on the territory of the Aldan-Stanovoi shield. Together, these coal deposits form the South Yakutsk coal basin, which includes coal regions established within the boundaries of the basins. The Verkhne-Aldakai site of the Aldakai coal deposit was chosen as the object of study. The choice of this site is justified by its insufficient knowledge and attractive chemical composition of coals. The spectral analysis of the ash showed the presence of a wide range of chemical elements, including rare earths. The macroscopic, microscopic and geochemical characteristics of the coals of the site are given. Recommendations for the extraction of valuable impurities are given.

Key words: South Yakutsk coal basin, Upper Aldakai coal deposits, coal seams, mineral and material composition, chemical elements of admixture.

1. Введение

Угленосные отложения Южно-Якутского угольного бассейна (ЮЯУБ) локализуются в разобщенных впадинах, протягивающихся в субширотном направлении более чем на 1000 км вдоль границы Алданского кристаллического массива и Становой складчатой системы. Наиболее крупными из них являются Алдано-Чульманская, Токинская и Усмунская впадины, позиционируемые как угленосные районы. Отдельные угольные месторождения бассейна и участки угленосных районов изучены, с различной степенью детальности, на глубину 20-500 метров. В данной работе объектом исследования является Верхне-Алдакайский участок Алдакайского месторождения Алдано-Чульманского района. Несмотря на недостаточную изученность, тем не менее, уже по имеющимся данным, участок является по мнению многих геологов (Швец и др. 1997), перспективным объектом для извлечения нетрадиционных для угольных месторождений видов полезных ископаемых таких, как редкие земли. Востребованность их на мировом рынке огромна и стоимость велика.

Результаты спектрального анализа углей разных угольных месторождений ЮЯУБ, в том числе и Верхне-Алдакайского о участка Алдакайского месторождения показывают, что в качестве примесей в разных концентрациях, иногда до аномально высоких, в них содержится до 63 химических элементов (ХЭ), включая редкие земли, благородные металлы и радиоактивные ХЭ. Как правило, их содержания распределены крайне неравномерно. Есть зоны, где некоторые ХЭ образуют аномалии. Как правило, аномалии являются комплексными. При детальном изучении аномалий, установлено, что они имеют небольшие площади и отличаются разной контрастностью и геохимической специализацией [1].

2. Характеристика углей Верхне-Алдакайского участка

Макроскопическая характеристика

В качестве основного макроскопического признака при подразделении углей на группы или типы, принято считать степень блеска. В Южно-Якутском бассейне выделяются все известные

группы углей: блестящие, полублестящие, полуматовые и матовые. Характерная особенность углей ЮЯУБ состоит в том, что интенсивность их блеска зависит не от состава микрокомпонентов органического происхождения, а от количества в них минеральных примесей, т. е. от зольности.

Содержание минеральных примесей в блестящих углях Верхне-Алдакайского участка колеблется от 3,5% до 10%, составляя в среднем 5%-7%, в полублестящих - от 10% до 20%, в полуматовых - от 20% до 30%, в матовых - 30%-45%. В пределах участка преобладают полублестящие и блестящие группы углей [1].

В составе золы значительная доля принадлежит оксидам кремния (40-60%) и алюминия (16—32%), которые в сумме составляют до 90% от ее общего содержания. Количество оксидов железа, кальция, магния и фосфора соответственно составляет 8%-14%, 4%-10%, 2%-4% и < 0,03% [1].

По структурным признакам выделяются однородные, штриховатые, полосчатые и пятнистые угли. Последние три типа углей, в свою очередь, подразделяются на ряд разновидностей: неясноштриховатые, тонкоштриховатые, грубоштриховатые, неяснополосчатые, тонкополосчатые, комплекснополосчатые, мелкопятнистые, линзовидно-пятнистые и др. Полосчатость и штриховатость обусловлены либо включениями тонких линз витрена и фюзена, либо неравномерным распределением в угле минеральных примесей. Пятнистость углей связана чаще всего с мелко- и микроконкреционными образованиями сидерита. Такие угли встречаются в верхних пластах месторождения. Часто они выявляются вблизи подошвы или кровли угольных пластов [2].

По текстурным признакам все угли участка подразделяются на слоистые и неясно слоистые разновидности. Слоистость и другие макроскопические признаки углей на участке распознаются не всегда из-за интенсивного развития явлений внутрипластового перемещения угольного вещества под воздействием тектонических напряжений и криогенных процессов.

Микрокомпонентный состав

Угли участка по составу исходного материала относятся к группам гумолитов (99%) и сапрогумолитов (около 1%). Гумолиты, представляющие подавляющее большинство углей участка, слагают все без исключения угольные пласты [3]. Гумолитовые угли сложены главным образом стеблевыми остатками высших растений - папоротников, хвощей, гинкговых и хвойных. Среди древесных остатков постоянно встречаются коровые и листовые ткани, нередко образующие самостоятельные маломощные прослои. Фрагменты травянистых растений отмечаются редко. Сапрогумолиты встречаются в пластах гумолитовых углей в виде тонких прослоев и линз мощностью до 0,3 м. Они обнаружены в пластах верхней части месторождения [3]. В таких прослоях количество сапропелевого материала, представленного остатками колониальных водорослей типа *Pila*, составляет до 30% общей массы углей.

Петрографическими исследованиями установлено, что по микрокомпонентному составу угли однородны и почти все относятся к витринитовому типу [2;4]. Содержание микрокомпонентов группы витринита в углях большинства пластов составляет 80-99%. Из других микрокомпонентов чаще всего встречается семивитринит, представленный микстинитом. Это участки витрипита, интенсивно минерализованные тонкодисперсной вкрапленностью глинистого вещества, обычно каолинита.

Микрокомпоненты группы фюзинита, лейптинита и альгинита встречаются лишь в отдельных прослоях некоторых угольных пластов. Наименее однородными являются угли верхней части пластов участка, которые включают до 30% микрокомпонентов группы фюзинита [2].

Комплекс минеральных веществ в составе углей представлен преимущественно аутигенными минералами, среди которых наиболее распространен каолинит, заполняющий клеточные полости гелифицированных растительных тканей [3]. Он обычно встречается в виде аморфных или крипнокристаллических агрегатов. Второе место по частоте встречаемости среди комплекса аутигенных минералов принадлежит карбонатам (сидериту и кальциту). Эти минералы выполняют микротрещины в углях и клеточные полости растительных тканей.

Сидерит нередко образует сферокристаллы радиального строения диаметром до 2 мм. Такие сферокристаллы часто содержат включения обрывков растительных тканей.

Вторичный кварц в углях встречается двух разновидностей: гидротермальный и постдиагенетический, образовавшийся в результате растворения обломочных зерен и раскристаллизации алюмосиликатных гелей. Гидротермальный кварц выполняет трещины в углях, а постдиагенетический — клеточные полости растительных тканей. Кварц гидротермального генезиса обычно имеет мозаичную и гребенчатую структуру, постдиагенетический представлен аморфными или криптокристаллическими агрегатами [3]. Из других аутигенных минералов в углях изредка встречаются пирит и гетит.

Постоянно присутствуют среди органической массы углей обломочные зерна кварца, реже встречаются мелкие каолинизированные обломки полевых шпатов. В виде единичных зерен встречаются циркон, апатит, гранат, эпидот и турмалин. В углях некоторых пластов обнаружен пепловый витрокластический материал. Для высокозольных углей и углистых аргиллитов характерно присутствие биотита [3;4].

Химический состав углей

Угли характеризуются повышенным содержанием углерода и водорода, высоким выходом летучих веществ, низким содержанием азота и серы, повышенной спекаемостью и коксующестью. Своеобразие этих углей объясняется, скорее всего, особенностями их накопления и последующего захоронения. Возможно высокая степень обводненности материнских торфяников способствовала созданию восстановительной обстановки в процессах превращения исходного растительного материала в угли [55]. Поэтому угли, образовавшиеся в таких условиях, близки к наиболее восстановленным витринитовым углям например, Донбасса, для которых характерны повышенное содержание углерода, водорода, более высокая спекаемость и больший выход летучих.

Поскольку подавляющее большинство углей сложено витринитом, сформировавшимся в сильно восстановленной среде, наблюдаемое разнообразие их химико-технологических свойств обусловлено преимущественно двумя факторами - степенью метаморфизма и окисленностью.

Угли участка являются малосернистыми и малофосфористыми. Содержание серы в них колеблется от 0,15% до 0,45%. Сера связана в основном с органической массой углей, вследствие чего концентрат получается более сернистым, чем исходный рядовой уголь. Содержание фосфора при обогащении углей, наоборот, значительно снижается, поэтому в большинстве случаев в концентрате обнаруживаются лишь следы фосфора [5].

В углях ЮЯУБ в качестве примесей установлено до 63 химических элементов (ХЭ). Как правило, их содержания распределены крайне неравномерно. Есть участки, где некоторые ХЭ образуют аномалии. В подавляющем большинстве эти аномалии являются комплексными. При детальном изучении аномалий, установлено, что они имеют небольшие площади и отличаются разной контрастностью и геохимической специализацией [5].

Спектральный анализ золы углей Верхне-Алдакайского участка позволил установить постоянное присутствие в качестве примесей 29 ХЭ: германий, свинец, медь, никель, цинк, кобальт, серебро, вольфрам, олово, молибден, марганец, ванадий, титан, хром, цирконий, литий, бор, фосфор, галлий, висмут, ниобий, барий, бериллий, скандий, церий, иттрий, лантан, иттербий, стронций [6].

Изучение химического состава углей Верхне-Алдакайского участка показало, что наиболее контрастные аномалии образуют германий, редкоземельные ХЭ (РЗЭ) и скандий. Германий распределен в углях весьма неравномерно. Единичные прикровельные и припочвенные пробы имеют очень высокие содержания германия до 100 граммов на тонну сухого угля. В прикровельных и припочвенных частях угольных пластов, везде фиксируются небольшие по размерам зонки с содержаниями германия 3-10 г/т (максимум 40 г/т) [5;6]. Редкие земли и скандий, как и германий, распределены в угольных пластах тоже неравномерно. Явления прикровельного и припочвенного обогащения для них выражены менее ярко, чем для германия. Размеры аномальных зон по простиранию (в горных выработках) - десятки метров. Содержания суммы РЗЭ и скандия в пробах достигают 1800 г/т сухого угля [6].

На мировом рынке постоянно отмечается повышение спроса на иттриевые редкоземельные элементы (РЗЭ) (иттрий, самарий, европий, гадолиний, тербий, диспрозий, гольмий, эрбий, тулий, иттербий, лютеций) и скандий. Это связано прежде всего с использованием упомянутых элементов для изготовления высокотемпературных сверхпроводников, а также в военных лазерах, оптике, сплавах. Мировые цены на индивидуальные РЗЭ чистоты 99.9% достаточно высоки, устойчивы и хорошо отражают конъюнктуру роста потребления именно конкретных иттриевых редких земель и скандия. Стоимость килограмма церия на рынках (интернет-сервер геологической службы США. 2015) составляла 350 долларов, диспрозия - 500 долларов, эрбия - 725, европия - 6500, гадолиния - 400, гольмия - 1200, лантана - 350, лютеция - 7500, неодима - 450, празеодима - 540, самария - 300, скандия - 18000, тербия - 1300, тулия - 6500, иттербия - 1600, иттрия - 450. Для сравнения, цена широко известного дефицитного германия - 1700 долларов за килограмм [6].

При явном росте потребления иттриевых РЗЭ, сырьевая база их достаточно ограничена. В карбонатитовых и прочих месторождениях содержания иттриевых редких земель в десятки раз меньше чем цериевых и увеличение добычи на таких объектах ведет к перепроизводству цериевых редких земель, которые не обеспечены рынками сбыта. Поэтому растет добыча иттриевых РЗЭ из глинистых кор выветривания и отходов уранового производства, имеющих выгодное церий - иттриевое отношение. В последнее время стали более пристально присматриваться и детально изучаться содержания редких, редкоземельных и радиоактивных химических элементов в углях для оценки возможности извлечения из них широкого спектра ХЭ, в том числе редких и РЗЭ.

3. Выводы

В пределах Верхне-Алдакайского участка аномальные локальные зоны РЗЭ и скандия в углях отмечаются практически во всех частях пластов. Они обычно имеют малую мощность и плохо геометризуются. Приемлемым способом подготовки углей к извлечению РЗЭ могло бы быть озоление углей только из аномальных зон. Исследования показали, что аномальные образования, содержащие не менее 300 г/т редких земель и скандия, составляют 2,1-5,7% от объема (веса) угольных пластов. Рассматриваемые образования содержат помимо редких земель ассоциирующие с ними уран, торий, ванадий и германий. Коэффициенты парной корреляции внутри выделенной ассоциации достаточно высоки в пределах 0,5-0,7. Аномальные зоны РЗЭ иногда сопровождаются аномалиями естественной радиоактивности. [7] Анализ имеющихся распределений микро и макроэлементов в золе и углях пластов показал что в угольных пластах устанавливается некоторая закономерность. Так например, при высоких концентрациях калия отмечаются аномально высокие фосфора, при высоких содержаниях натрия отмечаются аномально низкие кобальта,

Следует отметить, что в России все чаще предпринимаются попытки использования углей и подуктов их технологической переработки для извлечения редкоземельных элементов и сопутствующих им ХЭ. Для реализации этой задачи в первую очередь необходимо выделить и оконтурить зоны угольных пластов с аномальными содержаниями РЗЭ. Нужно исследовать уголь аномальных зон с определением содержания элементов, морфологии и физических свойств аномальных образований, характера минерализации на микроуровне (металлоорганика или минералы-носители). Провести лабораторные опыты по покусковой сепарации аномальных образований и извлечению металлов. Кроме того, в пробах различных пластов необходимо дополнительно провести определение платины и ее спутников, а также золота, индия, рения и других элементов. За прошедшее десятилетие получены геохимические и геологические данные, которые позволяют принципиально пересмотреть существующие подходы к оценке промышленной значимости попутной редкоземельной минерализации углей ЮЯУБ и частично вовлечь депонированные в углях металлы в промышленный оборот.

4. Литература

- [1] Shvets V.N. Metallogeny and geochemistry of the main target coal seams and their host rocks the South Yakutsk coal basin according to non-traditional methods of analysis. Funds GGGP Yuzhyakutgeologiya, 1997.
- [2] Mitronov D.V. Petrographic composition and typification of coal deposits in the South Yakutsk basin // Coal deposit and coals of Yakutia. – Yakutsk: YaNTs SO RAN, 1994. – P.43-47.
- [3] Mitronov D.V. The material composition and structure of the layers of the Elga deposit of the South Yakutsk basin // Litology of gas-bearing and coal-bearing deposits of Yakutia. – Yakutsk: YaNTs SO RAN SSSR, 1990. – P. 84-90.
- [4] Boldakova L.A. Petrography of coals in the Usmun region of the South Yakutsk basin // Lithology and minerals. – 1982. – № 1. – P. 78-90.
- [5] Shvets V.N. On the geochemistry of coal seams in South Yakutia // Search and exploration of mineral deposits in Siberia. – Tomsk: 2000. – P. 54-62.
- [6] Yudovich Ya. E. Elements-impurities in fossil coals. – L.: Nauka, 1985.
- [7] Shvets V.N. , Boyarko G.Yu. To the problem of the integrated use of coals in South Yakutia // Ways for the effective use of the economic and industrial potential of the South Yakutsk region in the 21st century. / volume II. – Neryungri, 2000. – P. 122-131.

ФРАНКАМЕНИТ В ЧАРОИТОВЫХ ПОРОДАХ МУРУНСКОГО МАССИВА (АЛДАНСКИЙ ЩИТ)

Татьяна Радомская¹, Екатерина Канева¹, Эмилия Докучиц², Роман Шендрик¹,
Михаил Митичкин¹

1 ФГБУН «Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН»,
664033, Россия, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1а

2 Китайский университет геонаук, 430074, Китай, г. Ухань, ул. Люмо, 388

FRANKAMENITE IN CHAROITE ROCKS OF THE MURUN MASSIF (ALDAN SHIELD)

Tatiana Radomskaya¹, Ekaterina Kaneva¹, Emilia Dokuchits², Roman Shendrik¹, Mikhail Mitichkin¹

1 Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, 1a, Favorskogo str., Irkutsk, 664033, Russia

2 China University of Geosciences, 388, Lumo road, Wuhan, 430074, China

Annotation. Two varieties of frankamenite from the charoite rocks of the Murun massif, differing in morphological features, color, set of associated minerals, and chemical composition were studied. Green frankamenite with euhedral and subhedral crystal forms is associated with charoite, aegirine, microcline and quartz. Chemical composition of green frankamenite is (wt %): SiO₂ 55,52(8); FeO 0,25(4); MnO 0,33(5); MgO 0,08(2); CaO 21,89(13); Na₂O 6,54(11); K₂O 10,33(11); SrO 0,57(7); H₂O 1,76(15); F 4,63(22); –O=F -1,95(9). Empirical formula is (Si=12):

$K_{2,85}Na_{2,74}Ca_{5,07}Sr_{0,07}Fe_{0,06}Mn_{0,06}Mg_{0,03}[Si_{12,00}O_{30,07}](F_{3,17}OH_{0,83})_{\Sigma 4,00} \cdot nH_2O$. Lilac-gray dendritic frankamenite is associated with charoite, amphibole, quartz, steacyite, and apatite. The chemical composition of lilac-gray frankamenite is (wt.%): SiO₂ 55,54(7); FeO 0,07(5); MnO 0,81(12); MgO 0,03(2); CaO 21,13(7); Na₂O 6,95(7); K₂O 10,81(12); SrO 0,42(4); H₂O 1,73(18); F 4,27(23); –O=F -1,80(9). Empirical formula is (Si=12): $K_{2,98}Na_{2,91}Ca_{4,89}Mn_{0,15}Sr_{0,05}Mg_{0,01}Fe_{0,01}[Si_{12,00}O_{30,06}](F_{2,92}OH_{1,08})_{\Sigma 4,00} \cdot nH_2O$.

1. Введение

Франкаменит – редкий триклинный К-Na-Са силикат с гофрированными стенками-слоями Са-Na-октаэдров, скрепленных трубками состава Si₁₂O₃₀ в структуре, содержащий фтор, гидроксильную группу и воду – K₃Na₃Ca₅(Si₁₂O₃₀)F₃(OH)·H₂O [1, 2]. Минерал был обнаружен В. П. Роговой в 1977 году на месторождении «Сиреневый камень» (Южная часть Мурунского щелочного массива, Северо-Западный Алдан) в чароитовых породах и принят ею за канасит [3]. Дальнейшее исследование химического состава и кристаллической структуры этого минерала показало, что он не является канаситом, а представляет собою совершенно новый минерал, который был утверждён в 1995 году и назван франкаменитом в честь минералога-кристаллографа Виктора Альбертовича Франк-Каменецкого [1, 2, 4, 5].

В работе приводятся данные о двух разновидностях франкаменита. Образцы с франкаменитом для исследования были предоставлены минералогическим музеем горнопромышленного предприятия АО «Байкалкварсамоцветы» и Митичкиным Михаилом Александровичем. Минеральный состав чароитовых пород, содержащих франкаменит, его морфогенетические особенности, парагенетические ассоциации и взаимоотношения ассоциирующих с ним минералов изучались оптическим петрографическим методом в проходящем свете в шлифах толщиной ~30–35 μm с помощью поляризационного микроскопа Olympus BX-51, оснащённого фотоаппаратом Olympus. Один дубликат шлифа с сиренево-серым франкаменитом был покрашен 1 % раствором ализаринового красного С, позволяющим на качественном уровне определить присутствие ионов Ca²⁺ в карбонатах. Химический состав франкаменита был проанализирован с помощью электронно-зондового микроанализатора JEOL JXA-8230, оснащенного пятью WDS-спектрометрами в независимой лаборатории (Wuhan Microbeam

Analysis Technology Co., Ltd). Количественный элементный анализ выполнялся на волнодисперсионном спектрометре при ускоряющем напряжении 15 кВ и токе 10 нА, диаметр зонда – 10 мкм. Время набора сигнала на пике и фоне составляло по 10 с. Матричные поправки рассчитывались по методу ZAF.

2. Геологическое положение и петрография чароитовых пород с франкаменитом, химический состав франкаменита. Обсуждение результатов исследования.

В геологическом отношении Мурунский массив расположен в северо-западной части Алданского щита Сибирского кратона, входит в состав калиевой щелочной провинции [6] и связан с мезозойскими рифтогенными структурами [7]. Многофазная Мурунская интрузия проявлена на дневной поверхности тремя крупными выходами (Большемурунским, Маломурунским и Догалдынским массивами) и несколькими мелкими. Она сложена широкой вариацией по составу щелочных пород от калиево-щелочно-ультраосновных, через основные и средние до щелочных гранитов и уникальных силикатно-карбонатных пород – чароититов и барий-стронциевых карбонатитов [8–10]. Возраст Мурунского комплекса оценивается как мезозойский. Кристаллизация чароитовых пород датируется K-Ar методом ($131,3 \pm 2,4$ млн лет), $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методом по K-полевоому шпату ($134,1 \pm 2,9$ млн лет), $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методом по тинакиту ($133,0 \pm 3,0$ млн лет) [7, 11]. Породы Мурунского комплекса характеризуются калиевой агпаитностью, что определяет их минералогическое разнообразие. Здесь обнаружено более 90 минеральных видов, в том числе 11 новых минералов [2, 3, 12–15] одним из которых является франкаменит. В Мурунском массиве в чароитовых породах встречается несколько разновидностей франкаменита по окраске и облику. Цвет его варьирует от серых, голубовато- и сиреневато-серых оттенков до зеленоватых и бурых цветов [8]. Зелёный франкаменит отмечается на участке Магистральный в виде идиоморфных кристаллов (Рисунок 1 а), а сиренево-серый образует дендритовые агрегаты и встречается на участках Старый и Восточный (Рисунок 1 f).

Призматические удлинённые идеоморфные и гипидиоморфные кристаллы зелёного франкаменита достигают в длину 10–15 см при ширине 1,5 см. В качестве включений зелёный франкаменит содержит вытянутые вдоль удлинения по трещинам спайности включения кварца и чароита (Рисунок 1 b, c). В шлифе при скрещенных поляризаторах во франкамените отмечается полисинтетическое двойникование (Рисунок 1 c). В чароитовой породе наряду с франкаменитом встречаются идиоморфные и гипидиоморфные зёрна эгирина $0,3 \times 1$ мм, образующие сростки в виде радиально-лучистых и линзовидных агрегатов (Рисунок 1 a, d, e). Непосредственного контакта эгирина с франкаменитом не наблюдается. Также отмечаются довольно крупные линзовидные обособления микроклина размером 4×2 мм (Рисунок 1 a, d, e), сростки зёрен сульфидов, преимущественно галенита. Кварц присутствует в виде двух разновидностей. Одна представлена отдельными вытянутыми зёрнами, размер которых не превышает $0,5 \times 2$ мм. Вторая разновидность кварца представляет собой мелкие изометричные и субизометричные зёрна, образующие линзовидные агрегаты среди чароитовой массы. Возможно, вторая разновидность образуется в результате перекристаллизации первой. Чароит также образует две разновидности. Первая представлена длиннопризматическими недеформированными кристаллами чароита, вытянутыми вдоль удлинения кристалла франкаменита. Вторая разновидность чароита отмечается на удалении 0,5–1 см от франкаменита в виде деформированных лейст чароита, ассоциирующих с изометричными обособлениями микроклина (Рисунок 1 a-e).

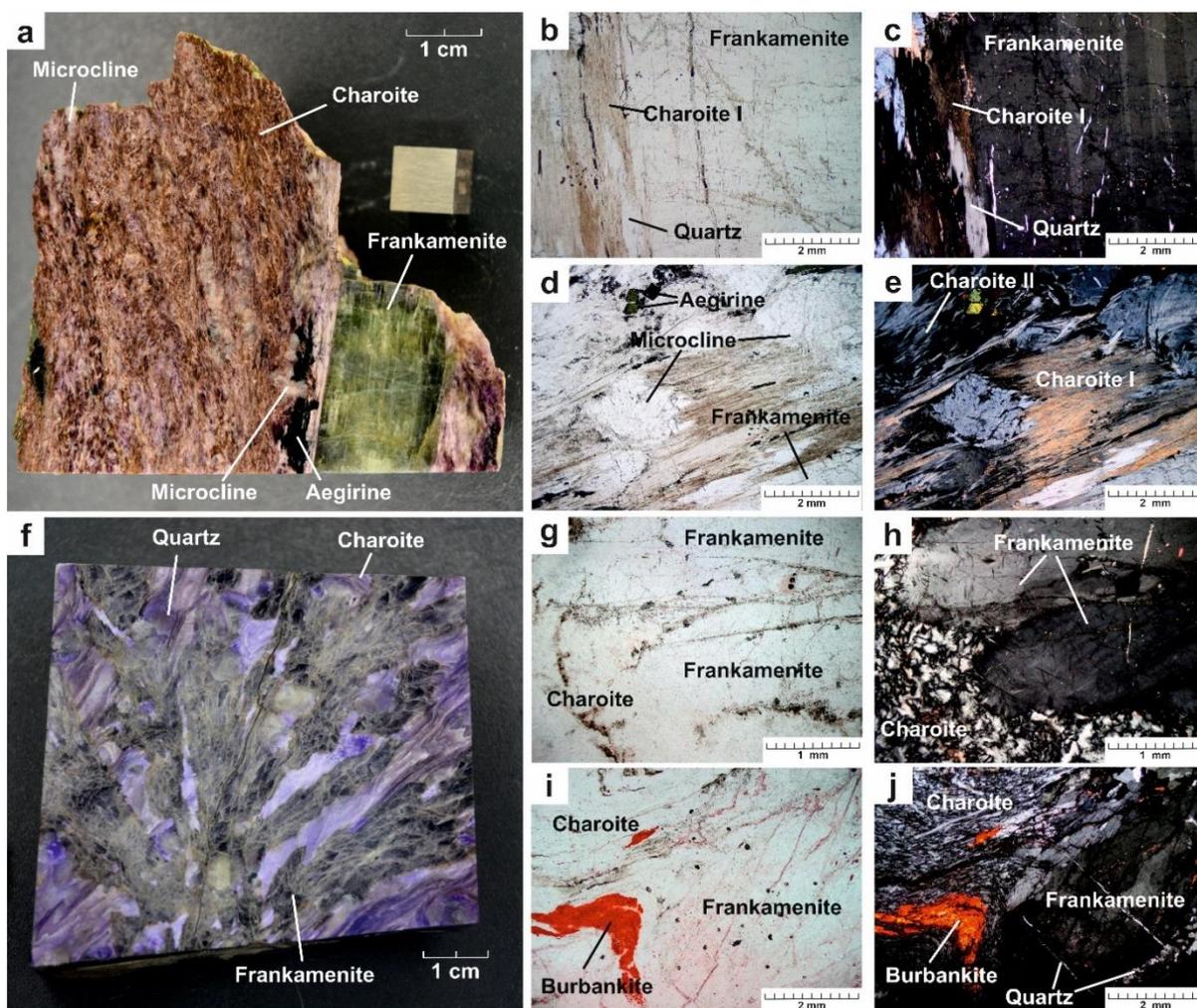


Рисунок 1 – Фотографии фрагментов чароитовой породы с зелёным (а) и сиренево-серым (f) франкамением. Микрофотографии шлифов в проходящем свете (b-e, g-j). Поляризаторы параллельны (b, d, g, i), поляризаторы скрещены (c, e, h, j). Образец с зелёным франкамением предоставлен минералогическим музеем горнопромышленного предприятия АО «Байкалкварсамоцветы». Образец с сиренево-серым франкамением находится в частной коллекции Митичкина М.А.

Дендритовые агрегаты сиренево-серого франкамения достигают в длину 10–15 см и сложены вытянутыми досковидными зёрнами 10×3 мм (Рисунок 1 f). В чароитовых породах, содержащих сиренево-серый франкамение, отмечаются кристаллы жёлтого стисиита, линзовидные обособления щелочного амфибола и кварца. В шлифах франкамение почти бесцветен и имеет еле уловимый серо-желтоватый оттенок. При скрещенных поляризаторах в зёрнах отмечается полисинтетическое двойникование (Рисунок 1 h). Чароит в ассоциации с сиренево-серым франкамением представлен сланцевато-плойчатой морфологической разновидностью. Минерал не образует отчётливых контактов с чароитом, а внутри зёрен отмечаются множественные включения длиннопризматических игольчатых кристаллов чароита, что указывает на их близкую по времени кристаллизацию. Среди лейст чароита встречается апатит в виде единичных субизометричных зёрен. Зёрна франкамения разбиты двумя системами трещин. Ранняя заполнена кварцем, а поздняя – бурбанкитом (Рисунок 1 i, j). В чароитовой породе прожилки кварца и бурбанкита прослеживаются вдоль сланцеватости и плойчатости чароитовых агрегатов. Причём в чароите они образуют довольно широкие раздувы шириной до 0,6 мм, в то время как во франкамении ширина кварцевых и бурбанкитовых прожилков не превышает 0,02 мм, что свидетельствует о разных реологических свойствах чароита и франкамения.

Химический состав зелёного франкаменита (мас. %, среднее по 6 анализам, количество H₂O рассчитано по стехиометрии): SiO₂ 55,52(8); FeO 0,25(4); MnO 0,33(5); MgO 0,08(2); CaO 21,89(13); Na₂O 6,54(11); K₂O 10,33(11); SrO 0,57(7); H₂O 1,76(15); F 4,63(22); –O=F -1,95(9). Эмпирическая формула рассчитана на 12 катионов Si:



Химический состав сиренево-серого франкаменита (мас. %, среднее по 6 анализам, количество H₂O рассчитано по стехиометрии): SiO₂ 55,54(7); FeO 0,07(5); MnO 0,81(12); MgO 0,03(2); CaO 21,13(7); Na₂O 6,95(7); K₂O 10,81(12); SrO 0,42(4); H₂O 1,73(18); F 4,27(23); –O=F -1,80(9). Эмпирическая формула рассчитана на 12 катионов Si:



Несмотря на то, что химический состав франкаменита изменяется в очень узких пределах, существуют различия между зелёной и сиренево-серой разновидностями как по основным элементам, так и по примесям. В зелёном франкамените отмечаются более высокие концентрации CaO, FeO, MgO, SrO, F и пониженные содержания Na₂O, K₂O, MnO по сравнению с таковыми в сиренево-серой разновидности минерала (Рисунок 2). Отмечается положительная корреляция между K₂O и Na₂O и отрицательная между SrO и MnO, CaO и K₂O + Na₂O на диаграммах отношений этих компонентов во франкамените.

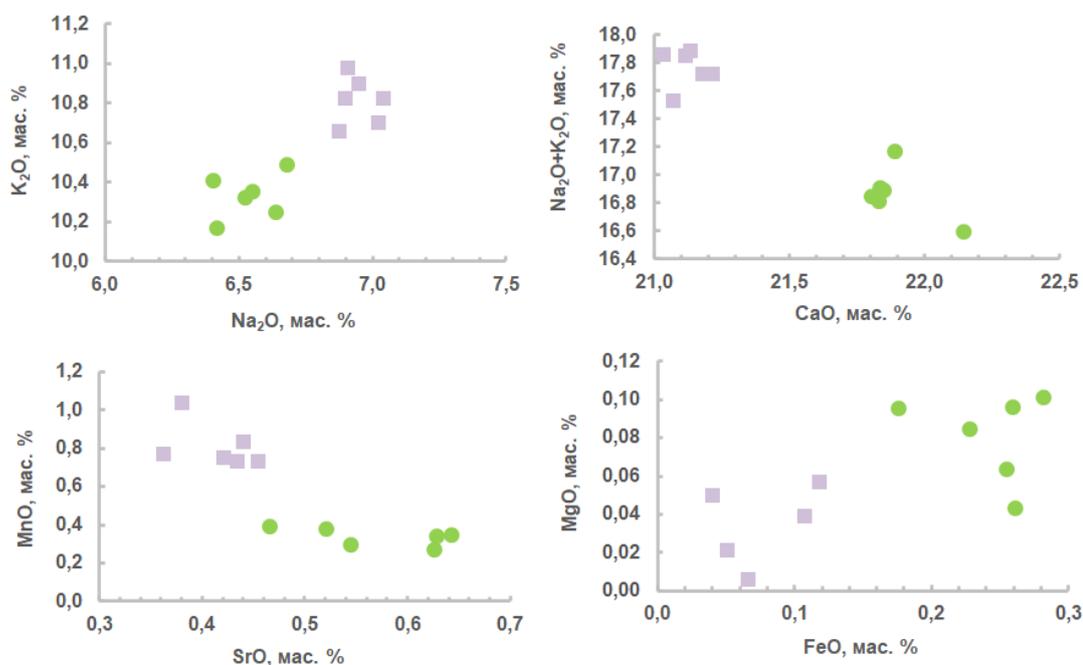


Рисунок 2 – Диаграммы отношения оксидов элементов в зелёном (зелёные круги) и сиренево-сером (сиреневые квадраты) франкамените.

Горячие споры среди учёных вызывает вопрос генезиса чароита и ассоциирующих с ним минералов. Поскольку, почти все проявления чароита были выявлены в фенитах, то долгое время преобладала точка зрения метасоматического происхождения, высказанная В.П. Роговой [3, 16] и поддержанная многими исследователями. Затем Ю.А. Алексеевым [17] и Н.В. Владыкиным с соавторами [18] было высказано мнение о магматической природе происхождения чароита в результате кристаллизации минерала из силикатно-карбонатного флюидонасыщенного расплава, сформировавшегося как остаточный продукт глубокой дифференциации ультракалиевого щелочного расплава. Комбинированной гидротермально-метасоматической точки зрения на генезис чароита придерживаются В.М. Бирюков и Н.В. Бердников [9]. А.А. Конев с соавторами и Е.И. Воробьёв в своих работах [8, 10] высказали мнение о полигенном магмато-метасоматическом происхождении чароитовой минерализации.

Они считают, что существует два вида чароитовой минерализации – первый как продукт кристаллизации щелочного силикатно-кальциевого расплава, образующийся на заключительном этапе развития ультракальевого сиенитового комплекса, и второй, возникающий в результате чароитизации вмещающих пород под воздействием флюидизированного расплава. Если принять версию образования чароитовых пород из силикатно-карбонатного флюидонасыщенного расплава, то изменение состава разновидностей франкаменита из разных участков месторождения может свидетельствовать об эволюции минералообразующей среды. Близкая по времени кристаллизация чароита совместно с сиренево-серым франкаменитом, а также повышенные содержания в нём K_2O , Na_2O , MnO указывают на более низкотемпературное образование этой разновидности минерала по сравнению с зелёным франкаменитом, в котором отмечаются повышенные содержания CaO , FeO , MgO .

Известно, что морфология и размеры кристаллов зависят не только температуры, но и от концентрации компонентов в минералообразующей среде. Появление дендритовых агрегатов сиренево-серого франкаменита происходит вследствие расщепления – результат деформаций в приповерхностных участках растущего кристалла, возникших за счёт неравномерного вхождения изоморфных примесей. В зелёном франкамените примеси присутствуют практически в таких же количествах, как и в сиренево-сером (1,3 и 1,4 мас. % соответственно), но явление расщепления кристаллов у этой разновидности не наблюдается. Возможно, именно примесь MnO вызывает данный эффект.

В работе [5] показано, что зелёный цвет франкаменита связан с присутствием в его структуре в качестве изоморфных примесей ионов Fe^{3+} и Mn^{2+} , тогда как серые тона окраски вызваны наличием ещё и ионов Mn^{3+} . По-видимому, на окраску сиренево-серого франкаменита влияют не только структурные примеси, но и включения игольчатых кристаллов чароита, придающих сиреневый оттенок минералу.

Образование мелкозернистых агрегатов кварца, наличие трещин катаклаза во франкаменитах и появление плейчатой структуры в агрегатах чароита на некотором удалении от крупных кристаллов франкаменита указывают на то, что чароитовые породы испытывали частичную перекристаллизацию в условиях неравномерного давления, пластическую и хрупкую деформацию в соответствии с реологическими свойствами минералов.

3. Выводы

Франкаменит в чароитовых породах на Мурунском массиве встречается в виде двух разновидностей, которые отличаются морфологическими особенностями, окраской, набору ассоциирующих минералов и химическим составом. Для зелёного франкаменита характерна идиоморфная и гипидиоморфная форма кристаллов и ассоциация с чароитом двух генераций, идиоморфными кристаллами эгирина, линзовидными агрегатами микроклина и зёрнами кварца. Сиренево-серый дендритовидный франкаменит ассоциирует со сланцевато-плейчатым чароитом, линзовидными агрегатами амфибола и кварца, идиоморфными и гипидиоморфными зёрнами стисииита и апатита. Чароитовые породы с франкаменитом претерпели деформацию в условиях дислокационного метаморфизма.

4. Благодарности

В заключение авторы искренне благодарят Гуо Шенг-Бина из Wuhan Microbeam Analysis Technology Co., Ltd за помощь в проведении EPMA и минералогический музей горнопромышленного предприятия АО «Байкалкварсамоцветы», предоставившего образец зелёного франкаменита для исследования.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22–27–00183, <https://rscf.ru/project/22-27-00183/>.

5. Литература

- [1] Rozhdestvenskaya, I.V., Nikishova, L.V., Bannova I.I., Lazebnik Yu.D. Kanasit – refinement and features of the structure, structural typomorphism // *Min.journal*. – 1988. – Vol. 10 (4). – P. 31–41.
- [2] Nikishova, L.V., Lazebnik, K.A., Rozhdestvenskaya, I.V., Emel'yanova, N.N., Lazebnik, Y.D. Frankamenite $K_3Na_3Ca_5(Si_{12}O_{30})F_3(OH)\cdot H_2O$ – a new mineral, triclinic variety of canasite from charoitites // *Zap. Vsesoyuznogo Mineral. Obschestva*. – 1996. – Vol. 2. – P. 106-108.
- [3] Rogova, V.P., Rogov, Y.G., Drits, V.A., Kuznetsova, N.I. Charoite – a new mineral and new jewelry-stone // *Zap. Vsesoyuznogo Mineral. Obschestva*. – 1978. – vol. 1. – P. 94-100.
- [4] Nikishova, L.V., Lazebnik, K.A., Rozhdestvenskaya, I.V. Triclinic canasite from the charoitites of Yakitiya // *Miner. J.* – 1992. – Vol. 1. – P. 71-77.
- [5] Evdokimov, M.D., Reguir, E.P., Canasite in charoitites from the Murun alkaline complex // *Proc. Russ. Mineral. Soc.* – 1994. – Vol. 1. – P. 104-118.
- [6] Kostyuk, V.P., Panina, L.I., Zhidkov, A.Ya., Orlova, M.P., Bazarova, T.Yu. Potassium alkaline magmatism of the Baikal-Stanovoy rift system. – Novosibirsk: Nauka, 1990. – 234 p.
- [7] Wang Y., He H., Ivanov A.V., Zhu R., Lo C. Age and origin of charoite, Malyy Murun massif, Siberia, Russia // *International Geology Review*. – 2014. – Vol. 56 (8). – P. 1007-1019.
- [8] Konev, A.A., Vorobiev, E.I., Lazebnik, K.A., 1996. Mineralogy of the Murunsky Alkaline Massif // Publishing House of SB RAS. ed. Sci. Res. Center Trofimuk Inst. Petrol. Geol. Geophys., Siberian Branch Russ. Acad. Sci., Novosibirsk, 1996. – 221 p.
- [9] Biryukov V.M., Berdnikov N.V. On the paragenetic relation between charoite mineralization and alkaline metasomatism // *Zap. Vsesoyuznogo Mineral. Obschestva*. – 1992. – Vol. 6. – P. 59-76.
- [10] Vorobiev, E.I. Charoite // *Geo Publishing House*. – Novosibirsk, 2008. – 140 p.
- [11] Ivanov, A.V., Vladykin, N.V., Demonterova, E.I., Gorovoy, V.A., Dokuchits, E.Y. $^{40}Ar/^{39}Ar$ geochronology of the Malyy (Little) Murun Massif, Aldan Shield of the Siberian Craton: a simple story for an intricate igneous complex // *Minerals*. – 2018. – Vol. 602. – P. 1-21.
- [12] Lazebnik, K.A., Nikishova, L.V., Lazebnik, Y.D., Tokkoite a new mineral of charoitites // *Miner. J.* – 1986. – Vol. 3. – P. 81-83.
- [13] Chakhmouradian A.R., Cooper M.A., Ball N., Reguir E.P., Medici L., Abdu, Y.A., Antonov A.A. Vladykinite, $Na_3Sr_4(Fe^{2+}Fe^{3+})Si_8O_{24}$: A new complex sheet silicate from peralkaline rocks of the Murun complex, eastern Siberia, Russia // *American Mineralogist*. – 2014. – Vol. 99. – P. 235-241.
- [14] Kaneva E.V., Radomskaya T.A., Suvorova L.F. and Mitichkin M.A. Crystal chemistry of fluorocarletonite, a new mineral from the Murun alkaline complex (Russia) // *Eur. J. Mineral.* – 2020. – Vol. 32. – P. 137-146.
- [15] Dokuchits E.Yu., Jiang S.-Y., Stepanov A.S., Zhukova I.A., Radomskaya T.A., Marfin A.E., Vishnevskiy A.V. Geochemistry of Ca-(K)-(Na) silicates from charoitites in the Sirenevyy Kamen gemstone deposit, Murun Complex, Eastern Siberia // *Ore Geology Reviews*. – 2022. – Vol. 143.
- [16] Rogova, V.P., Zavialova, L.L. Mineral composition of the charoite rock – a new gemstone // In: *Minerals and Mineral Associations of the Eastern Siberia*. – 1977. – P. 135-141.
- [17] Alekseev, Yu.A. Geology of new (charoitic) carbonatites and related rocks // *Dokl. Academy of Sciences of the USSR*. – 1983. – Vol. 272 (1). – P. 184-187.
- [18] Vladykin, N.V., Matveeva, L.N., Bogacheva, N.G., Alekseev, Y.A. New data on charoite and charoitic rocks // in: *Mineralogy and genesis of precious stones of the Eastern Siberia*. – Novosibirsk, 1983. – P. 41-56.

ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К РАЗВЕДКЕ И ОСВОЕНИЮ ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КЮЧУС В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Николай Самсонов¹, Александр Гудин¹, Глеб Моралев¹, Александр Толстов²,
Афанасий Слепцов³

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

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

3 ООО «Геовектор», 677000, Россия, г. Якутск, ул. Кулаковского, 20

THE MAIN APPROACHES TO THE EXPLORATION AND DEVELOPMENT OF THE KYUCHUS GOLD DEPOSIT IN MODERN CONDITIONS

Nikolay Samsonov¹, Alexander Gudin¹, Gleb Moralev¹, Alexander Tolstov², Afanasy Sleptsov³

1 ALROSA JSC, 5, Sovetskaya str., Novosibirsk, 630007, Russia

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

3 Geovector LLC, 24, Kulakovskogo str., Yakutsk, 677000, Russia

Annotation. The main approaches to the exploration and development of the Kuchus gold deposit in modern conditions as an object very complex in geological structure, mining and technological parameters are considered. The problematic areas of project development and commissioning are considered. A set of measures has been developed to partially offset the risks characteristic of a large investment project located in a remote area with extreme natural and climatic conditions.

Целью статьи является анализ подходов к разведке и подготовке к эксплуатации золоторудного месторождения Кючус в современных условиях. Внимание к современным подходам к формированию новых крупных горнорудных проектов, способствующих развитию инвестиционных процессов в Арктической зоне [1;2], может свидетельствовать о том, что статья является актуальной, имеющей научную и практическую значимость.

Месторождение Кючус — весьма хорошо и качественно изученный крупный золоторудный объект, доведенный до завершения поисково-оценочной стадии, и на нем, по сути, была выполнена также часть разведочной стадии. Однако, принятые ранее подходы к разведке и освоению месторождения заметно устарели, равно как и результаты ранних технико-экономических оценок эффективности инвестиций, не учитывающие современные реалии и новые возможности.

Месторождение Кючус, расположенное на границе Усть-Янского и Верхоянского улусов Республики Саха (Якутия), выявлено в 1963 году. Объект прошел поисково-оценочные работы, которые выполнялись как в советский, так и постсоветский период, а в течение 1990-х годов несколько зарубежных компаний выполняли комплекс геологоразведочных работ. Заключительный этап разведочных работ завершился защитой ТЭО недропользователем (компанией «Полюс») временных разведочных кондиций в 2009 году [3;4;5].

Крупный оцененный золоторудный объект продолжительное время находился в нераспределенном фонде недр. В октябре 2021 года состоялся аукцион по результатам новый недропользователь приобрел месторождение Кючус¹. Причин, по которым месторождение достаточно длительный период являлось «невостребованным», несколько.

Месторождение отнесено к участку недр федерального значения и это накладывало ограничения на форму инициирования аукциона. Сложности создавали труднодоступность

¹ ООО «Белое золото» (на 67,7% принадлежит «Селигдар» (ПАО)) получило лицензию на разработку Кючуса, выиграв в октябре 2021 года аукцион на освоение Кючуса, предложив 7,735 млрд рублей.

объекта, отсутствие инфраструктуры и энергетики, экстремальность природно-климатических условий [4;5]. По технологическим свойствам руды месторождения относятся к труднообогатимым и упорным для цианирования, рудная минерализация представлена золотоносными сульфидами. Руды содержат вредные примеси в виде мышьяка, ртути, сурьмы и органического углерода. Подавляющая часть золота находится в виде примеси в сульфидах – пирите и арсенопирите. Для переработки руды рассматривались различные технологии обогащения, в т.ч. автоклавная.

Кючус является крупным объектом для отработки открытым и подземным способом, но имеет сложные горнотехнические условия, что определяет проведение доразведки, а, фактически, полную переразведку. Более трети запасов руды предназначено для отработки подземным способом, но при этом по сложности геологического строения месторождение отнесено ко 2-й группе, а не к 3-ей. Суммарно подсчитанные и утвержденные запасы составляют 38,257 млн т руды, 189,4 т золота при среднем содержании 4,97 г/т, табл. 1.

Таблица 1 – Запасы золота месторождения Кючус (Главная рудная зона), по состоянию на 01.01.2009 г.

| Категория запасов | Запасы руды, млн т | Среднее содержание золота, г/т | Запасы металла, т | Доля запасов в общем балансе, % |
|--|--------------------|--------------------------------|-------------------|---------------------------------|
| Балансовые запасы для открытой добычи (борт 1,5 г/т) | | | | |
| C1 | 28,207 | 4,2 | 118,397 | 100 |
| Итого | 28,207 | 4,2 | 118,397 | 100 |
| Балансовые запасы для подземной добычи за пределами контура карьера (борт 3,0 г/т) | | | | |
| C1 | 0,143 | 6,89 | 0,985 | 1 |
| C2 | 9,907 | 7,07 | 70,046 | 99 |
| C1+C2 | 10,05 | 7,07 | 71,031 | 100 |
| Итого балансовых запасов | | | | |
| C1 | 28,350 | 4,22 | 119,382 | 63 |
| C2 | 9,907 | 7,13 | 70,046 | 37 |
| C1+C2 | 38,257 | 4,97 | 189,428 | 100 |

В 200–500 м от Главной рудной зоны месторождения была выполнена поисковая оценка серии новых рудных тел Первомайской рудной зоны с детальностью, обеспечивающей подсчет запасов категории C₂ для открытой добычи. Это позволило оценить ресурсы новой минерализованной зоны в 30 т золота. Известно, что оруденение месторождения выходит за границы контура лицензионной площади и сырьевая база его может быть существенно увеличена не только за счет глубоких горизонтов, но и флангов.

Месторождению свойственны сложные геотехнические и гидрологические условия. Также предстоит решать вопросы гидрологии и гидрогеологии. Здесь следует согласиться в том, что русло реки Кючус осложняет открытую отработку месторождения [3], которое придется отводить. Стоит отметить, что на месторождении существует и проблема «льдиности», но относится она целиком к чехлу из рыхлых отложений.

Вовлечение в промышленную отработку резервных месторождений разведка которых проведена 20 и более лет назад предопределяет проведение дополнительных разведочных работ для уточнения геологического строения и технологических свойств полезного ископаемого, в первую очередь, участка первоочередной отработки. При существенном изменении технико-экономических показателей освоения месторождения возникнет потребность переутверждения запасов кондиций.

В целом, в результате перебурирования и сгущения сети должны в целом быть получены параметры месторождения, что и в выполненных работах предшественников. Вместе с тем, должна повыситься точность/достоверность оценок как по запасам, так и по содержаниям

золота. В этой связи новая программа ГРР нацелена не только на повышение качества запасов, но и на их существенный прирост.

В совокупности, эти факторы определяют необходимость обширной геологоразведочной программы (охватывающей обе рудные зоны — Главную и Первомайскую) для уточнения параметров оруденения и подготовки месторождения к отработке. Кроме того, главной задачей следует рассматривать применение общепринятых аналитических методов аналитических работ и технологических испытаний с более высоким пределом обнаружения, чем это было использовано ранее. Важным становится и обоснованный выбор «длины» технологической цепочки горно-обогатительного предприятия, определение вида и показателей качества получаемой товарной продукции — гравитационно-флотационный концентрат или сплав Доре. Перспективная минерально-сырьевая база рудного района позволяет дополнительные резервы оруденения и создать крупный центр по добыче золота из упорных руд [6].

Трансформация оценки месторождения Кючус затронет создание устойчивых современных систем работы горной и горнотранспортной части, а также производственной, энергетической (в т.ч. АСММ «Росатома») и обеспечивающей площадок с применением высокопроизводительной техники и оборудования, работающих в экстремальных условиях.

Литература

[1] Galtseva N.V. Problems and conditions of increasing the attractiveness of investment projects in the mining industries of the North-East of Russia // Rational development of mineral resources. – 2018. – No. 4. – P. 34-40.

[2] Strategy for the development of the Arctic zone of the Russian Federation and ensuring national security until 2035.

[3] Konyshov V.O. On the feasibility of developing the Kyuchus gold deposit in the Arctic part of Yakutia. // Collection of abstracts of the IX International Scientific and Practical Conference «Scientific and methodological foundations of forecasting, prospecting, evaluation of deposits of diamonds, precious and non-ferrous metals» (April 17-19, 2019, Moscow, Central Geological Exploration Research Institute of Precious Metals). – 2019. – P. 220-222.

[4] Report on the results of prospecting, evaluation and exploration work at the Kuchus gold deposit, with the calculation of gold reserves according to comp. as of 01.01.2009 JSC Yakutsk Mining Company, Polyus Geological Exploration Management Company (Kushnarev P.I., Slezko V.A., Markevich V.Yu., etc.). – Yakutsk-Moscow. – 2009. – 2714 p.

[5] Feasibility study of temporary exploration conditions for calculating reserves for open and underground mining at the facilities of the Kuchus ore field. Volume 1. Explanatory note. Book 1. – FSUE "Vnikipromtechnologies", 2007. – 291 p.

[6] Nesis V.N. Economically justified goal-setting and operational analysis of the effectiveness of prospecting and evaluation works. // Exploration and protection of mineral resources. – 2018. – No. 3. – P. 49-55.

ПРИМЕНЕНИЕ “COSCAD 3D” С ЦЕЛЬЮ ВЫДЕЛЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ УЧАСТКОВ НА ЗОЛОТОЕ ОРУДЕНЕНИЕ

Антон Сачарысов, Тимофей Адаров, Лия Дубовченко, Руслан Чёрный
Вилуйская ГРЭ АК «АЛРОСА» (ПАО), 678174, Россия, г. Мирный, ул. Вилуйская, 76

THE USE OF “COSCAD 3D” IN ORDER TO IDENTIFY PROMISING AREAS FOR GOLD MINERALIZATION

Anton Sacharysov, Nimofei Adarov, Liya Dubovchenko, Ruslan Cherny
Vilyuyskaya GRE AK “ALROSA” (PAO), 7B, Vilyuyskaya str., Mirny, 678174, Russia

Annotation. In this paper, used “COSCAD 3D” computer technology. For this purpose, a comprehensive analysis of the factual basis is carried out: geological, geotectonic and geophysical information. Then the classification of the source data is applied using the “COSCAD 3D” program. The classification map allows you to identify promising areas, choose the location of mining and drilling operations and clarify the geological structure of the area under study.

1. Введение

В настоящее время актуальной задачей интерпретации геофизических данных является формирования прогнозно-поисковых моделей локализации рудных объектов.

В данной работе применена методика динамических сгущений К-средних в программном комплексе спектрально-корреляционного анализа «Coscad 3D», с целью выявления участков, потенциально являющимися рудоконтролирующими [2]. Основная цель заключается в том, что способ классификации полей позволяет конкретизировать направления доразведки на территории прилегающего участка и, соответственно, минимизировать затраты на проведение геолого-геофизических исследований.

2. Описание объекта исследования

Изучаемый участок расположен в зоне Главного Таймырского разлома. Структура района мозаично-блоковая и сложная, сочетанием многопорядковой складчатости и многочисленных разноамплитудных продольных и поперечных разрывных нарушений, доминирующими являются вдоль складчатые разломы северо-восточного и север-северо-восточного направлений. Зона Главного Таймырского разлома имеет взбросо-сдвиговый характер. Нарушения северо-восточного простирания подчеркиваются обилием зон дробления, сульфидно-кварцевого прожилкования, кварцевых жил, зон метасоматического преобразования пород, вплоть до березитов. Кварцево-жильные образования образуют единую полосу шириной от 1 до 10 км, протягивающуюся с юго-запада на северо-восток за пределы участка до м. Челюскин, образуя, так называемую Серебрянскую ветвь Челюскинского кварцево-жильного пояса. Простирание ветви согласно с простиранием основных разрывных и складчатых структур района – 20-40° СВ. Внутренняя структура ветви определяется морфологией и характером размещения слагающих ее кварцево-жильных зон, которые представляют собой сложную систему субпараллельных кварцевых жил и прожилков. В геологическом строении территории принимают участие докембрийские, мезозойские и кайнозойские отложения. На территории широко развиты гидротермально-метасоматические образования.

Золотое оруденение локализуется в зонах проявленности гидротермально-метасоматических процессов. Характерными из них являются зоны жильно-прожилкового окварцевания и сульфидной минерализации, сопровождающиеся серицитизацией, хлоритизацией и альбитизацией пород. Области сульфидной минерализации отражаются зонами линейных магнитных аномалий отрицательного знака. Участки серицитизации проявляются в материалах аэрогамма-спектрометрии областями повышенных содержаний калия, сменяющимися на

флангах участками повышенных содержаний урана. Также на изучаемой территории выявлены 30 пунктов минерализации рудного золота.

На исследуемой территории проведена аэромагнитная и аэрогамма спектрометрическая съемка масштаба 1:50 000 [1]. Для проведения районирования по данным аэромагнитной и аэрогамма спектрометрической съемки построены различные трансформанты геофизических полей: локальное поле, региональное поле, градиент поля, соотношения U/K, U/Th, K/Th и др. С целью выявления закономерностей размещения золотого оруденения проведен анализ и построены гистограммы распределения относительно различных трансформант геофизических полей [3]. В результате анализа данных выбраны 4 трансформанта геофизических полей (рисунок 1, 2): полный градиент локального магнитного поля, локальная составляющая магнитного поля, распределение отношений естественных радиоактивных элементов U/K и U/Th.

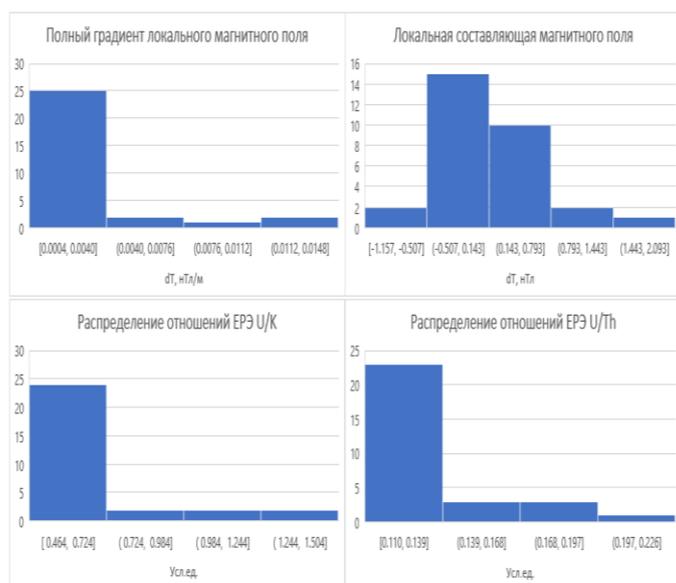


Рисунок 1 – Гистограммы распределения золотого оруденения: А) полный градиент локального магнитного поля, Б) локальная составляющая магнитного поля, В) распределение отношений ЕРЭ U/K, Г) распределение отношений ЕРЭ U/Th.

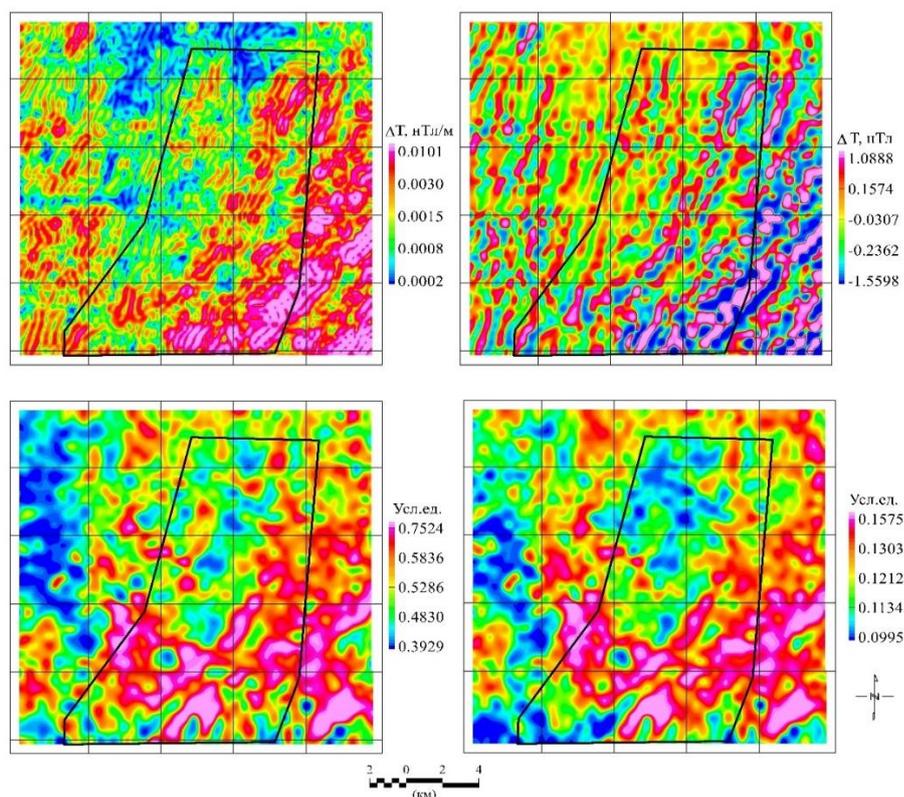


Рисунок 2 – А) Полный градиент локального магнитного поля, Б) локальная составляющая магнитного поля, В) соотношение U/K, Г) соотношение U/Th.

По выбранным трансформантам геофизических полей проведено районирование территории в программе “COSCAD 3D” (рисунок 3). Наибольший интерес представляют классы 2, 5. Характер их расположения хорошо коррелируется с ранее выделенными разломами. Диапазон максимальных и минимальных значений классов по методу К-средних приведены в (таблице 1).

Таблица 1 – Значения классов по методу К-средних

| № класса | Пределы полного градиента, ΔT , нТл | Пределы локальной составляющей, ΔT , нТл | Пределы U/K, Усл.ед. | Пределы U/Th, Усл.ед. |
|----------|---|--|----------------------|-----------------------|
| 1 | [0.0013; 0.0032] | [-0.39; 0.14] | [0.50; 0.55] | [0.11; 0.12] |
| 2 | [0.0007; 0.0017] | [-0.12; 0.19] | [0.46; 0.51] | [0.11; 0.12] |
| 3 | [0.0015; 0.0043] | [-0.68; -0.01] | [0.42; 0.47] | [0.11; 0.12] |
| 4 | [0.0086; 0.0149] | [0.50; 2.03] | [0.52; 0.61] | [0.12; 0.14] |
| 5 | [0.0015; 0.0036] | [-0.35; 0.21] | [0.64; 0.76] | [0.13; 0.15] |
| 6 | [0.0009; 0.0023] | [-0.07; 0.32] | [0.53; 0.58] | [0.13; 0.14] |
| 7 | [0.0032; 0.0073] | [-1.55; -0.38] | [0.65; 0.80] | [0.15; 0.18] |

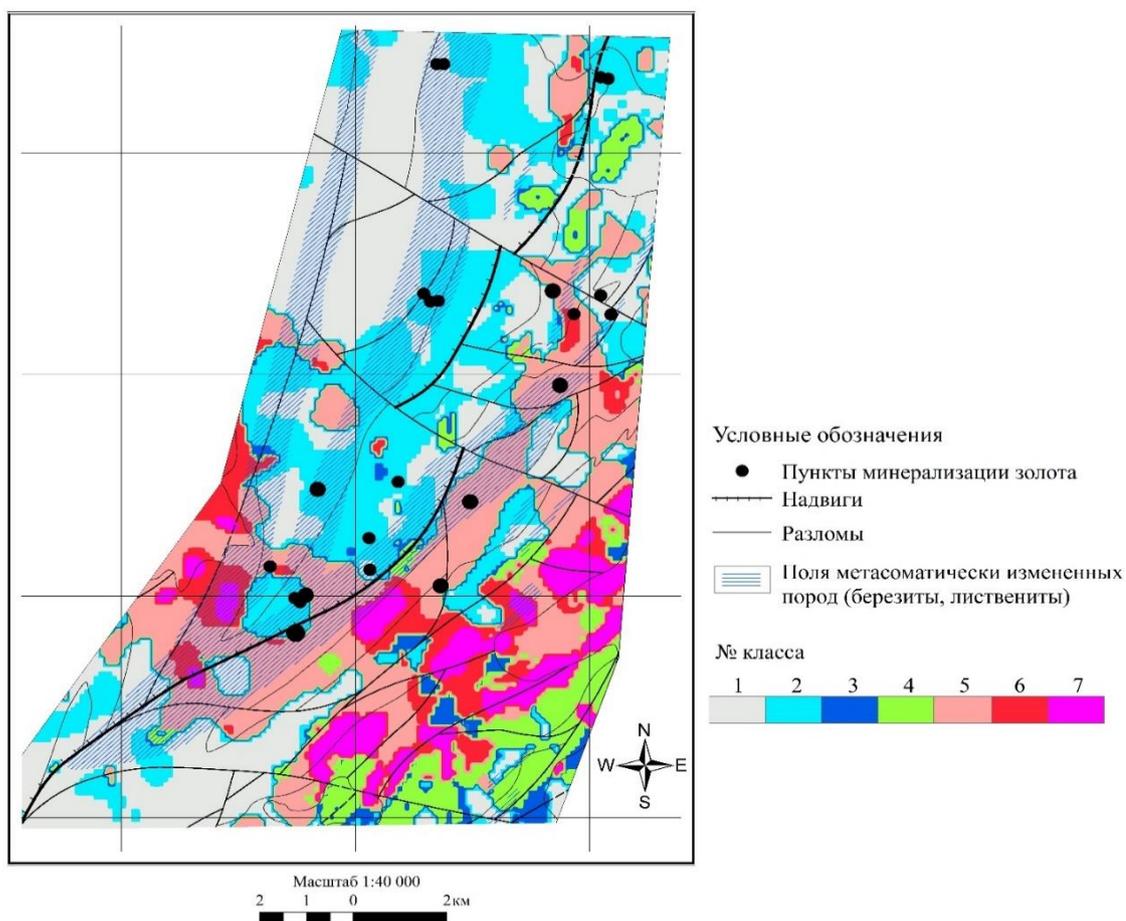


Рисунок 3 – Классификация по методу К-средних.

3. Выводы

Отмечается, что золоторудная минерализация преимущественно расположены во 2 и 5 классе север-северо-восточного простирания. Полученная карта отчетливо коррелируется с геологической картой, из чего можно предположить о качестве и информативности, выполненной классификации, а также использовать данные о статистических характеристиках наиболее интересных участков. Так, в центре планшета отчетливо выделяется надвиг субмеридионального простирания. Участок делится на две части северо-западную (преимущественно терригенные отложения) и юго-восточную (метаморфизованные и вулканогенные отложения) части. Юго-Восточная часть отмечается наиболее сложным строением.

Карта классификаций методом К-средних позволит выделить перспективные участки, выбрать расположение горно-буровых работ и уточнить геологическое строение исследуемой площади.

4. Литература

- [1] Lazarev F.D., Uklein V.N., Koshevoy V.V., etc. Complex aerogeophysical survey on the Northern Taimyr (Taimyr Dolgan-Nenets district, Krasnoyarsk Krai T-47-XXX, T-48-XIX, T-48-XX, T-48-XXI, T-48-XXIX, T-48-XXX, T-48-XXV, T-48-XXVII, T-48-XXVI, T-48-XXVIII, T-48-XXIII), scale 1:50,000, 1997
- [2] Fan T.H., Petrov A.V., Do M.F., Lai M.Z., Nguyen C.L. Features of the geological structure of the central part of Vietnam based on the results of interpretative processing of gravity exploration data in the computer technology "COSCAD 3D". News of higher educational institutions // Geology and exploration. – 2020. – 63(5). – P. 77-90.
- [3] Adarov, T. D. The use of statistical characteristics of geophysical fields for regional forecasting of deposits / T. D. Adarov, E. E. Solovyov, V. Y. Fridovsky // Bulletin of the North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov. – 2014. – Vol. 11. – No. 5. – P. 76-81.

ГЕОФЛЮИДОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВЕНДСКОГО ТЕРРИГЕННОГО КОМПЛЕКСА СЕВЕРА НЕПСКО-БОТУОУБИНСКОЙ НЕФТЕГАЗОНОСНОЙ ОБЛАСТИ

Розалия Севостьянова

ФГБУН ФИЦ «ЯНЦ СО РАН» «Институт проблем нефти и газа СО РАН»,
677007, Россия, г. Якутск, ул. Автоторожная, 20

GEOFLUID DYNAMIC FEATURES OF THE VENDIAN TERRIGEN COMPLEX IN THE NORTH OF THE NEPA-BOTOUBA OIL AND GAS REGION

Rozaliya Sevostianova¹

Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, 20, Avtodorozhnay str., Yakutsk, 677007, Russia

Annotation. A detailed analysis of the geofluid-dynamic conditions of the Vendian terrigenous complex in the north of the Nepa-Botuoba oil and gas region, whose oil and gas potential is highly estimated, has been carried out. The characteristic features of the mechanism of migration of waters and hydrocarbons are revealed. For the first time, separation in the direction of the secondary migration of gas and groundwater has been established.

1. Введение

Существуют различные представления о механизмах миграции и аккумуляции углеводородов (УВ) в водонасыщенных толщах пород в депрессионных водонапорных системах [1-3]. Однако полного понимания механизма нефтегазонакопления в зонах устойчивого (в масштабах геологического времени) дефицита пластового давления пока нет.

Целью работы является детализация представлений о механизмах газонакопления в областях с регионально выдержанным дефицитом пластового давления в северной части Непско-Ботубинской нефтегазоносной области.

2. Основной раздел

Непско-Ботубинская нефтегазоносная область при сравнительной оценке перспектив нефтегазоносности осадочного чехла Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции, которая охватывает преобладающую часть Сибирской платформы, является одной из наиболее богатых своим углеводородным сырьем. К настоящему времени здесь выявлено около 30-ти месторождений углеводородного сырья, в том числе уникальное по запасам газа Чайядинское нефтегазоконденсатное месторождение (НГКМ) и крупнейшие Среднеботубинское НГКМ, Тас-Юряхское НГКМ, Верхневиллючанское НГМ и Талаканское НГКМ.

Особенностью геологического строения рассматриваемой территории является наличие в них мощной сложнопостроенной соленосной толщи, которая является определяющим фактором гидрогеохимического и гидродинамического строения. В целом она обеспечивает значительную гидрогеологическую закрытость недр, что придает ей свойства автономных углеводородных систем [4]. Литологические особенности осадочного чехла, заключающиеся в чередовании проницаемых и плотных пород, позволяют достаточно уверенно выделить в разрезе следующие гидрогеологические комплексы [3].

Здесь выделяются следующие региональные водоносные комплексы:

- вендский, терригенный (борулахская, бочугунорская и курсовская свиты), водоупором для которого являются сульфатно-карбонатные отложения нижнеиктешской подсвиты;
- венд-кембрийский, карбонатный (верхняя часть нижнеиктешской и низы среднеиктешской подсвит), перекрытый среднеиктешским водоупором;
- нижнекембрийский, карбонатный (сокуканская свита), водоупором является мощная соленосная толща (юрегинская свита);

- нижнекембрийский, карбонатный (нелбинская, улегирская, олекминская свиты), перекрыт чарским соленосным водоупором;
- ниже-среднекембрийский, карбонатный (ичерская и метегерская свиты), выше которого залегает верхоленский терригенно-карбонатный водоупор.

Основным объектом поисково-разведочных работ являются нижний терригенный и два вышележащих карбонатных комплекса, перекрытые мощной соленосной толщей. С ними связаны все открытые в регионе промышленные скопления нефти и газа.

В начале 70-х годов XX века в процессе поисково-разведочных работ на Среднеботубинском НГКМ в терригенных отложениях венда, были выявлены аномально низкие пластовые давления. На глубине около 1500 м в ботубинском горизонте среднее значение пластового давления составляет 14 МПа. Позже был установлен региональный характер проявления дефицита пластового давления на северо-востоке НБ НГО, что повышает перспективы нефтегазоносности вендских отложений

Минерализация пластовых вод в терригенных отложениях позднего докембрия составляет примерно 350-400 г/л и более, в венд-кембрийских карбонатных горизонтах она достигает 500-600 г/л [5].

На юге Сибирской платформы водорастворенные газы в подсолевом терригенном комплексе представлены тремя типами: метановым, азотно-метановым и азотным. Непско-Ботубинская НГО и прилегающие к ней районы полностью входят в зону распространения метановых газов. Свободные газы на всех выявленных здесь месторождениях УВ также повсеместно характеризуются метановым типом и высоким содержанием тяжелых УВ газового конденсата [6].

Пластовые давления в подсолевом комплексе изменяются вполне упорядоченно, свидетельствуя о наличии в северной части Непско-Ботубинской НГО единой региональной геофлюидо-динамической системы. Главной особенностью подсолевого нефтегазоносного комплекса на уровне ботубинского горизонта является существенное снижение пластового давления по отношению к гидростатическому в среднем на 30%. В осинском горизонте пластовое давление (Рпл) соответствует условно гидростатическому (Руг), т.е. Рпл/Руг ~1; в ботубинском и харыстанском горизонтах – Рпл/Руг ~ 0,74; в вилючанском горизонте Рпл/Руг ~ 0,72, т. е. по разрезу отмечается постепенное снижение гидродинамического потенциала от подошвы солей до фундамента.

Наряду с подземными водами в недрах присутствует газовая компонента, формирующая значительные скопления УВ в виде месторождений свободного газа и газовых шапок нефтяных залежей, а также находящаяся в растворенном состоянии в воде и нефти. Благодаря своей способности к накоплению потенциальной энергии за счет сжатия, газ может выступать основным аккумулятором и источником пластовой энергии, способствующей движению флюидов в глубоких горизонтах. Газонасыщенность вод в венд-кембрийском терригенно-карбонатном комплексе, по данным Анциферова А.С., составляет 373–780 см³/дм³. Состав растворенного газа преимущественно метановый (свыше 75%, включая тяжелые углеводородные компоненты). Коэффициент насыщения газом подземных вод колеблется в пределах от 0,2 до 0,8, что объясняется неоднородность совместного влияния температурного и барического факторов в геологическом времени. Несмотря на относительно низкое газосодержание пластовых вод, общий объем свободного газа достаточно велик и может влиять на динамику дальней миграции, самостоятельно формировать направления струйной миграции газовой фазы. На этом фоне рассольные воды, как составной элемент подсолевой флюидной системы, пассивны, в условиях пониженных пластовых давлений не имеют достаточного потенциала для формирования активного регионального потока.

На примере Верхневилючанского НГКМ можно увидеть данную геофлюидодинамическую особенность. Так, в газовых залежах подсолевого нефтегазоносного комплекса наблюдается несоответствие градиента роста давления с глубиной по гидростатическому закону. Фактический градиент роста пластового давления в интервале между залежами юряжского и вилючанского горизонтов значительно меньше гидростатического и составляет округленно 1,6

МПа на 900 м, или 0,174 МПа на каждые 100 м глубины. Градиент пластового давления определяется плотностью газа и весом газового столба. В нижней части газового интервала расположена залежь вилочанского горизонта, здесь распределение пластовых давлений больше соответствует гидростатическому закону (линия тренда параллельна линии гидростатических давлений) на уровне водоносного интервала, подпирающего газовую залежь, на глубинах свыше 2500 м.

3. Выводы

Установлено, что на региональном и локальном уровнях в подсолевом комплексе северо-восточной части Непско-Ботуобинской НГО гидродинамический потенциал системы неоднороден для различных флюидов, как следствие, формирование скоплений УВ контролируется газовой динамикой и пассивностью гидродинамического поля. Зоны пониженных пластовых давлений играют роль сборных областей для газовых флюидов как при вертикальной, так и латеральной миграции углеводородов.

4. Благодарности

Выражаю благодарность ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН за возможность проведения исследований на научном оборудовании Центра.

5. Литература

- [1] Abukova L.A., Yakovlev Yu.I. Geocological concept of development of oil fields with low hydrodynamic potential // *Neftepromislovoe delo*. – 2008. – No 5. – P. 15-18.
- [2] Yakovlev Yu.I., Simashov R.G. Hydrodynamic justification of recognition of water drive systems of depression type // *Geologiya Nefti i Gaza*. – 1982. – No. 9. – P. 23-27.
- [3] Vozhov V.I., Antsiferov A.S., Bukaty M.B. Hydrogeochemical zonality of Upper Precambrian and Cambrian oil and gas deposits of the Siberian platform // *Hydrogeology of oil and gas basins of Siberia: Collected papers*. – Novosibirsk, 1977. – P. 4-18. (Proceedings of Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Raw Materials, Iss. 254).
- [4] Abukova L.A., Volozh Yu.A. Fluid geodynamics of deeply buried zones of oil and gas accumulation in sedimentary basins // *Russian Geology and Geophysics*. – 2021. – Vol. 62. – No. 8. – P. 878-886.
- [5] Antsiferov A.S., Bakin V.E., Vorobiev V.N. et al. Nepa-Botuoba anticline is a new promising area for oil and gas production in the East of the USSR. – Novosibirsk: Nauka, Sib. Br., 1986. – 243 p.
- [6] Sitnikov V.S., Kushmar I.A., Bazhenova T.K. et al. Geology and oil and gas potential of the southwest of the Republic of Sakha (Yakutia): realities, prospects, forecasts: Collected papers. – St. Petersburg: VNIGRI, 2014. – 436 p.

ПЕРСПЕКТИВЫ ТОМТОРСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ НА ВЫЯВЛЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ МАРГАНЦА

Афанасий Слепцов¹, Александр Толстов²

1 ООО «Геовектор», 677000, Россия, г. Якутск, ул. Кулаковского, 20

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

PROSPECTS OF THE TOMTOR ORE FIELD FOR THE DETECTION OF MANGANESE DEPOSITS

Afanasy Sleptsov¹, Alexander Tolstov²

1 Geovector LLC, 24, Kulakovskogo str., Yakutsk, 677000, Russia

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

Annotation. Overview of the prospects of the Tomtor massif for the detection of manganese ores. The carbonatite complex of the massif as the most promising for manganese and the connection of magnetic anomalies with rocks containing manganese. The presence of high concentrations of manganese within the array makes it possible to predict the presence of sites with industrial concentrations within the Tomtor ore field, which creates real prospects for identifying deposits of manganese ores with unique reserves.

1. Введение

Томторское рудное поле находится в северо-западной части Республики Саха (Якутия) и приурочено к одноименному массиву ультраосновных щелочных пород и карбонатитов. Томтор расположен в северо-восточной части Средне-Сибирского плоскогорья в зоне его сочленения с Северо-Сибирской низменностью. Оруденение, приуроченное к массиву Томтор, выявлено в 1977 году Онкучахской партией НПО «Севморгео» при проведении поисково-оценочных работ на алмазы, бокситы, фосфор и редкие металлы [1].

Геологоразведочные работы на месторождении проводились Эбеляхской ГРП ПГО Якутскгеология в 1985–1990 гг. на ниобий, фосфор, редкие земли и алюминиевое сырье в центральной части массива Томтор, в результате чего были выявлены уникально-богатые пироксид-монацит-крандаллитовые руды (Толстов, 1991). В 1990–1997 гг. пределах участка Буранного была проведена предварительная разведка богатых руд в переотложенных корях выветривания (Толстов, 1998). В результате было подтверждено наличие редкометального и фосфорно-редкометального оруденения в железисто-фосфатных корях выветривания, а также были вскрыты и изучены подстилающие коренные рудоносные породы (кальцитовые, доломит-кальцитовые, полиминеральные редкометальные, фосфорно-редкометальные карбонатиты) [2]. Кроме участка Буранного, расположенного в центре массива в его пределах выделяются еще два участка с редкометальным оруденением: Северный и Южный, на которых были проведены геологоразведочные работы в 2015–2018 гг. ОАО «Якутскгеология».

Еще в ходе работ 1985–1990 гг. на массиве были отмечены повышенные содержания марганца, а работы на участках Северный и Южный в 2015–2018 гг. подтвердили повышенные содержания марганца, в частности, в технологических пробах, отобранных в рамках геологического задания, однако специальных исследований по нему не проводились [3]. Ниже приведены результаты исследований, проведенных по отобранным технологическим пробам на участках Северный и Южный Томторского рудного поля.

Изучение вещественного состава руд по малым технологическим пробам проводилось комплексом современных минералого-аналитических методов исследования, применяемых в практике геологоразведочных работ при изучении обогатимости руд. Минералогические исследования выполнены в соответствии с нормативно-методическими документами Научного

совета по минералогическим методам исследования (НСОММИ). Исследования проводились ФГБУ «ВИМС» по заказу ОАО «Якутскгеология» в рамках Государственного Контракта № 07/14 от 09.09.2014г. по объекту: «Оценочные работы на Северном и Южном участках Томторского рудного поля (Республика Саха (Якутия))».

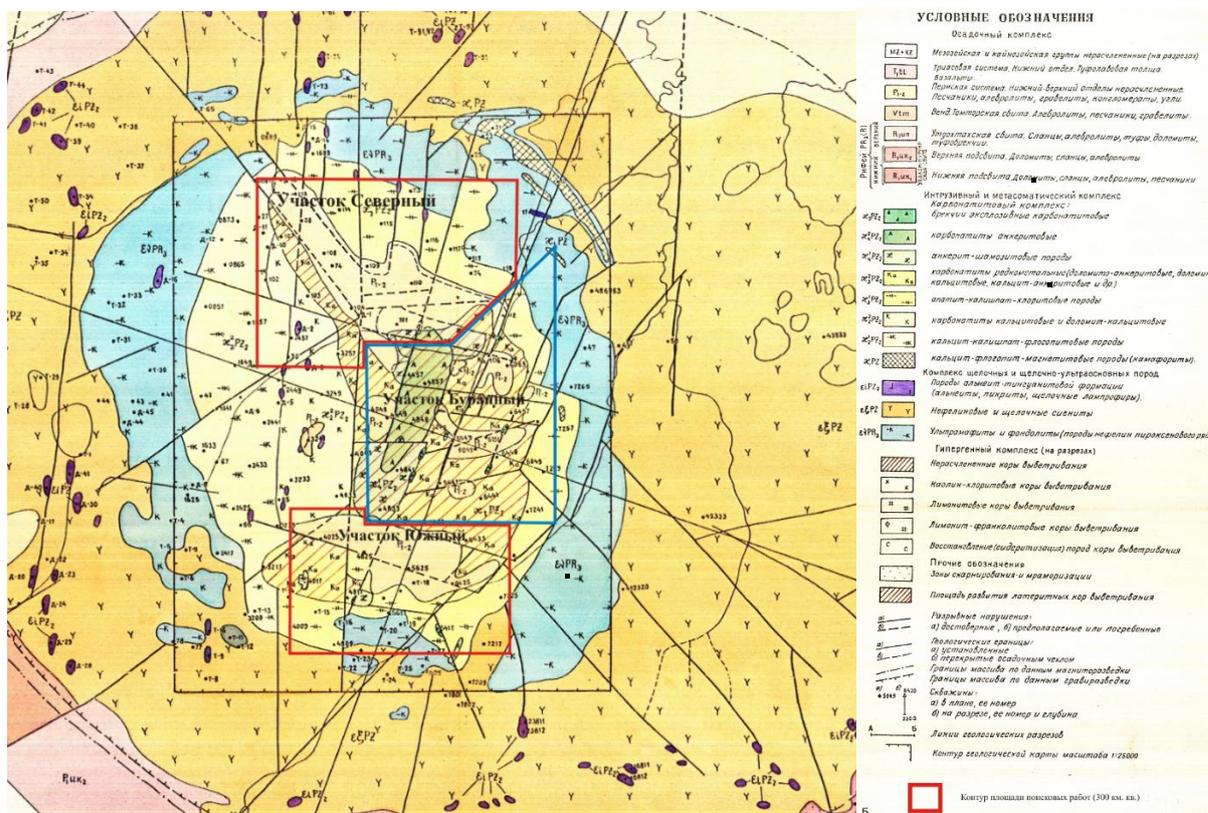


Рисунок 1 – Геологическая карта массива Томтор со снятым чехлом мезо-кайнозойских отложений (Толстов, 1998).

2. Геологическая позиция, вещественный состав руд и их потенциал

Томторское комплексное ниобий-редкоземельное месторождение приурочено к центральной части одноименного массива щелочных пород, ультрамафитов и карбонатитов и связано с рудоносными карбонатитами и их корами выветривания (Толстов, 1991, 1998). Массив Томтор имеет в плане округлую, почти изометричную форму (рисунок 1).

В строении массива принимают участие комплексы силикатных пород и карбонатитов, по периферии центрального ядра массива на контакте с силикатными породами встречаются промежуточные карбонатно-силикатные образования и кальцит-флогопит-магнетитовые породы (камафориты) [4]. Внешняя часть массива сложена щелочными и нефелиновыми сиенитами, которые с запада, севера и востока окаймляют нефелин-пироксеновые породы (ультрамафиты и фойдолиты), а с юга - образования карбонатитового комплекса [5].

Возраст пород массива окончательно не установлен. Данные изотопной геохронометрии дают очень большой разброс возрастов от 860 до 350 млн лет, причем, судя по этим цифрам наиболее древними являются фойдолиты, сиениты – моложе, пикриты и карбонатиты - еще моложе. Весьма широкое развитие в пределах района массива Томтор имеют коры выветривания, однако, мощности их весьма различны в зависимости от состава субстрата. Минимальные мощности (5–30 м) имеют гипергенные образования, развитые по породам силикатного комплекса, максимальные (более 300 м) по карбонатитам. Наиболее рудоносными из всех пород массива являются карбонатиты и коры выветривания по ним [6,7].

Собственно карбонатитовый комплекс массива Томтор сложен породами двух совокупностей (двух групп), названных по рудной нагрузке безрудной и рудной. Каждая группа включает два главных минеральных типа пород: первый смешанный, имеющий, в основном, карбонатно-

силикатный состав, и второй – собственно карбонатитовый, сложенный карбонатами кальция, магния, марганца и железа (кальцитовые, доломитовые, анкеритовые и с сочетанием этих ведущих минералов) [2,3,5].

Образования рудной группы карбонатитового комплекса подразделяются по рудной нагрузке на две подгруппы: фосфорно-редкометальную и редкометальную. По количественному соотношению и составу карбонатов различаются:

-карбонатиты с преобладанием кальцита (анкерит-кальцитовые);

-карбонатиты с преобладанием доломита (кальцит-доломитовые).

В некоторых разновидностях доломит имеет специфический состав - он сильно обогащен марганцем (марганцовистый доломит), содержание которого в 1.5–2 раза превышает содержание железа. В редкометальной подгруппе выделяются два главных минеральных типа пород - анкерит-шамозитовые породы и анкеритовые карбонатиты.

Минеральный состав этих пород широко варьирует и принятое название «анкерит-шамозитовые» является условным, отражающим лишь постоянное присутствие в них анкерита с железистостью (f_m) равной 30–40% и тонкочешуйчатого минерала с рентгеновской характеристикой септехлорита и железистостью также 30–40%. Кроме анкерита (20–30%) и шамозита (10-20%) в породе обычно присутствует кальцит (3-40%), гидробиотит (5-20%), серицит (5-15%), апатит (3-5%), гематит или гетит (2-15%), часто отмечаются сидерит (до 10%), родохрозит (до 5%), кварц (до 10%), пирит (до 10%).

Для редкометальной подгруппы характерен специфический тип карбонатитов выделенный под названием «анкеритовые карбонатиты». Они слагают овальное тело площадью 2.5 км², вытянутое в субмеридиональном направлении. Тело располагается в центральной части ядра, картируется значительной аномалией силы тяжести и пространственно сопряжено с анкерит-шамозитовыми породами.

Суммарное количество карбонатов в этом типе составляет 70–95%. Ведущим среди них является анкерит (45–70%), расчетная железистость которого (f_m) варьирует от 30 до 50%, но большей частью ближе к 40%. Как правило, в значительных количествах присутствует кальцит (2–20%), часто много родохрозита (3–15%), иногда присутствует сидерит (3–10%).

Глубокая кора выветривания массива Томтор сложена весьма специфическими образованиями и в значительной мере отличается от большинства типичных латеритных кор выветривания карбонатитовых массивов, достаточно полно охарактеризованных в отечественной и зарубежной литературе.

Среди главных отличий томторских карбонатитов, перспективных на марганцевое оруденение, особенно выделяются следующие:

- 1) Большая мощность коры выветривания, превышающая 300 метров.
- 2) Значительная роль образований, более монолитных и прочных, чем исходные породы - карбонатиты.
- 3) Минеральный состав, с большим присутствием марганцевых минералов, содержащихся в меньшем количестве в коре массива.

В период проведения ГРП на участке, были отобраны технологические пробы из коры массива, основной редкометальной рудоносности, однако по которым можно косвенно судить перспективе марганцевого оруденения карбонатитов массива.

Минеральный состав отобранных проб, руды технологических проб относятся к пирохлор-монацит-крандаллитовому типу с высоким содержанием порообразующих минералов (каолинита, слюд, сидерита). По данным оптико-минералогического и рентгенографического анализов, результаты которых приведены в таблице 1, главными минералами являются фосфаты, к которым относятся минералы гр. крандаллита, содержание которых для «Техпр СЕВ-1» и «Техпр ЮГ-1» составляет 27% и 35% соответственно и монацит, количество которого составляет 10% и 13%, каолинит и слюды.

Таблица 1 – Минеральный состав руд технологических проб, масс. %

| Минерал | Содержание, масс. % | |
|---|---------------------|--------------|
| | «Техпр СЕВ-1» | «Техпр ЮГ-1» |
| Фосфаты | | |
| Минералы группы крандаллита | 25 | 35 |
| Монацит | 10 | 12 |
| Ниобаты | | |
| Пироклор | 1 | 2 |
| Оксиды титана | | |
| Анализ, рутил | 4 | 5 |
| Сульфиды | | |
| Пирит, марказит, галенит, сфалерит | 2 | 1 |
| Силикаты | | |
| Каолинит | 30 | 20 |
| Слюды + хлорит | 13 | 14 |
| Кварц | 5 | 1 |
| Карбонаты | | |
| Сидерит+кальцит | 10 | 10 |
| Прочие | | |
| Гидроксиды железа, барит, циркон, флюорит, апатит, плагиоклаз | | |

Как видно из таблицы 1 количество карбонатов в коре массива несущей основное редкометальное оруденение составляет 10%, тогда в нижележащем горизонте карбонаты являются основной массой массива.

Каолинит является главным порообразующим минералом, присутствует в тесной ассоциации с другими минералами, формирует матрицу руды. Иногда отмечаются практически мономинеральные агрегаты. Присутствует как в кристаллической, так и в скрытокристаллической форме.

Хлорит и гидрослюда также широко распространены в руде технологических проб, присутствуют в основной ткани породы в виде прослоев грязно зеленого цвета. Как правило, в состав таких агрегатов могут входить как силикатные и алюмофосфатные минералы, так и сульфиды.

Карбонаты представлены двумя минеральными видами (кальцитом и сидеритом). Сидеритовые и кальцитовые агрегаты в основном неправильной формы тонкокристаллического строения. Карбонаты присутствуют в цементе как в виде гнезд различного размера, так и прожилках.

По существу, это средне-мелкокристаллические агрегаты, сформированные зернами идиоморфной (в случае кальцита) и неправильной (сидерит) форм, плотно прилегающими друг к другу. Состав карбонатов по данным рентгеноспектрального микроанализа приведен в таблице 3. Также сидерит надежно идентифицируется рентгенографическим анализом по межплоскостным расстояниям.

Апатит в материале технологических проб присутствует в качестве второстепенного минерала. Находится в тесной ассоциации с минералами гр. крандаллита и каолинитом. В процессе корообразования зерна апатита дезинтегрировались вплоть до тонкозернистого микрокристаллического изотропизированного агрегата. В спектре люминесценции апатита четко проявлены линия редких земель Dy^{3+} и Mn^{2+} [3,8].

Помимо результатов исследования технологических проб рудных карбонатитов, предшественниками, в ходе исследований, носящих более широкий характер, были обнаружены и другие группы пород относящиеся к интрузивному этапу развития массива **камафориты**, представляющие апатит-магнетитовые и магнетитовые руды [8,9].

Породы этой серии фиксируются, в основном, в кольцевой зоне, и центральной части массива, где их присутствие подтверждено бурением. тела камафоритов выделяются интенсивными локальными магнитными аномалиями (до 2000 γ) на фоне достаточно спокойных полей вмещающих пород. Интрузивные фации камафоритов представлены секущими пластообразными, дайковыми и жильными телами. Субпластовые и трубообразные тела, повидимому характерны для камафоритов [9,10].

Таблица 2 – Химический состав минералов, масс. %

| | Na | Mg | Al | Si | P | K | Ca | Ti | Mn | Fe | | |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------------|---------|
| 1 | - | 2.29 | 14.15 | 23.12 | - | 8.98 | - | 0.32 | 0.30 | 2.42 | каолинит | |
| 2 | 0.16 | 0.52 | 10.15 | 28.22 | 0.13 | 11.21 | 0.17 | - | - | 0.85 | КПШ | |
| 3 | - | - | 9.80 | 30.37 | 0.15 | 13.54 | 0.09 | - | - | 0.12 | | |
| 4 | - | 9.12 | 6.54 | 21.93 | 0.09 | 8.60 | - | 0.46 | 0.73 | 4.91 | гидрослюда | |
| 5 | - | 9.04 | 6.96 | 20.99 | - | 8.58 | 0.18 | 0.44 | 0.60 | 5.67 | | |
| 6 | 8.06 | - | 10.16 | 31.95 | 0.08 | 0.18 | 0.15 | - | - | - | альбит | |
| 7 | 8.42 | - | 10.28 | 31.51 | 0.18 | 0.19 | 0.19 | - | - | - | | |
| 8 | 8.89 | - | 10.40 | 31.56 | 0.13 | 0.09 | 0.00 | - | - | 0.11 | апатит | |
| 9 | 0.17 | - | - | 0.21 | 18.35 | 0.00 | 38.40 | - | - | 0.13 | | |
| 10 | F | Ca | Al | | | | | | | | | флюорит |
| | 48.59 | 51.30 | 0.07 | | | | | | | | | |
| 11 | S | Fe | | | | | | | | | Пирит | |
| | 53.60 | 45.91 | | | | | | | | | | |

Таблица 3 – Химический состав карбонатов, масс. %

| Na | Mg | Al | Si | P | S | K | Ca | Mn | Fe | O | |
|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|-------|---------|
| 0.39 | 0.11 | 0.28 | 0.09 | 0.29 | 0.10 | 0.00 | 0.16 | 0.59 | 41.96 | 13.35 | сидерит |
| - | - | 0,14 | 0,09 | - | - | 0,12 | 35,59 | 2,12 | 0,49 | 15,32 | кальцит |

Таблица 4 – Распределение марганца в гипергенном комплексе участка Северный объекта Томтор

| № скважины и пробы | 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 |

Камафориты, с одной стороны, завершают фациальный ряд нефелин-пироксеновых пород (фоидолитов), а с другой – предшествуют карбонатитам. В то же время, вполне вероятно, что камафориты, являясь изверженными породами, проявлялись как в интрузивной, так и в эффузивной фациях глубинности Томторского массива [8,10].

К интрузивной фации камафоритов отнесены магнетитовые, апатит-магнетитовые породы в северной части массива, обозначающие крутопадающие линзовидные, пластообразные тела вблизи контакта с нефелиновыми сиенитами. Это крупно-, среднеравнозернистые породы с непостоянным составом: апатит - 10–14 %; магнетит - 90–60 %, иногда присутствует кальцит, серпентин, хлорит и биотит – до 20%.

По результатам буровых работ выделяется участок с повышенными концентрациями марганца в камафоритах на участке Северный. Ниже в таблицах 4, 5 представлены средние содержания

по выявленным содержаниям MnO в скважинах на участке Северный, и приведена оценка прогнозных ресурсов, показывающая уникальные значения.

Таблица 5 – Прогнозные ресурсы марганца в гипергенном комплексе участка Северный

| Площадь перспективного участка, тыс. м ² | Средняя мощность, м | Объём млн. м ³ | Удельный вес руды, т/м ³ | Объём руды, млн. т | Среднее содержание MnO в руде, % | Вес руды, млн. т |
|---|---------------------|---------------------------|-------------------------------------|--------------------|----------------------------------|------------------|
| 1550.6 | 23 | 35.7 | 3.8 | 135.5 | 12.83 | 17.4 |

3. Выводы

Учитывая, что помимо выявленного участка с повышенным содержанием марганца в пределах участка Северный по наличию в пределах массива других магнитных аномалий, чем характерно отличаются камафориты, следует прогнозировать наличие других участков с промышленными концентрациями марганца, что создает реальные перспективы выявления месторождений марганцевых руд с уникальными запасами.

4. Благодарности

Исследование выполнено за счет 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. – P. 81-91.
- [2] Konoplev A.D., Tolstov A.V., Vasiliev A.T., Nechelyustov G.N., Kuzmin V.I., Sklyadneva V.M., Dubinchuk V.T., Konopleva E.V., Sidorenko G.A. Features of localization of rare metal mineralization at the Tomtor deposit // In the collection: *Rare-metal-uranium ore formation in sedimentary rocks. Collection of scientific papers*. – Moscow, 1995. – P. 223-241.
- [3] Lapin A.V., Tolstov A.V., Kulikova I.M. Features of the distribution of lanthanides, yttrium, scandium and thorium in unique complex rare metal ores of the Tomtor deposit // *Geochemistry*. – 2016. – No. 12. – P. 1104-1121.
- [4] Baranov L.N., Tolstov A.V. The role of foscrites in mineralogy of the Tomtor ore field // *Natural resources of the Arctic and Subarctic*. – 2022. – Vol. 27. – No. 2. – P. 195-206.
- [5] Okrugin A.V., Tolstov A.V., Sleptsov A.P., Baranov L.N. Petrochemical features of the association of ultrabasic-alkaline rocks and carbonatites of the Tomtor massif and interpretation of possible trends in their evolution // *Natural resources of the Arctic and Subarctic*. – 2019. – Vol. 24. – No. 4. – P. 7-24.
- [6] Okrugin A.V., Tolstov A.V. Petrogeochemical characteristics of the syenite-alkali-ultrabasic complex of rocks of the Tomtor massif (Northeast of the Siberian Platform) // *Domestic Geology*. – 2017. – No. 5. – P. 56-66.
- [7] Sleptsov A.P., Tolstov A.V., Tomashev A.V., Samsonov N.Yu., Baranov L.N. New in the calculation of reserves of multicomponent ores (on the example of the Tomtor ore field) // *Exploration and protection of the subsoil*. – 2019. – No. 6. – P. 38-46.
- [8] Baranov L.N., Tolstov A.V., Okrugin A.V., Sleptsov A.P. New in mineralogy and geochemistry of apatite—magnetite ores of the Tomtor massif, North-East of the Siberian platform // *Ores and Metals*. – 2018. – No. 2. – P. 42-54.
- [9] Tolstov A.V., Lazareva E.V., Baranov L.N., Karmanov N.S., Zhmodik S.M. Promising types of ores of the Tomtor massif // In the collection: *Geology and mineralogy of Northern Eurasia. Materials of the meeting dedicated to the 60th anniversary of the Institute of Geology and Geophysics of the SB Academy of Sciences of the USSR*. – 2017. – P. 229-230.
- [10] 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. – P. 423-427.

ХАРАКТЕР ВНЕДРЕНИЯ ТРАППОВ ВБЛИЗИ КИМБЕРЛИТОВ

Михаил Томшин¹, Константин Константинов^{2,3}, Саргылана Гоголева¹

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

2 ФГБОУ ВО «Иркутский национально-исследовательский технический университет», 664074,
Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 83,

3 ФГБУН «Институт земной коры СО РАН», 664033, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 128

THE NATURE OF THE INTRODUCTION OF TRAPS NEAR KIMBERLITES

Mikhail Tomshin¹, Konstantin Konstantinov^{2,3}, Sargilana Gogoleva¹

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

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

3 Institute of the Earth's Crust SB RAS, 128, Lermontov str., Irkutsk, 664033, Russia

Annotation. The behavior of trap sills near the kimberlites of the Daldino-Alakit diamond-bearing region of Western Yakutia has been studied. It is shown that during the formation of kimberlite diatremes, accompanied by pulsating explosions shifting to the top, there is a significant compaction of the sedimentary rocks containing kimberlites, in which thermoelastic stress fields arise. As a result, zones that are difficult to penetrate for viscous, protocrystalline-enriched basite magmas appear near kimberlites. When introduced, the latter, near kimberlite diatremes, form torus-shaped shafts with sharply increasing intrusive power. Sometimes magma, flowing around kimberlites, creates "trappless windows", sometimes it splits into low-power "tongues". Quite often, the sills made by such magma in this situation crumple, acquire a wave-like shape. The conclusion that all the listed morphological features of traps arise during the introduction of magma, gives reason to use it as one of the indirect methods of searching for kimberlites, especially during the areal drilling of territories covered by continuous trap fields conducted by ALROSA in Western Yakutia.

Изучено поведение трапповых силлов вблизи кимберлитов Далдыно-Алакитского алмазоносного района Западной Якутии. Показано, что при формировании кимберлитовых диатрем, сопровождаемых пульсационными, смещающимися кверху взрывами, происходит существенное уплотнение вмещающих кимберлиты осадочных пород, в которых возникают поля термоупругих напряжений. В результате, вблизи кимберлитов проявляются зоны труднопроницаемые для вязких, в том числе обогащенных протокристаллами базитовых магм. При внедрении последние, перед кимберлитами, образуют торообразные валы с резко возрастающей в интрузивах мощностью. Иногда базитовая магма, обтекая кимберлиты, создает «безтрапповые окна», иногда щепится на маломощные «языки». Довольно часто силлы, выполненные такой магмой в данной обстановке сминаются, приобретают волнообразную форму. Проведенное ранее геологическое, петрографическое, петрохимическое и петромагнитное изучение пермо-триасовых траппов района показало, что они формировались в три этапа. Каждый этап (фазы внедрения) выполнен своей, петрографически и геохимически различающейся порцией базитового расплава. По этим свойствам они были разделены на три группы – петрохимические типы. Разделение исследованных траппов по составу на петротипы показало, что поведение интрузий вблизи кимберлитов зависит, прежде всего, от их внутреннего строения и состава. Интрузивы первого петрохимического типа практически не реагируют на кимберлиты и вмещающие их породы. Известны случаи, когда силлы траппов срезают часть диатрем и сдвигают срезанную верхнюю часть в сторону от основного тела, могут полностью перекрывать диатремы и, как бы, «запечатывать» их. В данном случае

кимберлиты не имеют выхода на поверхность и трудны в плане поиска. Данные интрузивные тела установлены на разных глубинах, но в основном бронируют примерно треть водоразделов территории. Строение интрузивов относительно однообразное. Они выполнены в основном мелко- и среднезернистыми долеритами и габбро-долеритами, реже отмечаются шпирсы ферро-габбро и габбро-пегматитов. По геохимическому составу долериты интрузивов отвечают среднему траппу и относятся к умереннотитанистым разностям (табл.). Фактор Q долеритов первой фазы изменяется от 5,0 до 6,0 ед. Векторы **In** и **I** имеют крутые положительные наклоны J_{ср}, близкие к вертикальным (около 80-85°).

Таблица – Средний химический состав (мас. %) в породах интрузивов различных фаз внедрения.

| Компоненты | Первая фаза | Вторая фаза | Третья фаза |
|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| SiO ₂ | 48,82 | 49,38 | 47,87 |
| TiO ₂ | 1,46 | 1,02 | 1,95 |
| Al ₂ O ₃ | 15,04 | 15,00 | 14,77 |
| Fe ₂ O ₃ | 3,89 | 3,16 | 4,27 |
| FeO | 8,79 | 7,97 | 9,76 |
| MnO | 0,19 | 0,17 | 0,20 |
| MgO | 6,89 | 7,97 | 6,33 |
| CaO | 10,29 | 11,53 | 10,17 |
| Na ₂ O | 2,40 | 2,01 | 2,46 |
| K ₂ O | 0,47 | 0,40 | 0,61 |
| P ₂ O ₅ | 0,15 | 0,11 | 0,21 |
| H ₂ O | 1,45 | 1,27 | 1,41 |
| CO ₂ | 0,15 | 0,08 | 0,12 |
| S | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| F | 0,03 | 0,04 | 0,03 |
| Сумма | 99,68 | 99,83 | 99,84 |
| Число анализов | 128 | 123 | 88 |

Интрузивы второго петрохимического типа (вторая фаза внедрения) выполнены менее подвижной и более вязкой магмой, за счет протокристаллов основных породообразующих минералов, прежде всего плагиоклаза. Внедряясь, подобные вязкие магмы вблизи кимберлитов как бы упираются в менее проницаемые породы. На фронте внедрения происходит резкое, иногда двух-, трехкратное увеличение мощности силлов, часто сопровождаемое образованием перед диатремами торообразного вала, тупо выклинивающегося в сторону кимберлитов. Внутри подковообразного вала траппы, как правило, отсутствуют. Отдельные порции магмы могут выходить на поверхность, образуя маломощные лавотоки, сопровождаемые эруптивной деятельностью и формированием насыпных туфов. Последние могут покрывать более широкое пространство, в том числе перекрывать кимберлиты. Интрузивные тела второй фазы внедрения (II петрохимический тип) занимают разное гипсометрическое положение. В одних случаях они внедряются в верхнепалеозойские терригенные осадки, в других – заполняют межформационное пространство между подошвой верхнепалеозойских и кровлей нижнепалеозойских отложений. В основном же они залегают под интрузивами первого петрохимического типа и лишь на флангах трапповых полей прорывают их, переходя на более высокий гипсометрический уровень. Преимущественно это монотонные пластовые залежи, вещество которых несет четкие следы докамерной кристаллизации расплава в виде протокристаллов основных породообразующих минералов. За счет гломеропорфировых скоплений, прежде всего плагиоклаза, долериты приобретают порфировый облик. В петрохимическом плане они относятся к низкотитанистым разностям (табл.). Их фактор Q содержанием титана варьирует от 3,0 до 7,0 и более единиц. Направления векторов **In** и **I** обладает высокой кучностью, имеют крутые положительные J_{ср} от 75° до 80°.

Так же чутко реагирует на кимберлиты и околотрубочные вмещающие породы трапповые тела, выполненные базальтовой магмой, отвечающей третьему петротипу (третья фаза внедрения). Рассматриваемые интрузивы нередко прорывают тела первых двух фаз внедрения. Установлено их динамическое воздействие на окружающие породы. Перед кимберлитами данные интрузивные тела резко меняют свое горизонтальное расположение, задираются кверху, сминаются («гормошатся»). Рассматриваемые интрузивы сложены средне- и крупнозернистыми долеритами, часто имеющими трахитоидный облик, обусловленный плоскопараллельным расположением кристаллов плагиоклаза. Структура пород преимущественно габбро-офитовая. В петрохимическом плане долериты интрузивов выделяются высоким содержанием титана (табл.). Породы обладают относительно повышенными значениями объемной плотности $\rho = 3000 \pm 50$ кг/м³. Их фактор Q от 1 до 2,5 ед. У векторов **In** и **I** вариации по наклонению составляет около 170° (J изменяется от -83° до 85°).

Большинство исследователей, занимающихся вопросом формирования кимберлитовых трубок, связывают этот процесс с взрывным явлением, объясняя его как прорыв земной коры флюидонасыщенной кимберлитовой магмой, находящейся под большим давлением [1-4]. Только кимберлитовая магма, представляющая собой диспергированный миксофлюидит, могла поставлять газовую фазу, игравшую решающее значение при внедрении кимберлитов. С.И.Костровицкий [2] и К.Н.Никишов [3] понимают под внедрением кимберлитов серию пульсационных мигрирующих к поверхности взрывов. Взрывное явление при формировании кимберлитов представляет собой по [5] процесс образования газовой фазы во всем объеме расплава и бурное ее отделение. Давление в магме резко возрастает, достигает критических значений и, когда оно начнет превышать статическое давление толщи вмещающих пород, происходит обрушение последних и образование камеры для внедрения последующего объема кимберлитовой магмы. И так далее. Именно в результате серии пульсационных взрывов перемещающихся вверх образуется канал для поступления кимберлитовой магмы, происходит уплотнение пород в околотрубочном пространстве, возникновение в них полей термоупругих напряжений на подобии тех, что возникают в результате подземного ядерного взрыва [2]. Еще одной из причин изменения плотностных характеристик вмещающих кимберлиты пород по данным В.И.Никулина могут быть процессы, связанные с «серпентинизацией и бруситизацией кимберлитов, приводящие к увеличению объема кимберлитов на 10-20%». Так или иначе, эти или иные, не названные здесь причины, возникающие при формировании диатрем, приводят к созданию вокруг них более плотных упругих пород, слабопроницаемых для относительно вязких толеитовых магм, отвечающих траппам II и III петрохимических типов. Во время внедрения такие магмы вблизи кимберлитов как бы упираются в стену, происходит накопление объема магмы, приводящее к увеличению мощности интрузий. Магма может огибать диатрему, образуя «внутритрапповые окна». При малоглубинной интрузии магмы часть ее может щепиться на маломощные инъекции, может вырываться на поверхность, образуя лавотоки и выбросы вулканического материала формировавшего насыпные туфовые отложения. Магматический клин, выполненный расплавом третьего петротипа перед кимберлитами, как правило, сминается, может «перепрыгивать» через диатремы. Таким образом, совершенно очевидно, что морфологический облик трапповых силлов вблизи кимберлитов формируется во время внедрения базитового расплава и обусловлен плотностными и термоупругими характеристиками кимберлитовмещающих пород и вязкостными свойствами внедряющейся магмы. Сделанный вывод о том, что все перечисленные морфологические особенности траппов возникают во время внедрения магмы, дает основание использовать его как один из косвенных методов поиска кимберлитов, особенно при площадном разбуривании территорий, перекрытых сплошными трапповыми полями, проводимых АК АЛРОСА» в Западной Якутии.

Благодарности

Работа выполнена в рамках НИР ИГАБМ СО РАН, проект № 0381-2019-0003

Литература

- [1] Nekrasov I.Ya., Gorbachev N.S. On the possible mechanism of kimberlite formation // Dokl. USSR Academy OF Sciences. – 1978. – 240 (1). – P. 181-184. 131415.
- [2] Kostrovitsky S.I. Physical conditions, hydraulics and kinetics of filling kimberlite pipes. – Novosibirsk: Nauka, 1976 – 96 p.
- [3] Nikishov K.N. Petrological-mineralogical model of the kimberlite process. – М., Nauka, 1984. – 213 p.
- [4] Milashev V.A. Explosion tubes. – L.: Nedra, 1984. – 268 p.
- [5] Nikolaev V.A., Dolivo-Dobrovolsky V.V. Fundamentals of the theory of magmatism and metamorphism processes. – М., Gosgeoltekhizdat, 1961 – 338 p.

ГРАНИТЫ А-ТИПА ЯНА-ИНДИГИРСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ

Вера Трунилина

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

GRANITES OF THE A-TYPE OF THE YANA-INDIGIRKA INTERFLUV

Vera Trunilina

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

Annotation. The article summarizes the results of the study of microcline-albite granites of the A-type of the Yano-Indigirsky interfluve bearing rare-earth mineralization. It is shown that with the proximity of petrochemical parameters, the degree of ore content is due to the spatial-genetic relationship of granites with derivatives of the main magmatism. The maximum ore content is inherent in microcline-albite granites spatially combined with alkaline-ultrabasic – alkaline-basic rocks. Limited ore-bearing granites with signs of mixing and/or mingling during the generation and crystallization of the parent melt. In crustal granites without such signs, rare-earth mineralization is practically absent.

1. Введение

Граниты А-типа привлекают внимание исследователей как возможные источники редкометалльной и редкоземельной минерализации. Петро- и геохимические особенности этих пород очень изменчивы, как и связанная с ними минерализация (Sn-W, Ta-Nb, Li, Au-U, REE). Представления об их генезисе также разнообразны и дискуссионны и включают синтез мантийных и коровых расплавов], предельную фракционную дифференциацию коровых гранитоидных очагов], дифференциация мантийных магм, метасоматическую природу. Ранее [1] автором на северо-востоке Верхояно-Колымского орогенного региона выявлено широкое распространение гранитов А-типа, с возрастом от неопротерозоя до позднего мела. В статье приведены новые данные по мезозойским гранитам А-типа разной локализации и разного происхождения. Целью исследований являлось определение их общих и различающихся петро-геохимических и генетических особенностей и характера сопутствующей минерализации. Методика работ включала: изучение строения массивов, их петрографии, силикатный и ИСП-МС-анализы; микрозондовое определение составов минералов. Расчеты Р-Т условий магмогенерации и кристаллизации выполнены в основном по программе GCDkit.

2. Результаты исследований

Наиболее ранние из мезозойских микроклин-альбитовых гранитов представлены массивом Сомнительный (Rb-Sr возраст 166 и 144 млн. лет) Томмотского рудного поля северной части Омудевского террейна Верхояно-Колымского орогена. Гранитный массив плитообразной формы вскрывается в южном экзоконтакте Томмотского массива, сложенного комплексом щелочных пород: от якупирангитов до фойид-содержащих сиенитов с изотопным возрастом от 398 до 206 млн. лет (Рисунок 1). Генерация исходного для него расплава происходила в верхних деплетированных горизонтах мантии с одновременным его ощелачиванием под воздействием глубинных трансмагматических флюидов, обогащенных редкоземельными элементами и радиогенными Rb и Sr [2]. Петро- и геохимическая специфика пород массива Сомнительный полностью отвечают соответствуют гранитам А₁ подгруппы А-типа. Максимальная температура магмогенерации 1045°С при давлении 9,5 кбар, геодинамическая обстановка рифтогенная внутриплитная (Рисунок 2) [3–6].

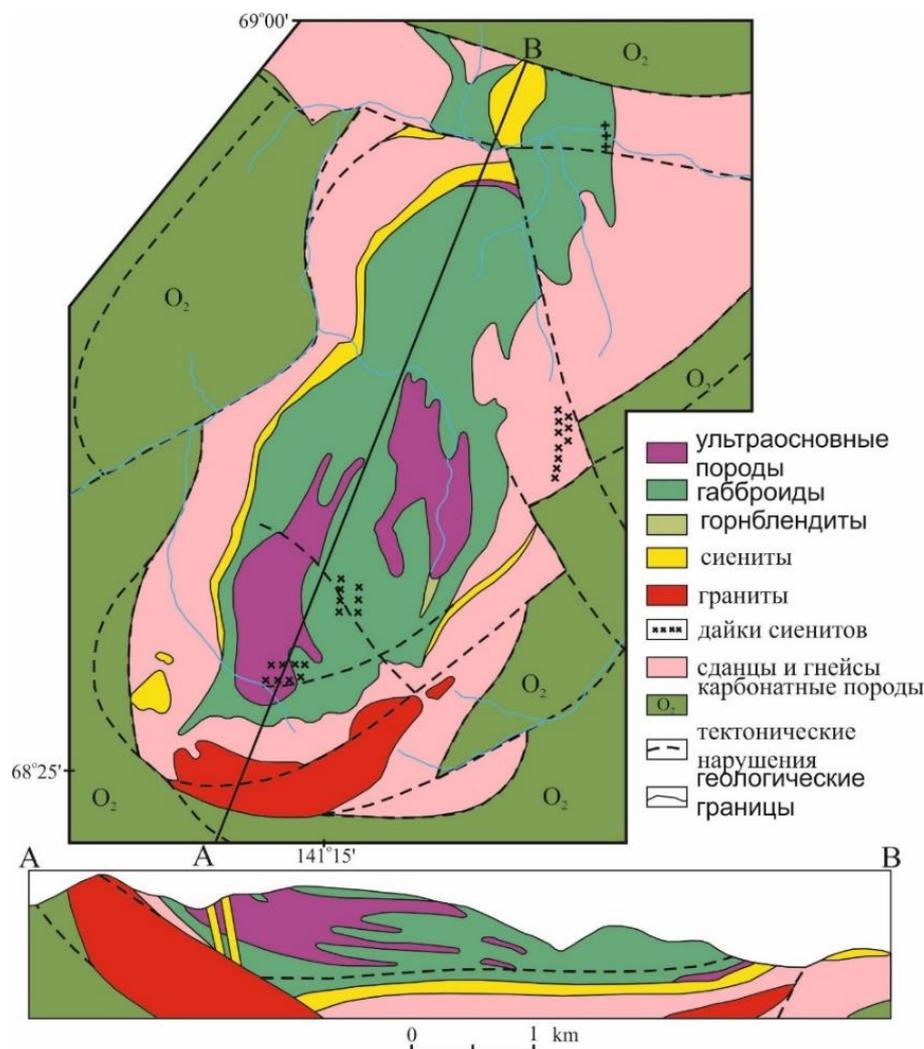


Рисунок 1 – Схематическая карта Томмотского массива [2].

Такие граниты характерны для континентальных рифтов и горячих точек [7, 8] и могут формироваться по коровым субстратам при поступлении на уровни магмогенерации дополнительного тепла из внешнего источника. Следовательно, гранитный расплав сгенерирован по коровым субстратам ($I_0 = 0,7441 \pm 0,0083$) при участии того же потока трансмагматических флюидов или предварительно метасоматически проработанным им.

Редкоземельное оруденение приурочено к жилам фенитизированных альбититов и пегматитов с иттриалитом, чевкинитом, бритолином, фергусонитом, гадолинитом в экзоконтакте гранитного массива. Среднее содержание РЗЭ в рудах – 1.65 %, прогнозные ресурсы – 65 тыс. т. Месторождение комплексное Ce–Y, с сопутствующими Zr, Nb, Th. Поисковыми признаками на озвученный тип оруденения являются: совмещение в пространстве щелочно-ультраосновного – щелочного и гранитоидного магматизма, интенсивное проявление процессов фенитизации, наличие акцессорной редкоземельной минерализации.

В пределах Индигирского пояса растяжения земной коры, прослеженного от верховьев р. Индигирки до шельфа моря Лаптевых (Рисунок 3) [9] фиксируются поля континентальных вулканитов латитовой и шохонитовой серий многочисленные мелкие штокообразные тела апт-позднемиоценовых микроклин-альбитовых гранитов А-типа. Изотопный Rb-Sr возраст гранитов 86–94 млн. лет. По всем петро- и геохимическим параметрам породы также определяются как посторогенные или рифтогенные граниты А-типа (Рисунок 4).

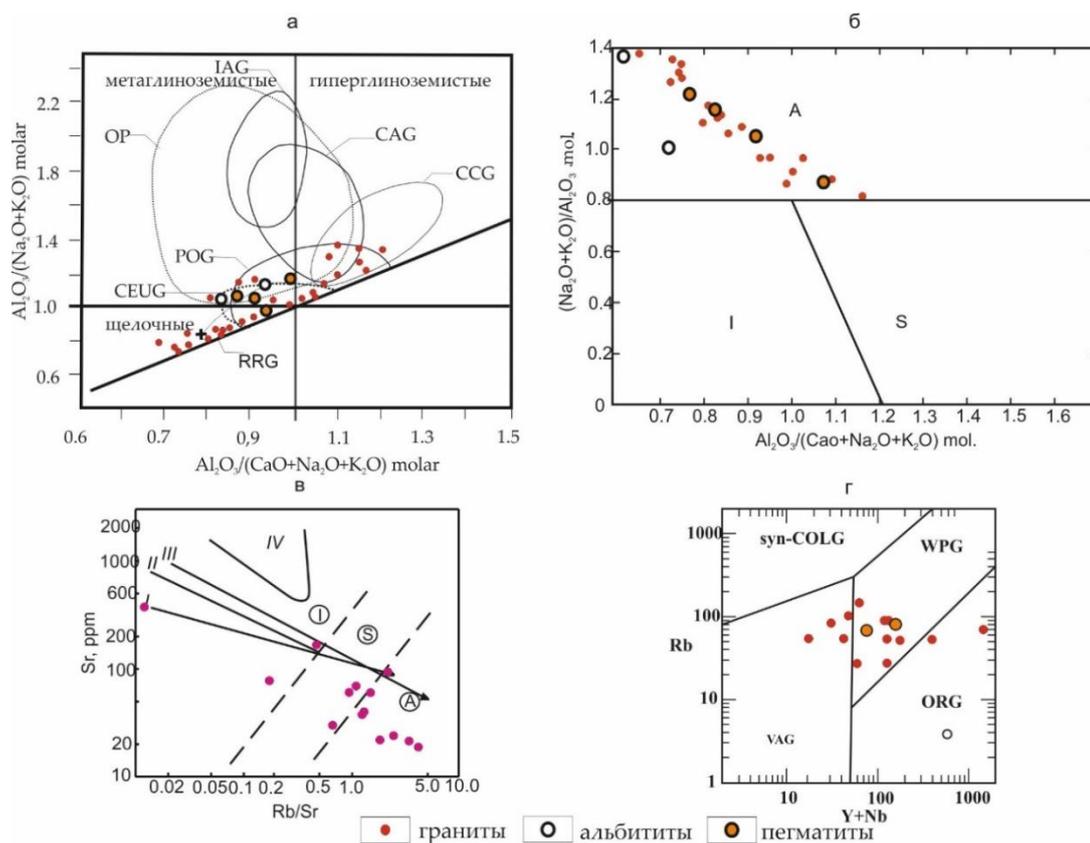


Рисунок 2 – Геохимические особенности гранитов массива Сомнительный: а) глиноземистость гранитоидов. Поля диаграммы, гранитоиды [3]: IAG – островодужные, CAG – континентальных дуг, CCG – континентальные коллизионные, POG – посторогенные, CEUG – континентального эпейрогенического воздымания, RRG – рифтогенные; б) г) Петротипы гранитов по [4]; в) Соотношения Sr – Rb/Sr в гранитах. Тренды дифференциации типовых серий [5]: I – толеитовая островных дуг, II – известково-щелочная островных дуг, III – известково-щелочная активных окраин, IV – рифтовых зон континентов; I, S, A – петротипы гранитов. е) Геодинамические обстановки формирования гранитов [6]: syn-COLG синколлизионная, VAG – островодужная, ORG – океаническая, WPG – внутриплитная.

Сочетание в составе гранитов минералов, характерных для основных пород (магнезиоавгит, битовнита, цирконы морфотипов D), и типично гранитных (кварц-полевошпатовая эвтектика, циркон ряда S), неравновесные структуры с погруженными в аляскитовый или микропегматитовый матрикс пироксен- и/или амфибол-лабрадоровыми блоками указывают на синтексис основного и гранитного расплавов в процессе магмогенерации и кристаллизации. Вместе с аномально высокими для гранитов температурами материнских расплавов (до 1032°C) это позволяют предполагать наличие в пределах рассматриваемой территории погребенных очагов основных расплавов, активизация которых в конце раннего – начале позднего мела обусловила повторное плавление коровых субстратов. Редкоземельные и радиоактивные минералы в этих гранитах представлены алланитом, ториевым монацитом, ксенотимом, титанитом, цирконом с содержанием UO_3 до 12%, торианитом, гадолинитом, урановыми смолками. Редкоземельная минерализация приурочена к эндо- и экзоконтактам массивов и к миаролам в их апикальных выступах.

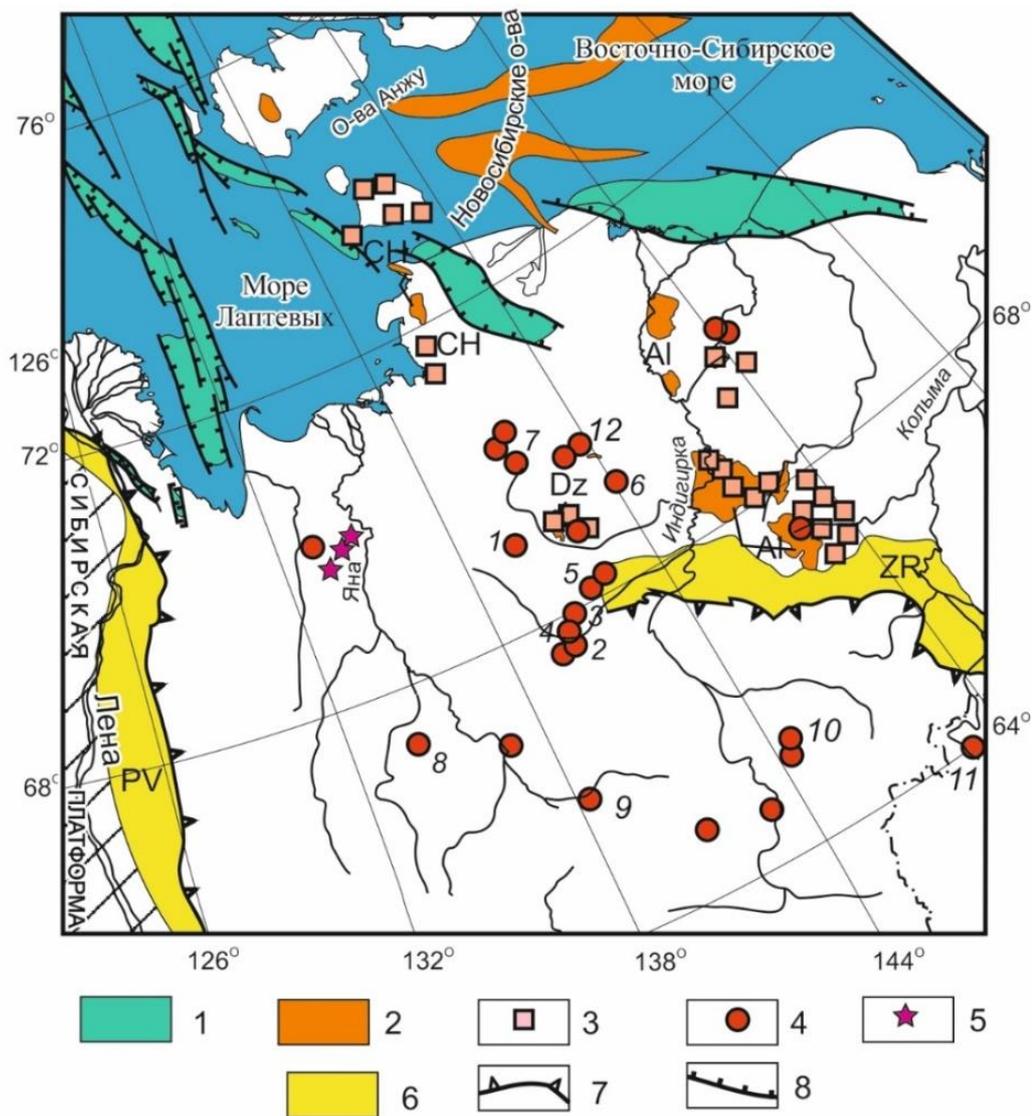


Рисунок 3 – Индигирский пояс растяжения земной коры [9]: 1 – рифтовые впадины шельфа моря Лаптевых и Приморской низменности, 2 – вулканиты (вулcano-плутонические зоны и поля: AL – Алазейско-Индигирская вулканическая зона, СН – Чохчуро-Чекурдахская вулcano-плутоническая зона, DZ – Джахтардахское вулканическое поле), 3 – гранитоиды, 4 – анорогенные граниты (1 – Такалканский, 2 – Герамдачанский, 3 – Западно-Агдайский, 4 – Правокыринский, 5 – Бургохчанский, 6 – Хара-Сис, 7 – Омчикандинский (Полярное), 8 – Арга-Ыннах-Хайский (Кестер), 9 – Верхнебургадийский, 10 – Волшебник, 11 – Нелькубинский, 12 – Одинокий), 5 – Куларский гранитный пояс, 6 – Предгорные прогибы (PV – Приверхоянский, ZR – Зырянский), 7 – надвиги, 8 – сбросы.

В Герамдачанском массиве широко развиты жильные тела пегматитов со значимой редкоземельной минерализацией (до 5200 г/т Ce_2O_3 и La_2O_3). Расчеты по [10] показали наличие четко выраженного тетрад-эффекта W-типа на трендах REE, что говорит о кристаллизации в присутствии водных флюидов. С учетом аномально высоких P-T условий формирования (температура расплава до 1060°C, давление его генерации 13кбар) поступление таких флюидов возможно только из внешнего (глубинного) источника.

Поисковыми критериями таких месторождений, кроме приуроченности к глубоко дифференцированным постороженным гранитным массивам А-типа, отсутствие отрицательных аномалий, очаговые зоны разуплотнения мантии, признаки синтексиса, наличие тетрад-эффектов W-типа на трендах REE.

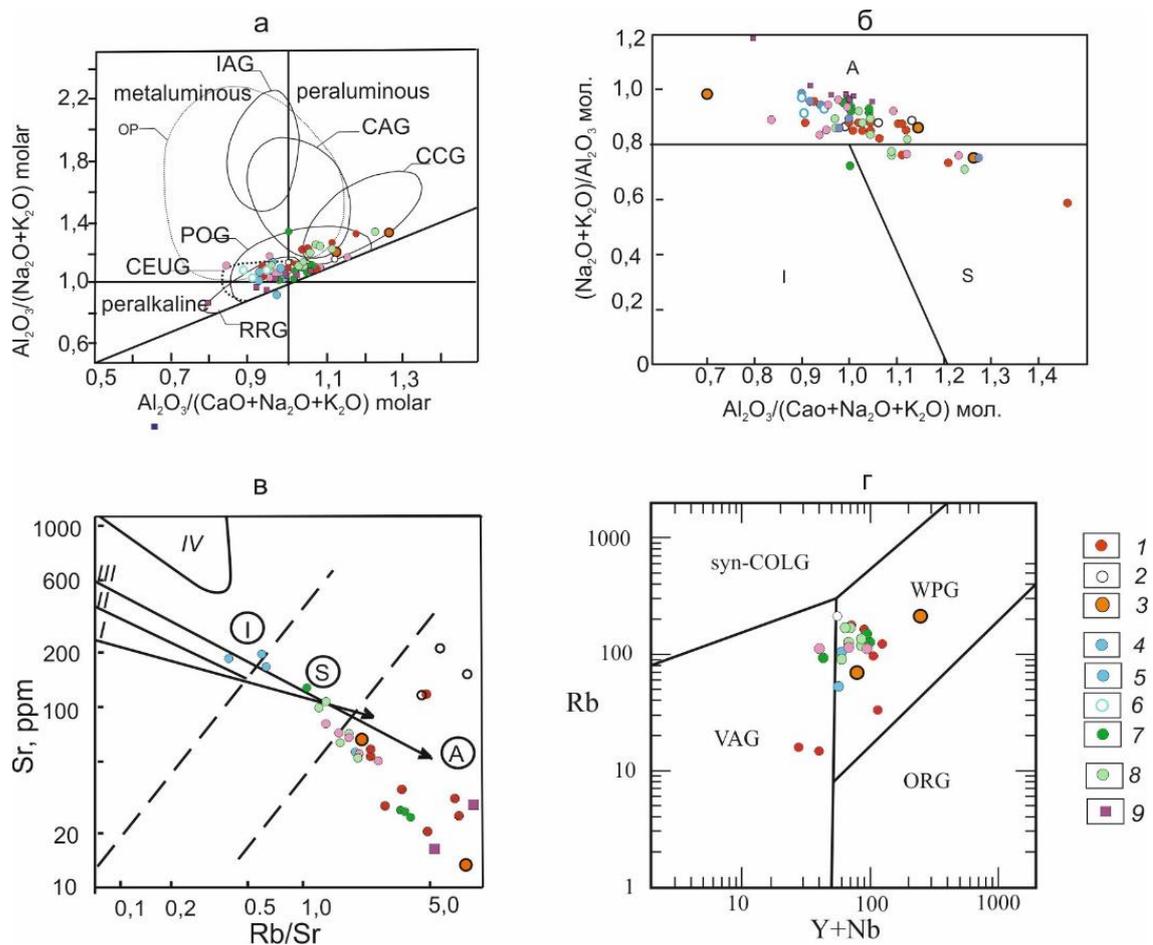


Рисунок 4 – Петро- и геохимические параметры гранитов Индигирского пояса растяжения
 1–3 – Герамдачанский массив: 1 – граниты, 2 – аплиты и лейкограниты, 3 – пегматиты; 4 – Агдайский массив; 5 и 6 – Право-Кыринский массив: 5 – граниты, 6 – аплиты и лейкограниты; 7 – Бургохчанский массив, 8 – Усть-Бургохчанский массив, 9 – Нелькубинский массив.
 Поля и индексы см. на рис. 2.

Лейкократовые микроклин-альбитовые граниты занимают обширную площадь в восточной оконечности Бакынского массива амфибол-биотитовых гранитов и гранодиоритов, приуроченного к зоне долгоживущего регионального Кюнь-Тасского разлома (рисунок 5). По основным параметрам состава они соответствуют анорогенным гранитам А-типа (Рисунок 6). Rb–Sr изотопный возраст амфибол-биотитовых гранитов 131–134 млн. лет, микроклин-альбитовых гранитов – 103 млн. лет. Признаков миксинга или минглинга в породах не установлено.

Они развиты за счет замещения биотит-амфиболовых гранитов и геохимически соответствуют плюмазитовым редкометалльным гранитам, обогащенным F, Li, Rb и Sn при коэффициенте корреляции $Sn-F = 0.7$. При дальнейшем преобразовании формируются грейзены с крупночешуйчатыми скоплениями богатого F и Li мусковита и турмалина и вкрапленностью крупнокристаллического касситерита. Редкоземельные минералы в нмх представлены монацитом, алланитом и титанитом. Содержание их не превышает 1%. Концентрации Y, Yb, La в цирконах и апатитах низкие (0,1–0,3%). Содержания REE остаются низкими – 313–330 г/т, редкоземельные минералы образуют лишь редкую акцессорную вкрапленность.

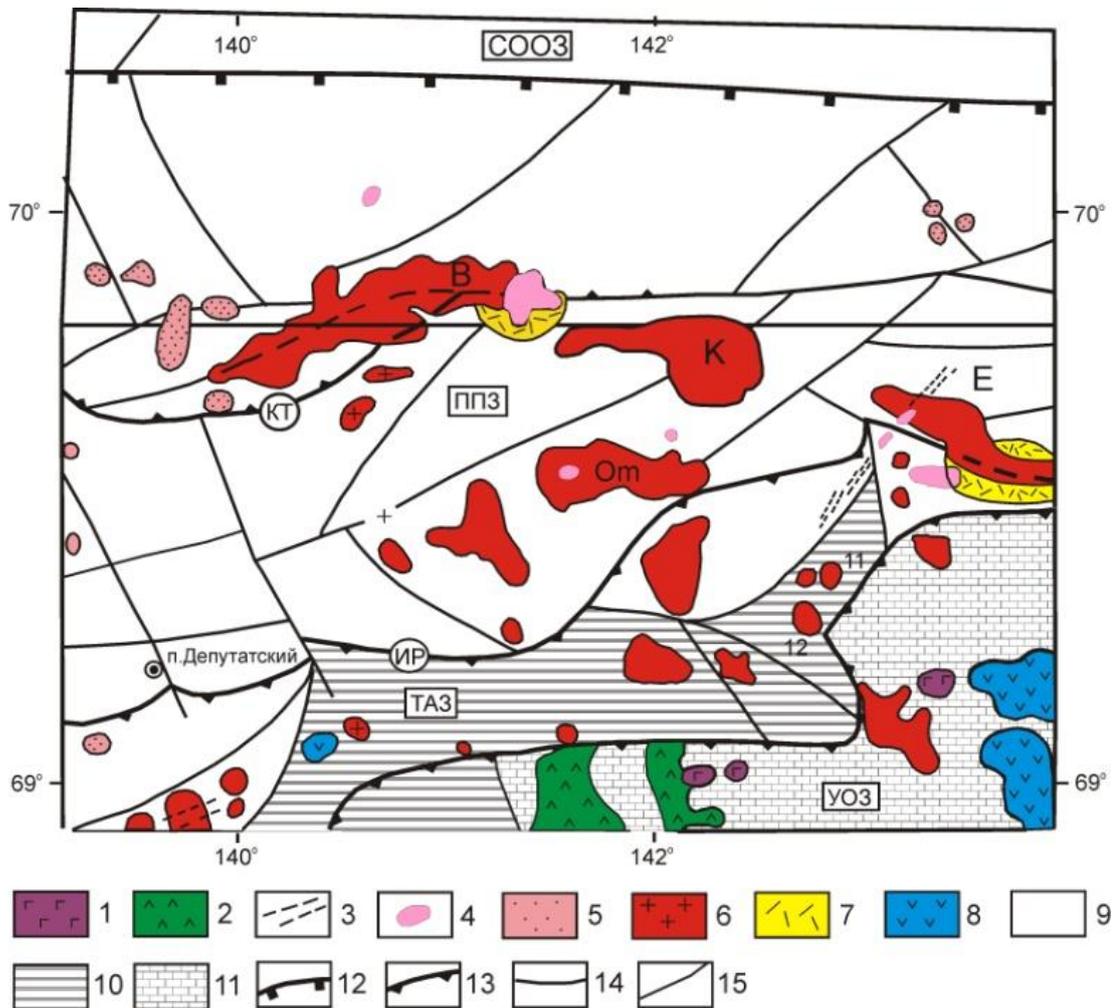


Рисунок 5 – Схема тектонического районирования Полоусненского синклиория [9].

Магматические образования: 1 – позднемеловые массивы щелочно-основного состава, 2 – меловые вулканиты, 3 – дайки, 4 – редкометалльные граниты и риолит-порфиры позднеаптского времени, 5 – массивы гранитоидов поперечных поясов, 6 – массивы гранитоидов Северного пояса, 7 – вулканиты берриас-барремского времени, 8 – позднеюрские вулканиты; осадочные образования: 9 – юрские терригенные, 10 – верхнетриасовые терригенные, 11 – палеозойские терригенно-карбонатные; тектонические нарушения: 12 – граничные сутуры (тектонические швы), 13 – региональные разломы (КТ – Кюнь-Тасский, ИР – Иргичанский), 14 – межблоковые и 15 – внутриблоковые разломы; СООЗ – Святоносско-Олойская островодужная зона; Черско-Полоусненский тектонический блок: УОЗ – Уяндино-Ясачненская островодужная, ТАЗ – Тастахская аккреционная, ППЗ – Полоусненская преддуговая тектонические зоны. Массивы гранитоидов: В – Бакынский, К – Куранахский, Е – Эликчанский, Ом – Омчикандинский.

3. Выводы

Таким образом, при близости петрохимических характеристик максимальной редкоземельной продуктивностью обладают микроклин-альбитовые граниты, пространственно совмещенные с щелочно-ультраосновными – щелочно-основными породами. Ограниченно рудоносны граниты с признаками миксинга и/или минглинга в процессе генерации и кристаллизации материнского расплава. В коровых гранитах без таких признаков редкоземельная минерализация практически отсутствует.

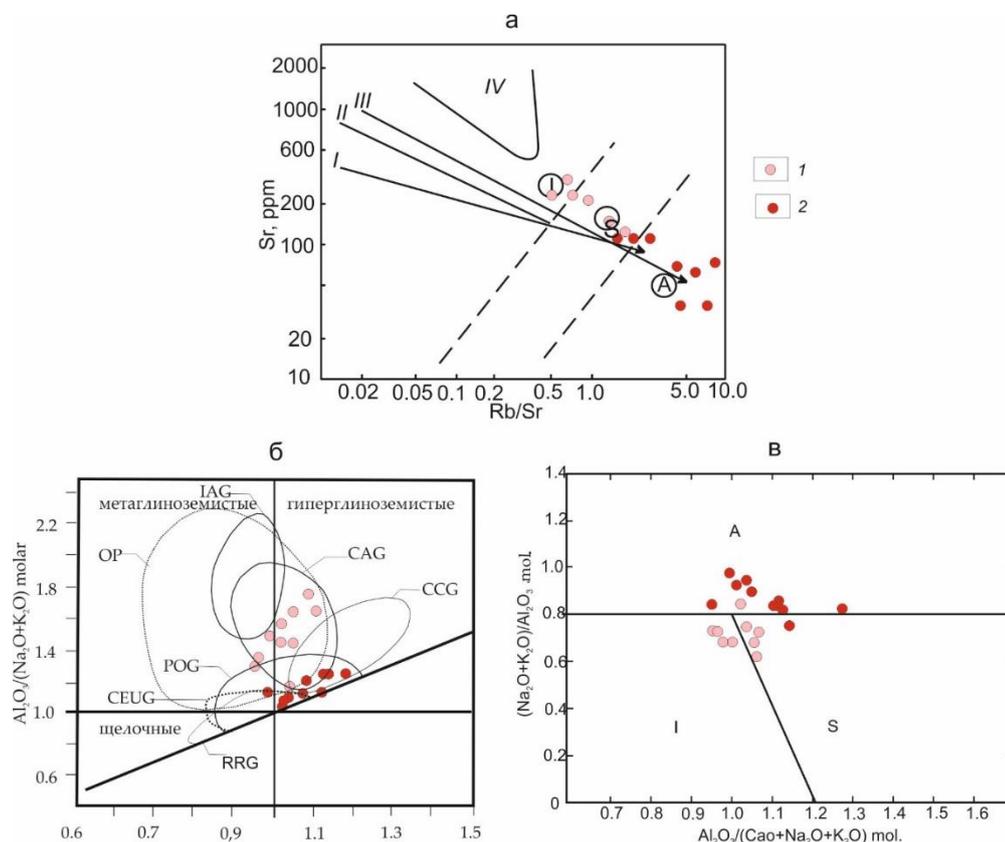


Рисунок 6 – Геохимические параметры Бакынского массива.

1. Амфибол-биотитовые и биотитовые граниты, 2 – микроклин-альбитовые граниты
Поля и индексы см. на рис. 2.

4. Литература

- [1] Trunilina, V.A.; Orlov, Yu.S.; Roev, S.P. and Zaitsev, A.I. Composition and genetic aspects of A-type granites formation in the Verkhoyano-Kolyma folded region // *Otechestvennaya geologiya*. – 2008. – № 5. – P. 99-109.
- [2] Trunilina, V.A. and Prikopiev, A.V. Petrology of Granites of the Tommot Rare-Earth Ore Field (Verkhoyansk–Kolyma Orogenic Belt) // *Minerals*. – 2022. – № 12(11). – 33 p.
- [3] Maniar, P.D. and Piccoli, P.M. Tectonic discrimination of granitoids // *Geological Society of America Bulletin*. – 1989. – Vol. 101. – P. 635-643.
- [4] Maeda, J. Opening of the Kuril Basin deduced from the magmatic history of Central Hokkaido northern Japan // *Tectonophysics*. – 1990. – Vol. 174. – P. 235-255.
- [5] Datsenko, V.M. Petrogeochemical typification of granitoids of the south-western framing of the Siberian platform // *Materials of the Second All-Russian Petrographic Meeting: Syktyvkar*. – 2000. – Vol. 2. – P. 270-274.
- [6] Pearce, J.A.; Harris, N.B.W. and Tindle, A.G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of the granitic rocks // *J. Petrology*. – 1984. – Vol. 25. – Pt. 44. – P. 956-963.
- [7] King, P.L.; White, A.J.R.; Chappell, B.W. and Allen, C.M. Characterization and Origin of aluminous A-type Granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia // *J. Petrology*. – 1997. – Vol. 38. – P. 371-391.
- [8] Martin, R.F. A-Type Granites of Crustal Origin Ultimately Result from Open-System Fenitization-Type Reactions in an Extensional Environment // *Lithos*. – 2006. – Vol. 91. – P. 125-136.
- [9] Parfenov, L.M.; Kuzmin, M.I. (Eds.) *Tectonics, Geodynamics and Metallogeny of the Territory of the Republic of Sakha (Yakutia)*. – Moscow: MAIK Nauka/Interperiodika, 2001. – 571 p.
- [10] Irber, W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites // *Geochem. Cosmochem. Acta*. – 1999. – Vol. 63. – № 3-4. – P. 489-508.

**ЛИТИЕВЫЙ ПОТЕНЦИАЛ СЕВЕРО-ВОСТОКА РЕСПУБЛИКИ САХА
(ЯКУТИЯ)**

Вера Трунилина

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

**LITHIUM POTENTIAL OF THE NORTH-EAST OF THE REPUBLIC OF SAKHA
(YAKUTIA)**

Vera Trunilina

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

Annotation. The article deals with the main features of the composition of lithium-producing granites of the north-east of the Republic of Sakha (Yakutia), among which two types are distinguished. Both of them are represented by microcline-albite granites of A-type. The first crystallize from the residual melt of the basal parts of the hearth, which formed amphibole-biotite and bicuspid granites, upon receipt of fluids from an external source. They are characterized by the concentrations of rare earth elements that are standard for granites, low – phosphorus and high – fluorine. The latter are defined as highly phosphorous lithium-fluoride granites with abnormally low concentrations of rare earth elements. Their formation is associated with the crystallization of melts generated in the lower horizons of the crust under the influence of a powerful flow of deep fluids from rising diapirs of alkaline-ultrabasic composition. These granites have the parameters of ultra-rare-metal formations.

1. Введение

Одним из наиболее востребованных в настоящее время металлов является литий. Ведущие промышленные типы его месторождений – гранитные пегматиты и природные высокоминерализованные воды. Более 75% запасов лития приходится на экзогенные месторождения. Меньшее значение имеют грейзеновые и гидротермальные месторождения – циннвальдитовые и амблигонитовые. В первых литию сопутствуют W, Sn, Be; во вторых – Sn. По запасам лития Россия занимает одно из ведущих мест в мире. Российские месторождения лития представлены в основном редкометалльными пегматитами и месторождениями, связанными с редкометалльными гранитами. Наиболее перспективными для разработки считаются микроклин-альбит-сподуменовые пегматиты с Li, Ta, Nb, Be и Cs Кольского полуострова, с содержанием Li₂O до 2.5%.

В пределах Якутии рудные литиевые проявления присутствуют по всей территории северо-востока РС(Я), как правило, в качестве попутных в большинстве оловянных и олово-вольфрамовых месторождений грейзеновой формации. Рассмотренные ниже существенно литиевые месторождения: Полярное, Кестер, Верхнебургалийское изначально также оценивались как оловорудные. Цель данной работы – привлечь внимание исследователей к изучению эндогенных литиевых проявлений для оценки перспектив региона

2. Результаты

Месторождение Полярное локализовано в центральной части Омчикандинского массива биотитовых и двуслюдяных гранитов (Рисуннок. 1) [1]. В западной части массива в зоне интенсивного развития постгранитоидных тектонических нарушений они прорваны штоко- и трубообразными телами альбит-микроклиновых гранитов, по которым образованы кварц-топаз-слюдистые и кварцево-слюдистые грейзены с касситеритом, вольфрамитом, циннвальдитом и топазом. Они и представляют крупное олово-редкометалльное месторождение. Отмечаются также жилы кварцевых альбититов и пегматитов с касситеритом, тантало-ниобатами и

бериллом. Изотопный возраст пород (Ar-Ar метод) 138–121 млн. лет для биотитовых гранитов и 115 млн. лет для альбит-микроклиновых гранитов.

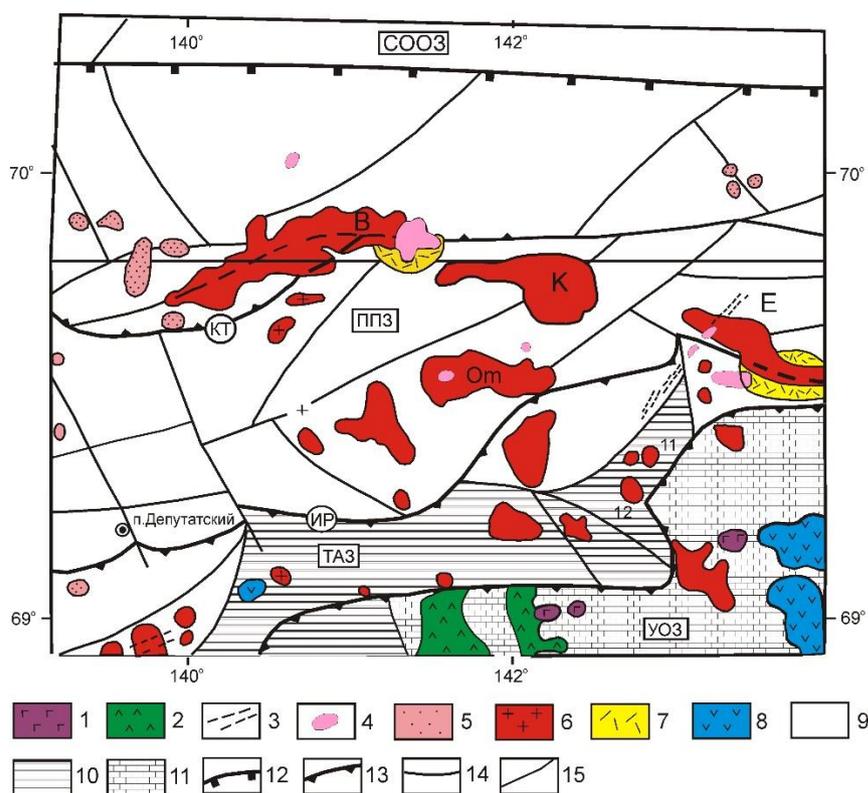


Рисунок 1 – Схема тектонического районирования Полоуссенского синклиория [1].

1 – позднемеловые массивы щелочно-основного состава, 2 – меловые вулканиты, 3 – дайки, 4 – позднеаптские редкометалльные граниты и риолит-порфиры, 5 – гранитоиды поперечных поясов, 6 – гранитоиды Северного пояса, 7 – берриас-барремские вулканиты, 8 – позднеюрские вулканиты; 9 – юрские терригенные породы, 10 – верхнетриасовые терригенные породы, 11 – палеозойские терригенно-карбонатные породы; 12 – граничные сутуры (тектонические швы), 13 – региональные разломы (КТ – Кюнь-Тасский, ИР – Иргичанский), 14 – межблоковые и 15 – внутриблоковые разломы; СООЗ – Святоносско-Олойская островодужная зона; Черско-Полоуссенский тектонический блок: УОЗ – Уяндино-Ясачненская островодужная, ТАЗ – Тастахская аккреционная, ППЗ – Полоуссенская преддугловая тектонические зоны. Массивы гранитоидов: В – Бакынский, К – Куранахский, Е – Эликчанский, Om – Омчикандинский.

Микроклин-альбитовые граниты месторождения принадлежат А-типу (Рисунок 2). Они характеризуются повышенными концентрациями фтора (в среднем, 1,3%) и лития (до 0,3%) и стандартными для гранитов суммами REE (100–230 г/т). Материнский для гранитов Омчикандинского массива расплав генерировался при 903–984°C при расчетной глубине 24–27 км. Расчетные параметры формирования расплава микроклин-альбитовых гранитов – 660–680°C и 18–24 км, что позволяет рассматривать его как остаточный флюидонасыщенный расплав того же магматического очага. В то же время, скачкообразный рост в микроклин-альбитовых гранитах концентраций Sn, W, Nb, Ta, Li, F возможен лишь при поступлении богатых рудными элементами флюидов из внешнего источника.

По данным геолого-поисковых работ месторождение Полярное имеет структуру центрального типа с кварцевой линзой в центре и концентрическим расположением зон альбит-микроклиновых гранитов и грейзенов (Рисунок 3). Кроме касситерита и вольфрамита в рудах постоянно присутствуют циннвальдит, протолитиоит, литиевый мусковит, флюорит, топаз, колумбит-танталит, шеелит, комплекс сульфидов и, спорадически, берилл и самородное серебро. Основной литий-содержащий минерал – циннвальдит. Касситерит, вольфрамит и циннвальдит обогащены скандием и ниобием [4. 5]. То есть, месторождение комплексное: Sn,

W, Li, Ta, Nb, Sc, Rb. Ресурсный потенциал месторождения в тыс. т составляет: Sn – 93.8, Li₂O – 117.5; Ta₂O₅ – 5.3, Nb₂O₅ – 6.3. По масштабам оруденения месторождение оценивается как среднее по ресурсам Sn и Ta; крупное по ресурсам Li и Be; уникальное по ресурсам Sc [5]. Микроклин-альбитовые граниты Кестерского и Верхнебургалийского месторождений резко отличаются по составу от микроклин-альбитовых гранитов Полярного месторождения высокими содержаниями фосфора (в среднем, 1,8%) и крайне низкими – редкоземельных элементов (в сумме 14–42 г/т). Верхнебургалийский массив имеет близкую этмолиту форму мощностью до 500 м. Изотопный K-Ar возраст по породе –106 млн лет. Максимальное расчетное давление на уровне магмогенерации – 11 кбар при температуре 700°C. Этмолит сложен топаз-слюдистыми в наиболее эродированной части, а выше амблигонит-слюдистыми и слюдисто-амблигонитовыми микроклин-альбитовыми гранитами [6]. В эндоконтактах развиты пегматиты и амблигонит-лепидолит-кварцевые грейзены с касситеритом и антимонитом. Непосредственную зону эндоконтакта слагают топазовые альбититы. По ним развиты амблигонит-мусковит-кварцевые грейзены с топазом и касситеритом. Состав пород отвечает посторогенным или анорогенным гранитам А-типа (Рисунок 5), а по аномально высоким концентрациям фтора и редких щелочей, низким содержаниям Ba и Sr, значениям индекса редкометальности – геохимическому типу плюмазитовых редкометалльных гранитов с ультравысокой рудоносностью [7].

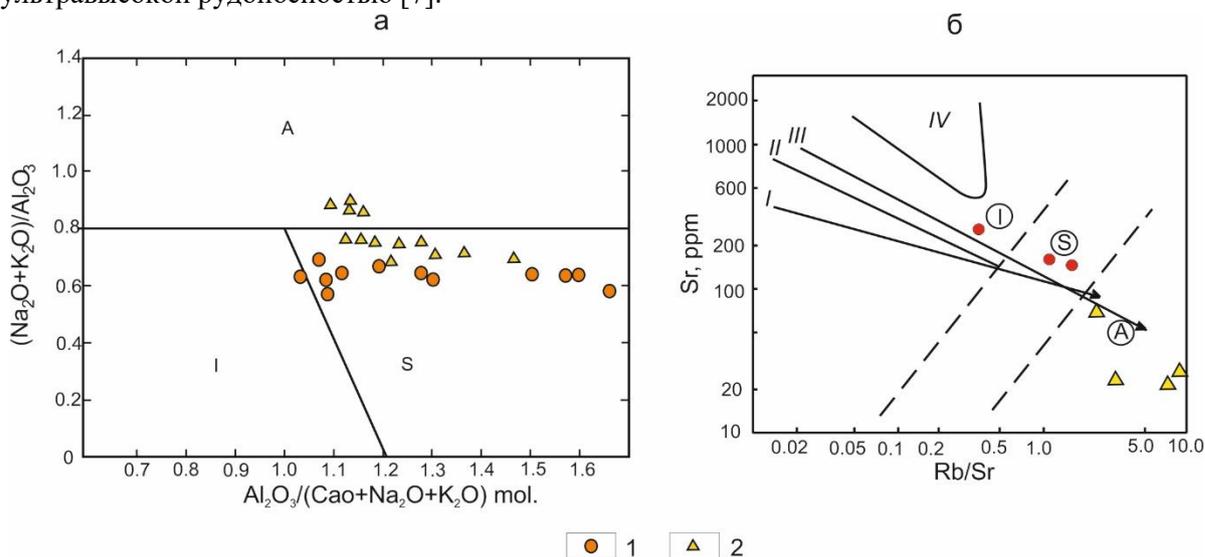


Рисунок 2 – Параметры состава гранитов Омчикандинского массива.

1 – граниты Омчикандинского массива, 2 – микроклин-альбитовые граниты месторождения Полярное. а) соотношение $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ [2]; б) соотношение Sr – Rb/Sr в гранитоидах. Тренды дифференциации эталонных серий: I – толеитовая серия островных дуг, II – известково-щелочная серия островных дуг, III – известково-щелочная серия активных окраин, IV – серия рифтовых зон континентов; I, S, A – петротипы гранитоидов [3].

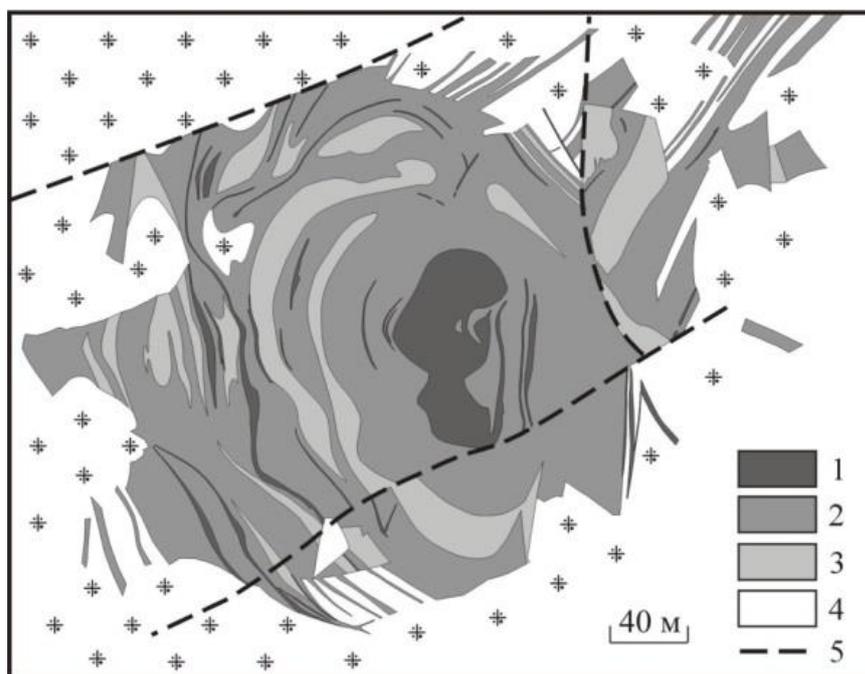


Рисунок 3 – Структура месторождения Полярное (по Л.Г. Вдовиной и И.Г. Басовой, 2015 г.)
1 – кварц, 2 – грейзены, 3 – гранит-порфиры, 4 – грейзенизированные граниты.

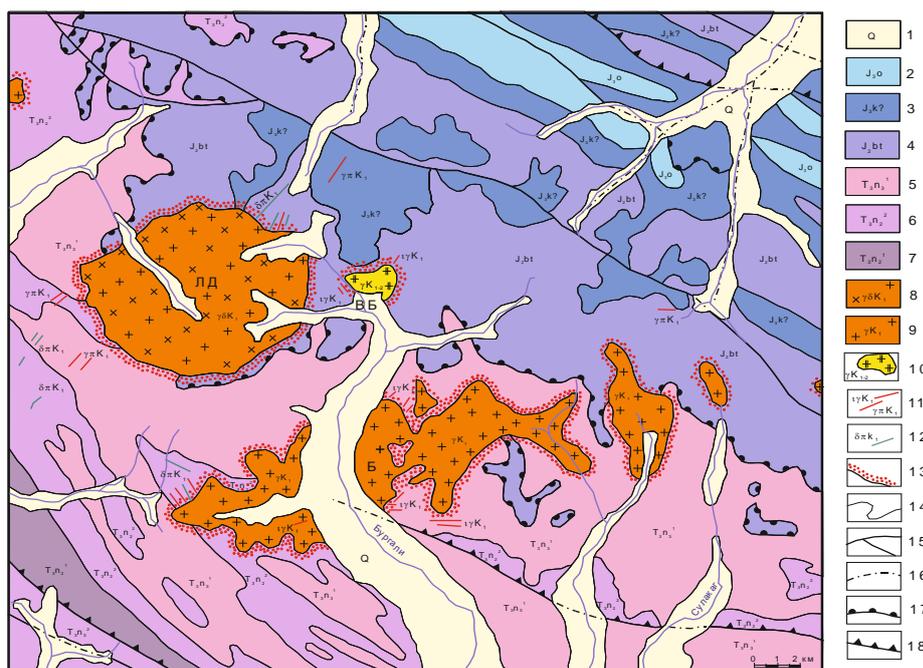


Рисунок 4 – Карта Бургалийского рудно-магматического узла (по Д.И. Троицкому, 1980 г.).
1 - четвертичные отложения (Q); терригенные породы с линзами известняков и конгломератов: 2 - юрская система, верхний отдел, оксфордский ярус; 3 - юрская система, верхний отдел, келловейский (?) ярус; 4 - юрская система, средний отдел, батский ярус; 5 - триасовая система, верхний отдел, норийский ярус, верхний подъярус, нижняя толща; 6 - триасовая система, верхний отдел, норийский ярус, средний подъярус, верхняя; 7 - триасовая система, верхний отдел, норийский ярус, средний подъярус, нижняя толща; магматические породы: 8 - гранодиориты; 9 - граниты; 10 - микроклин-альбитовые граниты; 11 - дайки гранит-порфиров, аплитов и лейкогранитов; 12 - дайки диоритовых порфиров; 13 - контактовые роговики; 14 - границы разновозрастных образований; 15 - тектонические нарушения, 16 – то же, скрытые под более молодыми образованиями; 17 - надвиги; 18 - взбросы. Гранитоидные массивы: ЛД - Лево-Джолокагский, Б - Бургалийский, ВБ – Верхнебургалийский.

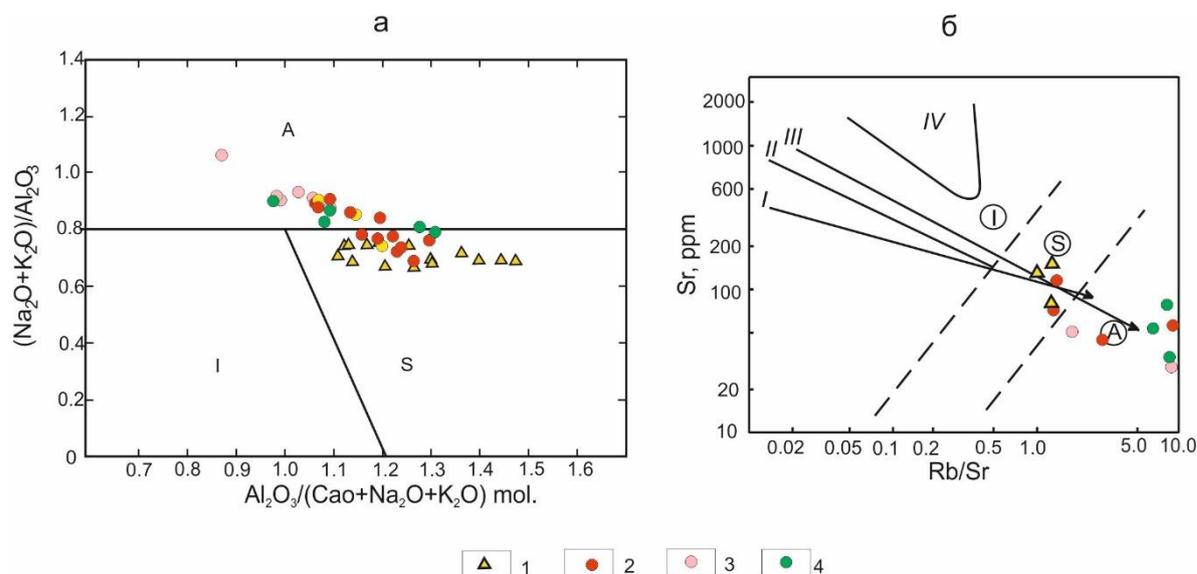


Рисунок 5 – Петропеты гранитоидов Бургалийского рудно-магматического узла и Кестерского гарполита.

1 – Бургалийский, 2 – Верхнебургалийский массивы, 3 – дайки Верхнебургалийского массива, 4 – микроклин-альбитовые граниты Кестерского гарполита. Поля и тренды – см. рис. 2.

Породы обогащены Sn, Sb, Li, As, F, Rb, Nb, Ta, W. Среднее значение коэффициента редкометалльности – $(\text{Li}+\text{Rb}) \times \text{F}/(\text{Ba}+\text{Sr}) = 197488$. Максимально обогащены литием краевые пегматиты (до 13 % монтебразита) и грейзены (до 9 % монтебразита). Месторождение относят к касситерит-редкометалльно-кварцевой формации, их основны компонентом является литий. Среднее содержание на весь этмолит: $\text{Li}_2\text{O} - 0,505\%$, Ta – 0,003%; Nb 0,018%; Rb 0,152%; Cs 0,37% и Sn 0,02% (Л.Г. Вдовина и И.Г. Баева, 2015 г.). В пегматитах и грейзенизированных аляскитах зоны эндоконтакта среднее содержание Li_2O возрастает до 6,28 %. Основные рудные минералы – лепидолит и амблигонит. Характерны также касситерит и колумбит-танталит. Оценки прогнозных запасов широко варьируют, но в Объяснительной записке к листу Q-54 Геолкарты РФ прогнозные ресурсы по категории P3 оценены в 47,1 тыс. т лития [8].

Кестерский гарполит литий-фтористых-микроклин-альбитовых гранитов с Rb-Sr возрастом 115–129 млн. лет приурочен к зоне пересечения тектонических нарушений в центре Западного выхода Арга-Ыннах-Хайского массива одноименного поперечного ряда интрузий. Он вскрыт карьером и разбурен на глубину до 200 м. Более 100 даек того же состава образуют кольцевой ореол вокруг Восточного выхода массива и пересекают гранитоиды Западного и вмещающие их породы (Рисунок 6). В составе гарполита снизу вверх мусковит-альбитовые граниты с литиевыми слюдами, топазом, монтебразитом сменяются лепидолит-амблигонит-альбитовыми и далее грейзенизированными разностями и грейзенами [6]. Месторождение со Sn, Li, Nb и Ta представлено топаз-слюдисто-кварцевыми и слюдисто-кварцевыми грейзенами с касситеритом; амблигонитом, тантало-ниобатами и эльбаитом. Среди даек встречены онгониты, содержащие в среднем 6% литиевых слюд, 3% топаза и 3% монтебразита и единичные дайки эльванов [9]. Генерация материнского расплава происходила при расчетном давлении до 12 кбар и температуре не более 807°C [6]. Распределение элементов-примесей соответствует геохимическому типу плюмазитовых редкометалльных гранитов, специализированных на Li, Rb, Cs, Sn, W, Sb, Nb. Среднее значение коэффициента редкометалльности 182381, то есть, породы являются ультрарудоносными.

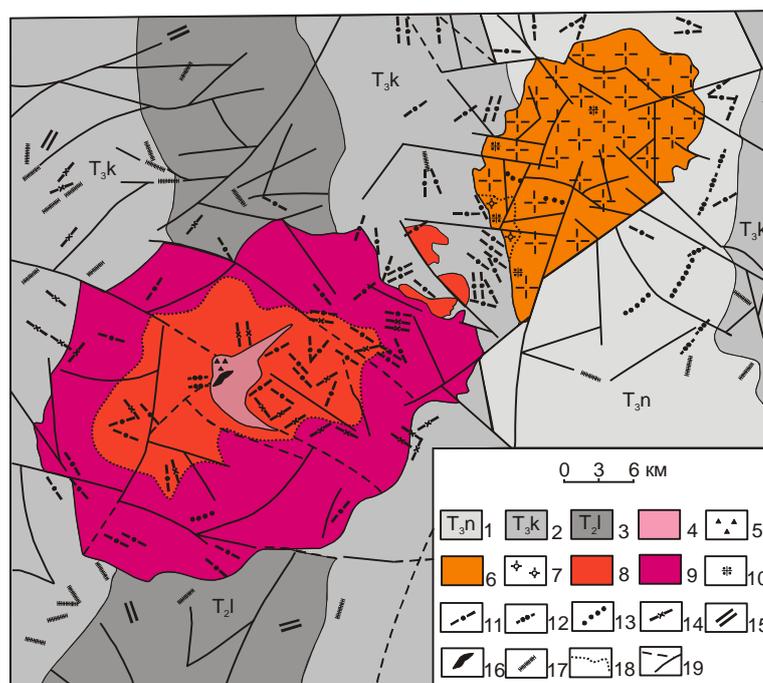


Рисунок 6 – Геологическая карта Арга-Ыннах-Хайского массива (по В.В. Бояршинову, 1980 г.).

1–3 – песчаники и алевролиты: 1 – поздний триас, норийский ярус; 2 – поздний триас, карнийский; 3 – средний триас, ладинский ярус; 4 – микроклин-альбитовые граниты, 5 – гранитная брекчия с турмалиновым цементом, 6 – двуслюдяные граниты, 7 – гранит-порфиры, 8 – андезиновые граниты, 9 – гранодиориты, 10 – грейзенизированные граниты. Дайки: 11 – микроклин альбитовые граниты, 12 – кварцевые порфиры, 13 – мусковит-турмалиновые лейкограниты, 14 – аплиты, 15 – диабазовые и диоритовые порфиры, 16 – грейзены, 17 – минерализованные зоны; 18 – фациальные границы, 19 – тектонические нарушения – а) достоверные и б) предполагаемые.

Кестерское месторождение отнесено к редкометалльно-топаз-слюдистому минеральному типу касситерит-кварцевой редкометалльной формации. Прогнозные запасы (в тыс. тонн): Li_2O – 2033 при среднем содержании 0,46%, Rb – 1039, Nb – 75, Cs – 40, Sn – по категориям A+B+C1 – 11,6 тыс. т. при среднем содержании в рудах 0,3% [8]. В среднем 50% лития приходится на амблигонит, который является порообразующим минералом во всех трех выделенных фациях микроклин-альбитовых гранитов. Поэтому Ю.С. Орлов и Ю.А. Филимонов (1983 г.) рассматривают весь объем гарполита как рудное тело со сравнительно легко обогащаемыми литиевыми рудами.

Значения I_0 в гранитах гарполита (0,71052 – 0,72877) указывают на коровый генезис материнского расплава, тогда как высокие (до 370) значения Rb/Sr типичны для гранитоидов мантийного или корово-мантийного происхождения. Высокие содержания P_2O_5 характеризуют только щелочно-основные и щелочно-ультраосновные породы региона. Отсюда: наиболее вероятным является формирование литий-фтористых гранитов региона из самостоятельных расплавов, генерировавшихся в нижних горизонтах коры при воздействии на них потока глубинных флюидов, связанных с подъемом диапиров щелочно-ультраосновного состава [6]. Низкие концентрации редкоземельных элементов в этих гранитах обусловлены перераспределением их в сосуществующий с расплавом флюид.

3. Выводы

Литиевые месторождения региона представлены микроклин-альбитовыми гранитами А-типа существенно корового и корово-мантийного происхождения. Первые кристаллизуются из остаточного расплава прикорневых частей очага, сформировавшего амфибол-биотитовые и двуслюдяные граниты, при поступлении флюидов из внешнего источника. Вторые определяются как высокофосфористые литий-фтористые граниты с аномально низкими концентрациями редкоземельных элементов. Их образование связывается с кристаллизацией

расплавов, генерировавшихся в нижних горизонтах коры при воздействии мощного потока глубинных флюидов, из поднимающихся диапиров щелочно-ультраосновного состава. Эти граниты имеют параметры ультраредкометалльных образований.

4. Литература

- [1] Parfenov, L.M.; Kuzmin, M.I. (Eds.) *Tectonics, Geodynamics and Metallogeny of the Territory of the Republic of Sakha (Yakutia)*. – Moscow: MAIK Nauka/Interperiodika, 2001. – 571 p.
- [2] Maeda J. Opening of the Kuril Basin deduced from the magmatic history of Central Hokkaido, northern Japan // *Tectonophysics*. – 1990. – 174. – P. 235-255.
- [3] Datsenko V.M. Petrogeochemical typification of granitoids of the south-western framing of the Siberian platform // *Materials Of The Second All-Russian Petrographic Meeting*. – Syktyvkar, 2000. – 2. – P. 270-274 (in Russian).
- [4] Nekrasov, I, Ya. *Geochemistry of tin and rare elements of the Verkhoyansk-Chukotka fold area*. – Moscow: Nauka, 1966. – 379 p.
- [5] Bykhovsky, L.Z. Impurity elements in wolframites and cassiterites and their significance in the search and evaluation of ore deposits of Altai, Transbaikalia and the North-East of the USSR. Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Geological and mineralogical sciences. – Moscow: VEMS, 1970. – 30 p.
- [6] Trunilina, V.A.; Orlov, Yu.S.; Zaitsev, A.I. and Roev, S.P. Highly phosphorous lithium-fluoride granites of Eastern Yakutia (Verkhoyano-Kolyma orogenic region) // *Tikhooeanskaya geologiya*. – 2019. – Vol. 38. – № 1. – P. 86-101.
- [7] Towson, L.V. *Geochemical types and potential ore content of granitoids*. – Moscow: Nauka, 1977. – 279 p.
- [8] Protopopov, R.I.; Truschelev, A.M.; Protopopov, G. H. and others. *State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1 : 1,000,000 (third generation). Verkhoyano-Kolyma series. Sheet Q-53 – Verkhoyansk. Explanatory note*. – Saint Petersburg: VSEGEI, 2016. – 437 p.
- [9] Nedosekin, Yu.D. *Rare-metal granites of the North–East of the USSR*. – Moscow: Nauka, 1988. – 141 p.
- [10] Vladimirov A.G., Vystavnoy S.A., Titov A.V., Rudiev S.N., Dergachev V.B., Annikova I.Y., Tikunov Y.V. *Petrology of the Early Mesozoic rare-metal granites of the southern Altai Mountains // Geology and geophysics*. – 1998. – No. 7. – P. 901-916.

КР ИССЛЕДОВАНИЕ КУБИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ АЛМАЗА ИЗ РОССЫШЕЙ АНАБАРСКОГО АЛМАЗОНОСНОГО РАЙОНА

Саргылана Угапьева, Олег Олейников

ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39**RAMAN SPECTROSCOPY OF CUBOID DIAMONDS FROM PLACERS OF THE ANABAR DIAMONDIFEROUS REGION**

Sargilana Ugapeva, Oleg Oleinikov

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

Annotation. The results of Raman Spectroscopy study of cubic diamonds from placers of the Anabar diamondiferous region are presented. The Raman spectrum of black inclusions, in addition to the main diamond band 1332 cm^{-1} , characterized by an additional broad band with a maximum at 1420 cm^{-1} . It most likely indicates an initial stage of the polymorphic diamond to graphite conversion, characterizing by diamond amorphization and an onset of sp^2 -bond formation. Black inclusions are classified as post-grown inclusions formed as a result of diamond annealing.

1. Введение

Алмазы кубического габитуса, относящиеся к II разновидности по минералогической классификации Ю.Л. Орлова [1], составляют не менее 7,5% от общей популяции алмазов из россыпных месторождений северо-востока Сибирской платформы, в кимберлитах встречаются крайне редко [2]. Коренные источники этих россыпей до сих пор остаются предметом дискуссии. Наиболее достоверную информацию о среде и условиях кристаллизации алмаза можно получить, изучив включения закапсулированные в алмазе-матрице. С этой целью нами проведены исследования кубических кристаллов алмаза из россыпей Анабарского алмазоносного района методами Рамановской спектроскопии (спектроскопии комбинационного рассеяния (КР)). В настоящей работе приводятся результаты исследования черных включений. Под черными включениями в основном предполагают графитовые. Графит в алмазах часто встречается в виде пластинок или дендритных наростов, покрывающих поверхности включений других минералов, или образуется в дискообразных и розеткообразных трещинах, окружающих включения [3]. Такие графитовые включения относятся к эпигенетическим, их образование связано с графитизацией алмаза после роста [4]. Другой тип графитовых включений в алмазе представлен «центральными» включениями, которые расположены в центре роста алмаза-матрицы. Они в основном имеют правильную гексагональную форму и кристаллографически ориентированы относительно алмаза-матрицы. Предполагается, что такие включения служили затравками для роста кристаллов алмаза [5-7]. Большинство современных гипотез, объясняющих генезис включения графита в алмаз, основаны на предположении, что графит мог образоваться только в области его термодинамической стабильности и, следовательно, только до или после кристаллизации алмаза. Но есть и экспериментальные данные по изучению кристаллизации алмаза в неметаллических системах, свидетельствующие, что графит может кристаллизоваться в области термодинамической стабильности алмаза и совместно с алмазом, и самостоятельно [8]. Морфология кубических кристаллов из россыпей Анабарского алмазоносного района детально описана в работе [9]. Для проведения исследований методами Рамановской спектроскопии были отобраны семь пластинок кубоидов алмаза с микровключениями. Особый интерес вызвали два образца, которые практически были заполнены мелкими черными игольчатыми включениями (рисунок 1).

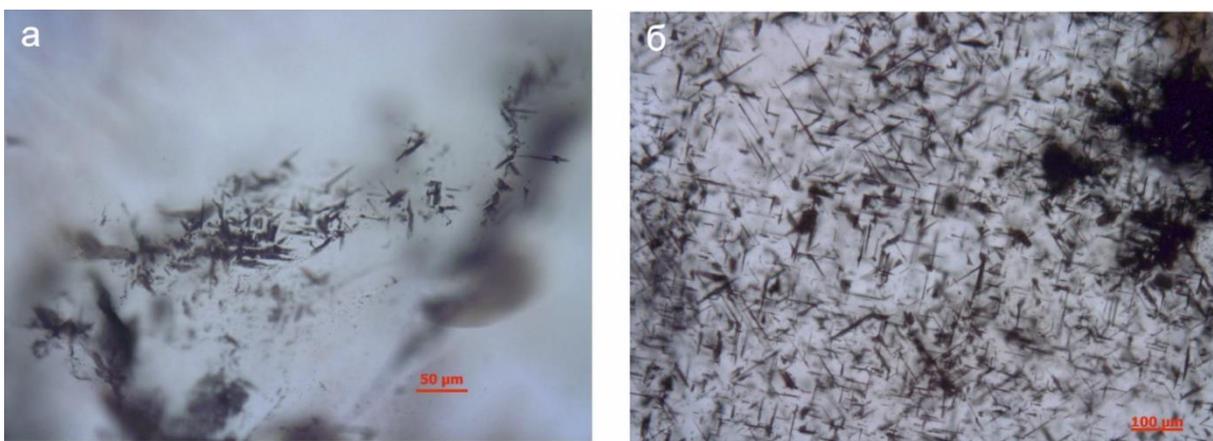


Рисунок 1 – Черные игольчатые включения в кубоидах алмаза из россыпей Анабарского алмазоносного района: а – образец 6005; б – образец 6082.

2. Результаты изучения

Для определения включений отсняты точечные КР спектры на дисперсионном микроскопе комбинационного рассеяния SENTERRA фирмы Bruker ($\lambda=532$ нм). На КР спектрах игольчатых включений кроме основной моды алмаза проявляется дополнительная широкая полоса с максимумом 1420 см^{-1} , что скорее всего показывает начальную стадию полиморфного превращения алмаза в графит, характеризующуюся аморфизацией алмаза и началом образования sp^2 -связи (рисунок 2) [8]. Согласно экспериментальным исследованиям [8, 10], длительный отжиг алмаза при $T=1500^\circ\text{C}$ приводит к образованию графита с высокоупорядоченной структурой. При этом полиморфное превращение алмаза в графит начинается после 30 мин отжига при $T=1500^\circ\text{C}$, что отражается на КР-спектрах проявлением широких полос с максимумами при $1000\text{--}1100\text{ см}^{-1}$ и 1450 см^{-1} . Первая полоса при $1000\text{--}1100\text{ см}^{-1}$ представляет собой sp^3 -гибридизованные углеродные фазы аморфного алмаза. Вторая полоса при 1450 см^{-1} характерна для sp^2 -связей с короткой длиной связи [8].

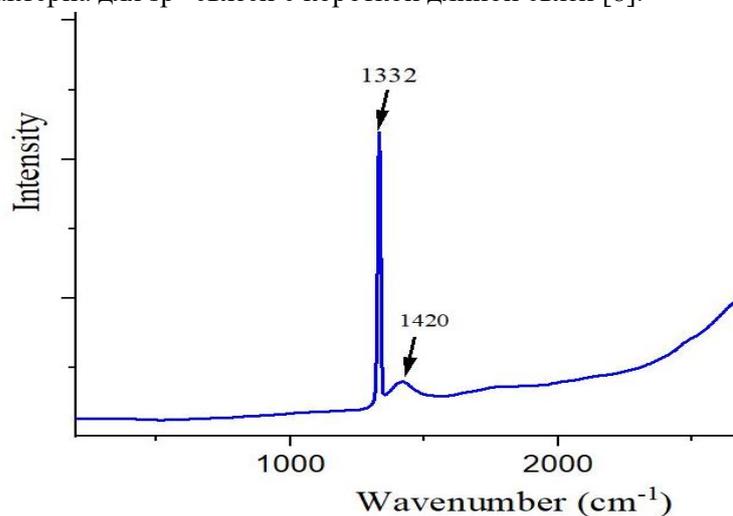


Рисунок 2 – КР спектр черного игольчатого включения (образец 6082).

3. Выводы

Таким образом, КР исследование кубоидов алмаза из россыпей Анабарского алмазоносного района показало наличие постростовых «включений» - начальную стадию полиморфного превращения алмаза в графит как результат отжига алмаза после роста.

4. Благодарности

Работа выполнена в рамках госзаданий ИГАБМ СО РАН.

5. Литература

- [1] Orlov, Yu. L. Mineralogija almaza. [Mineralogy of Diamond]. – Moscow, Nauka publ., 1984. – 264 p. (in Russian).
- [2] Grakhanov, S.A., Shatalov, V.I., Shtyrov, V.A., Kychkin, V.R., Suleimanov, A.M. Diamond placers of Russia. – N.: “Neo”, 2007. – 457 p. (In Russian).
- [3] Harris, J.W. Black material on mineral inclusions and internal fracture planes in diamond // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 1972. – 35 (1). – P. 22-33.
- [4] Harris, J.W., Vance, E.R. Induced graphitization around crystalline inclusions in diamond // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 1972. – 35 (3). – P. 227-234.
- [5] Bulanova, G.P., Varshavskiy, A.V., Leskova, N.V., Nikishova, L.V. On “central” inclusions in natural diamond // Doklady Akademii Nauk SSSR. – 1979. – 224. – P. 704-706 (in Russian).
- [6] Glinnemann, J., Kusaka, K., Harris, J.W. Oriented graphite single-crystal inclusions in diamond // Zeitschrift für Kristallographie. – 2003. – 218. – P. 733-739.
- [7] Nasdala, L., Hofmeister, W., Harris, J.W., Glinnemann, J. Growth zoning and strain patterns inside diamond crystals as revealed by Raman maps // American Mineralogist. – 2005. – 90 (4). – P. 745-748.
- [8] Khokhryakov, A.F., Nechaev, D.V., Sokol, A.G., Palyanov, Yu.N. Formation of various types of graphite inclusions in diamond: Experimental data // Lithos, 112S (2009). – P. 683-689.
- [9] Pavlushin, A.D., Zedgenizov, D.A., Pirogovskaya, R.L. Crystal morphological evolution of growth and dissolution of curve-faced cubic diamonds from placers of The Anabar diamondiferous region // Geochemistry International. – 2017. – 55 (12). – P. 1193-1203.
- [10] Ferrari, A.C., Robertson, J. Raman spectroscopy of amorphous, nanostructured, diamond-like carbon, and nanodiamond // Philosophical Transactions of the Royal Society. – 2004. – A 362 (1824). – P. 2477-2512.

РУДООБРАЗУЮЩИЕ СИСТЕМЫ ОРОГЕННЫХ ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЯНО-КОЛЫМСКОГО МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКОГО ПОЯСА

Валерий Фридовский

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

ORE-FORMING SYSTEMS OF OROGENIC GOLD DEPOSITS OF THE YANO-KOLYMA METALLOGENIC BELT

Valery Fridovsky

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

Annotation. The results of geochronological, structural and isotope-geochemical studies of orogenic gold deposits of the central sector of the Yana-Kolyma metallogenic belt are presented. Based on the data obtained and previously published, three tectonothermal events (151-141, 138-136 and 132-123 Ma) are studied, which occurred during hydrothermal processes in orogenic gold deposits of the central sector of the YKMB. Tithonian-Valanginian estimates of the age of orogenic gold deposits are comparable with crystallization/cooling time of intrusive rocks of the complex of small intrusions (151-136 Ma) of accretion-collision stage of development of the NE of the Siberian craton's margin. This age interval is characterized by progressive fold and thrust deformations. The third stage (132-123 Ma), mainly of strike-slip deformations, is probably a reflection of superimposed tectonothermal events in the rear of the Uda-Murgal arc. The isotopic composition of minerals of orogenic gold deposits reflects the mixed nature of their sources with a considerable contribution of subcrustal material. It is assumed that the features of the evolution of ore-forming systems are related to the interaction of subsynchronous accretion-collision and subduction-accretion geodynamic events on the northeastern and eastern margins of the Siberian craton in the Late Jurassic – Early Cretaceous.

1. Введение

Орогенные золоторудные месторождения (ОЗМ) являются основным экономически важным типом монометалльных месторождений позднеюрско-раннемелового Яно-Колымского металлогенического пояса (ЯКМП). Развитие рудообразующих систем ОЗМ определяется металлогенической и геодинамической эволюцией структур восточной окраины и периферии Сибирского кратона. Под рудообразующей системой ОЗМ понимается совокупность геологических процессов, определяющих условия формирования месторождений или группы месторождений одного типа в контексте развития орогенного пояса [1]. В сообщении рассматриваются геохронологические, структурные и изотопно-геохимические данные направленные расширение понимания специфики рудообразующих систем ОЗМ ЯКМП, отдельные аспекты эволюции которых остаются дискуссионными. В частности, важным является анализ эпизодов проявления и возрастных взаимоотношений магматизма и орогенного золотого оруденения, эволюции структур контролирующего оруденение и возможных источников вещества и флюидов.

2. Возрастные рубежи формирования магматизма и оруденения

В рудных районах ОЗМ центрального сектора ЯКМП проявлены разновозрастные магматические образования, а некоторые месторождения локализируются в дайках (Вьюн) или в массивах гранитоидов (Якутское и др.). Рудоносные дайки известны и в Верхне-Колымском секторе ЯКМП [2]. Датирование U-Pb SHRIMP II методом магматических образований, а также слюд ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) и золота (Re-Os) из рудных жил и метасоматитов ОЗМ центрального сектора ЯКМП с учетом имеющихся данных [3] позволили выделить несколько тектонотермальных событий формирования ОЗМ центрального сектора ЯКМП. Позднеюрско-раннемеловые гранитоиды малых массивов (Букесченский, Самырский и другие) и дайки от основного до

кислого состава комплекса малых интрузий формировались 151-143 млн лет назад (циркон, U-Pb SHRIMP II [4, 5]). Широкий возрастной интервал (от 148 до 126 млн лет) демонстрируют датировки слюды ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) и золота (Re-Os) из рудных жил и метасоматитов ОЗМ [3, 5, 6]. Эти события коррелируются с различными тектоническими процессами на восточной окраине и периферии Сибирского кратона в поздней юре-раннем мелу. Изотопные Re-Os оценки возраста золота (148 и 137 млн лет [6]) сопоставимы с временем формирования даек (151—145 млн лет) и остывания гранитоидов комплекса малых интрузий (138—137 млн лет) [5] и отражают два этапа формирования орогенного золотого оруденения западной части ЯКМП в связи с аккреционно-коллизийными событиями на северо-восточной окраине Сибирского кратона. Согласно новым $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ геохронологическим данным для серицита из метасоматитов, а также полевого шпата и плагиоклаза из даек золоторудных и золото-сурьмяного месторождений интервал 132-123 млн лет может быть связан с тектонотермальными процессами формирования раннемелового Охотско-Корякского металлогенического пояса [7]. Эти данные хорошо согласуются с имеющимися возрастными оценками для серицита из жил (127-126 млн лет, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ [3] и гранитоидов (128-120 млн. лет, Rb-Sr и K-Ar [8]) различных рудных объектов центрального сектора ЯКМП. Готерив-аптское событие могло быть вызвано тектонотермальными процессами, происходившими в тылу Удско-Мургальской магматической дуги в условиях перехода от режима энсиалической островной дуги к режиму окраинно-континентальной дуги [9]. В Аллах-Юньской тектонической зоне с этим процессом в апте связано формирование крупного Нежданинского и других (Задержнинское, Маринское) золоторудных месторождений и сопряженного гранитоидного магматизма уэмяхского комплекса (Тарбаганнаский, Уэмяхский другие массивы).

3. Эволюция рудовмещающих структур

Изучение строения месторождений, реконструкции тектонических полей напряжений, а также новые результаты датирования месторождений и пространственно сближенного магматизма комплекса малых интрузий позволили выделить несколько деформационных событий и определить их связь с геодинамическими процессами на восточной окраине Сибирского кратона. Ранние прогрессивные деформации характеризуются развитием СЗ изоклинальных и сжатых складок, надвигов ЮЗ вергентности и сопряженных поперечных СВ сдвигов, межслоевых срывов и кливажа. Складки наклонные и лежащие с горизонтальными шарнирами. Ранние складки коаксиально изгибаются в условиях прогрессивной деформации. Поздние складки – линейные концентрического типа с преобладающим северо-западным простиранием и юго-западной вергентностью. Как ранние, так и поздние складки и ассоциирующие с ними структуры образовались при СВ-ЮЗ ориентировке оси σ_3 и близвертикальной оси σ_1 . Эти структуры сшиваются позднеюрскими дайками от основного до кислого состава и позднеюрскими-раннеловыми гранитоидами комплекса малых интрузий [5]. Можно предположить проявления описанных прогрессивных складчато-надвиговых деформаций не позже конца позднеюрской эпохи (титонский век) в ходе фронтального сближения Колымо-Омолонского супертеррейна с восточной окраиной Сибирского кратона [10, 11].

Наблюдения за строением жильного типа рудных тел, массовые замеры элементов залегания кварцевых жил орогенных месторождений и рудопроявлений и их анализ на стереографических проекциях показали закономерное положение полюсов кварцевых жил относительно проекций рудоконтролирующих надвигов и плоскости σ_3/σ_1 . Для рудного этапа устанавливается региональное взбросо-надвиговое поле тектонических напряжений, СВ-ЮЗ близвертикальное положение σ_3/σ_1 , пологое погружение σ_3 и крутое – σ_1 . На ряде месторождений, где проявлены наложенные поздние деформации, положение σ_3/σ_1 изменяется от субширотного (месторождение Мало-Тарынское) до меридионального (месторождение Нагорное).

Послерудные деформации – вначале левые, а затем правые сдвиги вдоль разломов СЗ ориентировки, обусловлены готерив-позднемеловыми процессами в тылу Удско-Мургальской и Охотского-Чукотской магматических дуг. С левосдвиговыми движениями ассоциируют складки северо-восточного простирания различного морфологического типа – от открытых симметричных до сжатых опрокинутых. Шарниры складок погружаются под углами от 20° до 80°. Кливажа, связанного со складками северо-восточного простирания не установлено. Эти структуры формировались при доминирующем близгоризонтальном положении плоскости σ_3/σ_1 , 3-В ориентировке σ_3 и С-Ю – σ_1 . С поздними правосдвиговыми деформациями ассоциируют близширотные симметричные, реже асимметричные складки конического и

цилиндрического типов, а так же плитчатый и скорлуповато-плитчатый кливаж, наложенный на региональный кливаж северо-западной ориентировки. Правосдвиговые движения по СЗ разломам происходили при преобладающей С-Ю ориентировке σ_3 , близширотной – σ_1 и близгоризонтальном положении σ_3/σ_1 .

4. Изотопная геохимия минералов

Выявлено сходство в изотопном составе пирита и арсенопирита в золото-кварцевых жилах и сопровождающих их пирит-арсенопирит-серицит-кварцевых метасоматитах ОМЗ центрального сектора ЯКМП. Изотопный состав серы арсенопирита и пирита жильной минерализации изменяется соответственно от -2.1 ‰ до +2.4 ‰ и от -6.6 ‰ до +5.4 ‰ [12], а вкрапленной – соответственно от -2.1 ‰ до +4.4 ‰ и от -6.4 ‰ до +5.6 ‰. Гомогенный изотопный состав серы пирита и арсенопирита и других сульфидов из рудных жил и метасоматитов орогенных месторождений золота указывает на их формирование в ходе единого эволюционирующего гидротермального события. Величины $\delta^{34}\text{S}$ близкие к 0‰ характерны для ювенильного источника серы. Полученные значения изотопного состава серы сульфидов характеризуются меньшим интервалом вариаций, чем $\delta^{34}\text{S}$ в пирите из кварцевых жил и метасоматитов (среднее +4.0‰) Верхне-Колымского сектора ЯКМП [13]. Установленные начальные отношения изотопов осмия ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$)_i золота изменяются от 0.1844 до 0.2475 и указывают на участие в рудообразовании фертильного сублитосферного источника.

5. Выводы

Выделенные три кластера (151–141, 138–136 и 132–123 млн лет) отражают время тектонотермальных событий, проявленных при гидротермальных процессах на ОЗМ центрального сектора ЯКМП. Титон-валанжинские Ar-Ar и Re-Os оценки возраста орогенных золоторудных месторождений сопоставимы со временем кристаллизации/остывания интрузивных пород основного, среднего и кислого составов комплекса малых интрузий (151–136 млн лет) аккреционно-коллизионного этапа развития СВ окраины Сибирского кратона. Для этого возрастного интервала характерны прогрессивные складчато-надвиговые деформации, определяющие строение ОЗМ. Тогда как третий этап (132–123 млн лет), преимущественно, сдвиговых деформаций, вероятно, является отражением наложенных тектонотермальных событий в тылу Удско-Мургальской дуги. Изотопный состав минералов ОЗМ отражает смешанную природу их источников с существенным вкладом субкорового материала. Предполагается, что развитие рудообразующих систем ОЗМ ЯКМП связано с взаимодействием в поздней юре – раннем мелу субсинхронных аккреционно-коллизионных и субдукционно-аккреционных геодинамических событий на СВ и В окраинах Сибирского кратона.

6. Благодарности

Базовое финансирование поддержано государственным заданием ИГАБМ СО РАН. Анализ изотопных данных выполнен за счёт проекта РФФ №23-47-00064.

7. Литература

- [1] Goryachev N.A. Gold ore-forming systems of orogenic belts // Bulletin of the SVKNI FEB RAS. – 2006. – Vol. 1. – P. 2-16.
- [2] Volkov A.V., Prokof'ev V.Yu., Sidorov A.A., Egorov V.N., Goryachev N.A., Biryukov A.V. Gold deposits in dikes of the Yana-Kolyma belt // Geology of Ore Deposits. – 2008. – Vol. 50 (4). – P. 275-298.
- [3] Prokopiev, A.V., Borisenko, A.S., Gamyarin, G.N., Pavlova, G.G., Fridovsky, V.Yu., Kondrat'eva, L.A., Anisimova, G.S., Trunilina, V.A., Ivanov, A.I., Travin, A.V., Koroleva, O.V., Vasiliev, D.A., Ponomarchuk, A.V. Age constraints and tectonic settings of metallogenic and magmatic events in the Verkhoyansk–Kolyma folded area // Russ. Geol. Geophys. – 2018. – Vol. 59 (10). – P. 1237-1253.
- [4] Fridovsky V.Yu., Yakovleva K.Yu., Vernikovskaya A.E., Vernikovskiy V.A., Matushkin N.Y., Kadilnikov P.I., Rodionov N.V. Geodynamic Emplacement Setting of Late Jurassic Dikes of the Yana–Kolyma Gold Belt, NE Folded Framing of the Siberian Craton: Geochemical, Petrologic, and U–Pb Zircon Data // Minerals. – 2020. – Vol. 10 (11). – P.1000.
- [5] Fridovsky V.Yu., Vernikovskaya A.E., Yakovleva K.Yu., Rodionov; N.V., Travin A.V., Matushkin N.Yu., Kadilnikov P.I. Geodynamic formation conditions and age of granitoids from small

- intrusions in the west of the Yana–Kolyma gold belt (Northeast Asia) // *Russ. Geol. Geophys.* – 2022. – Vol. 63 (4). – P. 483-502.
- [6] Fridovsky, V.Yu., Goryachev, N.A., Krymsky, R.Sh., Kudrin, M.V., Belyatsky, B.V., Sergeev, S.A. The age of gold mineralization in the Yana–Kolyma metallogenic belt, northeastern Russia: First data of Re–Os isotope geochronology of native gold // *Russ. J. Pac. Geol.* –2021. – Vol. 15 (4). – P. 293-306.
- [7] Geodynamics, magmatism and metallogeny of the East of Russia (A.I.Khanchuk ed.). In 2 books. – Vladivostok: Dalnauka, 2006. – Book 1. P. 1-572, Book 2. P. 573-981.
- [8] Zaitsev, A.I., Fridovsky, V.Y., Kudrin, M.V. Intensive options of granitoid formation in Kurdat and Samyr massives, Tas-Kystabyt magmatic belt // *Otechestvennaya Geologiya.* – 2017. – Vol. 5. – P. 80-89.
- [9] Tikhomirov P.L., Pravikova N.V., Bychkova Ya.V. The Chukotka Segment Of The Uda-Murgal And Okhotsk-Chukotka Volcanic Belts: Age And Tectonic Environment// *Russian Geology and Geophysics.* – 2020. – Vol. 61 (4). – P. 378-395.
- [10] Fridovsky V.Yu., Soloviev E.E., Polufantikova L.I. Dynamics of formation and structure of the south-eastern sector of the Adycha-Ner metallogenic zone // *Otechestvennaya geologiya.* – 2003. – Vol. 3. – P. 16-21.
- [11] Fridovsky, V.Yu., Gamyarin, G.N., Polufantikova, L.I. The Sana Au–quartz deposit within the Taryn ore cluster // *Razvedka and Okhrana Nedr.* – 2013. – Vol. 2. – P. 3-7.
- [12] Gamyarin, G.N., Fridovsky, V.Yu., Vikent’eva, O.V. Noble-metal mineralization of the Adycha–Taryn metallogenic zone: geochemistry of stable isotopes, fluid regime, and ore formation conditions // *Russ. Geol. Geoph.* – 2018. – Vol. 59(10). – P. 271-287.
- [13] Tyukova, E.E.; 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. – P. 29-43.

ПРИМЕНЕНИЕ БЕЗВЗРЫВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА КАРЬЕРАХ В УСЛОВИЯХ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД

Доржо Хосоев

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

APPLICATION OF NON-EXPLOSIVE TECHNOLOGIES ON QUARRY IN CONDITIONS OF PERMAFROST

Dorjo Khosoev

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

Annotation. In a review form, the experience of operating non-explosive equipment at mining enterprises is summarized. It is noted that modern hydraulic excavators have digging forces several times higher than mechanical shovels and are more adapted to non-explosive excavation of hard, including semi-rock. In the development of frozen rocks, hydraulic hammers, active action buckets on excavators, rippers on bulldozers, surface miners, and in some cases rotary excavators are used. Caterpillar has come up with a technology for loosening and excavating hard rock (down to rock) using quick-change attachments. Tests of the KSM-2000R combine at the Taldinsky quarry showed its stable operation when mining rocks with a compressive strength of up to 120 MPa, the effectiveness of physical and chemical methods of rock preparation for excavation. Taking into account the mining and geological conditions and rock properties of the Elga deposit, the employees of Wirtgeninternational GmbH calculated the technical and economic indicators of coal and overburden mining using Wirtgen 4200SM surface miners loaded into 130-ton dump trucks.

1. Введение

Две трети территории Российской Федерации, на которых разрабатывается большое количество месторождений полезных ископаемых, в том числе угля, алмазов, золота, частично или полностью сложены многолетнемерзлыми горными породами. В этих районах находится значительная часть горнодобывающих предприятий с открытым способом добычи, на которых используют различное горнотранспортное оборудование (механические и гидравлические лопаты, драглайны, многоковшовые экскаваторы). Оборудование работает в сложных горно-геологических и климатических условиях, определяющих их производительность, надежность и затраты на эксплуатацию.

При разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом выемочно-погрузочные работы являются одним из основных производственных процессов.

Экскавация даже весьма крепких пород без предварительной взрывной подготовки становится возможной лишь благодаря высоким энергосиловым показателям гидравлических экскаваторов.

По оценке специалистов Института горного дела Сибирского отделения РАН [1] и других научно-исследовательских организаций, объем горных работ в породах средней крепости с использованием безвзрывных технологий и созданных к настоящему времени для этих целей машин только при разработке угольных и рудных месторождений Урала и Сибири может составить порядка 800-900 млн. м³ в год или 35-40% общего объема извлекаемых горных пород. Более половины этого объема составляют породы угольных разрезов Кузбасса, Канско-Ачинского бассейна и Якутии.

2. Материалы

Методики безвзрывной добычи твердых полезных ископаемых позволяют вести открытые горные работы с меньшим экологическим ущербом [2]. Однако сфера их применения ограничена факторами геологического и экономического характера. Из самых известных способов можно отметить:

- гидромолоты, как навесное оборудование бульдозеров и экскаваторов;
- экскаваторы с ковшом активного действия, имеющим особый механизм черпания, с участием в процессе напорного механизма. Это повышает усилие черпания на режущей кромке ковша и позволяет дробить породу;
- гидравлические экскаваторы;
- бульдозеры с рыхлителем;
- скреперы усовершенствованной конструкции;
- горные комбайны (майнеры), фрезерного типа, с фрезерным барабаном; с режущими роторными колесами; с фрезой позади корпуса; стреловые фрезерные комбайны; комбайны для подземных работ.

На протяжении нескольких десятилетий бульдозерно-рыхлительные агрегаты были практически единственным средством при безвзрывной разработке многолетнемерзлых пород в условиях низкой температуры воздуха. Это оборудование хорошо зарекомендовало себя на карьерах Сибири и Северо-Востока страны и как правило механическое рыхление обычно в 2-3 раза дешевле буровзрывного.

В условиях горных предприятий Якутии при разработке россыпей наибольшее распространение получили бульдозерно-рыхлительные агрегаты КамацуD-355A, КамацуD-375A и др.

При разработке мерзлых пород наиболее эффективными оказались одностоечные рыхлители. Навесные рыхлители на мощных тракторах позволяют производить рыхление мерзлых пород на глубине до 60 см, а в отдельных случаях – до 80 см. С появлением более мощных машин глубина рыхления доведена до 1,3-1,78 м.

Карьерные экскаваторы с ковшами активного действия (КАД) способны разрабатывать трещиноватые породы прочностью только до 60...80 МПа (коэффициент крепости $f=6...8$) без предварительного их разупрочнения [3].

Использование экскаваторов с КАД, ударные зубья которых оснащены пневмомолотами, позволяет расширить область безвзрывной выемки плотных и полускальных пород (коэффициент крепости до 3,5-4), но траектория движения ковша при этом не обеспечивает эффективной селекции [4].

В настоящее время за рубежом и в России широкое распространение получили гидравлические экскаваторы различных марок. В России применение гидравлических экскаваторов началось в Якутии в начале 80-х годов прошлого века и в настоящее время активно распространяется по всему Сибирскому региону.

На карьерах ПАО АК «АЛРОСА» с 1999 г. работают экскаваторы H-135S с ковшом 10 м³ и два H-285S с ковшом 19 м³.

На вскрышных работах АО ХК «Якутуголь» с 2002 г. работают четыре экскаватора PC-5500 и три самые мощные модели PC-8000, на добычных работах экскаватор PC-3000 – обратная лопата с удлиненным рабочим оборудованием.

Следует отметить, что условия экскавации в забоях с кимберлитовыми породами (в ПАО АК «АЛРОСА») существенно отличаются от вскрышных забоев на разрезе «Нерюнгринский».

На основе 10-летней эксплуатации в АК «АЛРОСА» (ПАО) были апробированы значения параметров и определены возможности мощных гидравлических экскаваторов (H-285S) с ковшом 19 м³. Экспериментально установлено, что при послойной выемке сверху вниз высота забоя может составить до 25 м при паспортной высоте копания 16 м. Определен средний размер куска (не более 300 мм) горной массы для ковша 19 м³, с допустимым негабаритом в забое до 2500 мм.

Высокие производственные показатели работы дизельных экскаваторов РС-3000 были также достигнуты и на месторождении кимберлитовых руд им. Гриба – Верхотинский ГОК в Архангельском регионе, где РС-3000 с рабочим оборудованием прямая и обратная лопата и ковшем 15 м³ отгружали в 130-тонные самосвалы вскрышные породы без взрывного рыхления в объемах 400–500 т м³/мес.

Опыт применения гидравлических экскаваторов фирмы LIEBHERR на карьерах строительных материалов [5] показывает, что прочность на одноосное сжатие пород, разрабатываемых без предварительного рыхления взрывом, может достигать 120–150 МПа.

На предприятиях угле и алмазодобычи определены рациональные условия эксплуатации. Анализ полученных зависимостей показал, что современные гидравлические экскаваторы имеют значения фактических усилий копания в 2–2,5 раза больше по сравнению с механическими лопатами и более приспособлены к безвзрывной выемке крепких, в том числе полускальных пород.

Одним из перспективных направлений в этом плане является так же применения скреперов усовершенствованной конструкции в комплекте с выемочными машинами фрезерного типа, особенно на сложноструктурных месторождениях с коэффициентом крепости вскрышных пород $f = 4-8$ (по шкале М.М. Протодяконова). Работа скреперов с длинными ковшами и интенсификаторами загрузки в комплексе с выемочными машинами фрезерного типа позволяет повысить эффективность открытых горных работ в течении летнего и зимнего периодов года в 1,5-2 раза по сравнению с буровзрывной технологией, и комплектом экскаватор – автосамосвал, которая чаще всего применяется в РФ. Скреперы при этом становятся всепогодными машинами, поскольку зачерпывают как разрыхленную, так и талую и мерзлую породу.

На угольных разрезах России значительные объемы вскрышных и добычных работ выполняется роторными экскаваторами. Роторные траншейные экскаваторы ЭР-7АМ были испытаны [6] на горных предприятиях Дальстроя в Хабаровске, Благовещенске, Комсомольске-на-Амуре. Производительность экскаваторов ЭР-7АМ во время испытаний (конец февраля – начало марта) на мягких породах, промерзших на глубину до 1,8 м, составляла 120-130 м³/ч. На угольных разрезах Приморского края, где климатические условия менее суровы, чем в Амурской области, возможно применение менее мощного роторного траншейного экскаватора ЭТР-204А вместо более дорогостоящего ЭТР-254-01. Расчетная себестоимость разрушения мерзлой породы по предлагаемой технологии в наиболее неблагоприятный период (конец февраля – начало марта), когда глубина промерзания пород наибольшая, составляет 0,4-0,45 долл., что в 1,55-1,75 раза меньше, чем при разрушении взрывным способом [7].

Впервые в условиях Крайнего Севера с 1985 г. на россыпи проводилась опытно-промышленная эксплуатация роторных экскаваторов ЭРГ-350 и ЭРГ-400. Среднечасовая производительность составила 482 м³/час. На производительность роторного экскаватора оказывало весьма существенное влияние наличие включений крупнообломочного материала. Для решения этой проблемы создана методика количественной оценки экстремальных ситуаций при непрерывной экскавации горных пород с крепкими включениями [8]. Это позволило существенно снизить влияние крепких включений, повысить эффективность и производительность роторного экскаватора в условиях россыпи р. Б. Куранах.

В 1993 г. на карьере трубки «Юбилейная» Айхальского ГОКа был начат комплекс работ с использованием комбайнов SM 2600. Коэффициент крепости по Протодяконову колеблется от 3 до 7,6. В процессе экспериментов установлено, что глубина резания комбайна составляет 0,2-0,25 м, максимальная – 0,26 м. При глубине 0,27 м комбайн останавливается. Производительность изменялась от 110 до 820 м³/ч (средняя – 315 м³/ч). Стойкость резов составляла 1000-1200 м³ горной массы на один резец [9].

В работе [10] подчеркивается непригодность фрезерного оборудования выемочных машин для выемки слабых связанных вскрышных пород (суглинках, глинах), находящихся как в талом, так и в мерзлом состоянии.

В 1996 г. на кимберлитовой трубке "Удачная" в Мирнинском районе Республики Саха (Якутия) была осуществлена безвзрывная экскавация алмазоносных пород роторным экскаватором К-650 (Чешская Республика) с удельным усилием копания до 2,4 МПа (235 Н/см²). Такая разработка кимберлитов в условиях Крайнего Севера, на нижних горизонтах глубокого (до 400 м) карьера проводилась впервые в мировой практике [11].

При экскавации кимберлитов крепостью 4-5 по Протоdjяконову, производительность экскаватора составляла до 400 м³/ч, что близко к паспортной (450 м³/ч). На Восточном рудном теле, при крепости кимберлитов до 8, производительность снижалась до 140-230 м³/ч, а удельное усилие копания доходило до 5 МПа. В целом испытания показали, что после соответствующей модернизации режущей части экскаватор К-650 способен достаточно эффективно разрабатывать кимберлиты крепостью по Протоdjяконову до 5 с производительностью до 400 м³/ч в рыхлой массе.

Применение роторных экскаваторов с высоким усилием копания для разработки сравнительно непрочных пород (кимберлитов) является, к сожалению, лишь эпизодическим примером их использования, что отмечено в [12].

Компания Caterpillar® в качестве альтернативы традиционному способу добычи полезных ископаемых предлагает технологию Rip&Load (в буквальном переводе - рыхление и погрузка), которая позволяет производить рыхление и экскавацию прочных горных пород (вплоть до скальных) без применения БВР [13]. В качестве основной добычной машины используется гидравлический экскаватор типа CaT®390DL ("обратная лопата") и комплект специального навесного оборудования, который включает в себя:

- быстросъемное устройство с гидравлическим приводом запорной планки;
- рыхлитель с возможностью крепления к рукояти посредством быстросъемного устройства;
- совместимый с быстросъемным устройством ковш.

Смена навесного оборудования занимает не более 30-40 с.

Опыт использования технологии Rip&Load позволил выявить ряд преимуществ в сравнении с классической технологией. Согласно проведенным расчетам, удельные затраты на разрушение горных пород в US\$/т при использовании технологии Rip&Load приблизительно в 3 раза ниже, чем при использовании классической технологии с использованием БВР и почти в 5 раз ниже, чем при использовании добычного фрезерного комбайна.

Комплексные технологические и эксплуатационные испытания карьерного комбайна КСМ-2000Р были проведены на разрезе "Талдинский" в 1996-1997 гг. в изменяющихся горнотехнических и климатических условиях [14]. Результаты испытаний показали, что техническая производительность комбайна серии 2000R при отработке опытного вскрышного блока была на 30% выше гарантированной и составляла 1800 м³ твердой горной массы в час или 4482 т/ч.

На основании анализа физико-механических свойств вскрышных пород и угля месторождения с учетом усилий резания рабочего органа в ИГДС СО РАН обоснована возможность применения и установлены расчетные показатели производительности комбайнов КСМ-2000Р [15] на породах и углях Эльгинского месторождения.

По песчаникам (мелкозернистым, среднезернистым и крупнозернистым) которые занимают основную долю (около 70%), в коренных породах Эльгинского месторождения, производительность машины по расчетам составит от 460 до 630 м³/ч. При условии применения ПАВ производительность КСМ-2000Р по песчаникам может возрасти от 750 м³/ч до 1100 м³/ч (80% от паспортной). Производительность КСМ-2000Р по углям Эльгинского месторождения с учетом их прочностных характеристик и усилия резания машины будет обеспечена в паспортных пределах (1400 м³/ч) [16]. Полученные результаты имеют важное значение для разработки технологических мероприятий по снижению прочности многолетнемерзлых горных пород и повышению эффективности их разработки.

С учетом горно-геологических условий и свойств горных пород Эльгинского месторождения сотрудниками фирмы *WirtgenInternationalGmbH* произведен расчет технико-экономических

показателей выемки угля и вскрышных пород с использованием горных комбайнов Wirtgen 4200SM с погрузкой в 130 тонные автосамосвалы [17].

По проведенным расчетам средняя эксплуатационная производительность Wirtgen 4200SM при разработке сложноструктурных угольных пластов составила 1900 т/ч, что превышает производительность гидравлических экскаваторов PC-2000 в 2,1 раза и PC-1250 в 3,2 раза, при этом себестоимость добычи в 1,5 раза меньше.

По вскрышным породам средняя эксплуатационная производительность рассматриваемых комбайнов составила 229 м³/ч, что меньше эксплуатационной производительности применяемых экскаваторов PC-5500 и ЭШ 20/90в 3,1 и 1,4 раза соответственно. При этом себестоимость разработки вскрышных пород комбайнами Wirtgen 4200SM в 2,2 раза больше чем при циклической технологии.

3. Выводы

Проведенный анализ по применению безвзрывных технологий при разработке многолетнемерзлых пород говорит, что за последние 15-20 лет на горнодобывающих предприятиях России ведутся достаточно масштабные работы по созданию и внедрению новых машин.

Кроме гидравлических экскаваторов, на безвзрывной добыче используется и другая горная техника: гидромолоты, ковши активного действия на экскаваторах, рыхлители на бульдозерах, скреперы усовершенствованной конструкции, горные комбайны. Достаточно редким случаем является применение роторных экскаваторов с высоким усилием копания (К-650) для разработки сравнительно непрочных пород (кимберлитов), например, на трубке "Удачная" в Якутии. Компанией Caterpillar® предложена технология Rip&Load для рыхления и экскавации прочных горных пород (вплоть до скальных) без применения БВР с помощью быстрозаменяемого навесного оборудования. Испытания комбайна КСМ-2000Р на Талдинском карьере показали его стабильную работу при отработке пород с пределом прочности на сжатие до 120 МПа, эффективность физико-химических методов подготовки пород к выемке.

В ИГДС СО РАН обоснована возможность применения и установлены расчетные показатели производительности комбайнов КСМ-2000Р на породах и углях Эльгинского месторождения. Полученные результаты имеют важное значение для разработки технологических мероприятий по снижению прочности многолетнемерзлых горных пород и повышению эффективности их разработки.

4. Литература

1. Kopytov A.I., Masaev YU.A., Masaev V.YU. Vliyanie tekhnologii vzryvnyh rabot na sostoyanie okruzhayushchej sredy v Kuzbasse // Ugol'. – 2020. – 5. – P. 57-62. (In Russ.).
2. Rogov O., Nazarova E. Obojdyomysya bez vzryvov. Promyshlennye stranicy Sibiri. // Dobyvayushchaya promyshlennost'. – 2015. – 3 – P. 22-25. (In Russ.).
3. Mattis A.R. Sozdanie ekskavatornyh kovshej aktivnogo dejstviya: avtoref. diss. na soisk. uch. step.d.t.n. – Novosibirsk: 1992. – 46 p. (In Russ.).
4. Labutin V.N., Mattis A.R., Zaitseva A. Blast-free mining of coal seams by excavators equipped with rotary dynamic buckets // Journal of Mining Science. – 2005. – T. 41.(2). – P. 143-150. (In Russ.).
5. Reshetnyak S.P. Razvitie tekhniki i tekhnologii bezvzryvnoj razrabotki gornyh porod na kar'erah. S.P. Reshetnyak, N.S. Avraamova // Gornaya Tekhnika. – 2012. – 1. (In Russ.).
6. Oparin, V. N. Bezvzryvnye tekhnologii otkrytoj dobychi tverdyh poleznyh iskopaemyh. – Novosibirsk :Izd-vo SO RAN, 2007. – 336 p. (In Russ.).
7. Cirik, D. Reshenie problem okruzhayushchej sredy ugol'nyh razrezov s pomoshch'yu dobychnykh kombajnov firmy KRUPP. D. Cirik, C. Niemann-Delius // Russian Mining Industry. – 1995. – 1. – P. 29-35. (In Russ.)
8. Ermakov S. A., Burakov A. M. Snizhenie dinamichnosti nagruzok pri razrabotke kim-berlitov rоторnym ekskavatorom K-650 // Kolyma. – 2002. – 3. – P. 24-26. (In Russ.).

9. Kuznecov A.G., SHtejncajg R.M., Voronkov G.YA., SHenderov A.I., Aleksandrov A.A. Primenenie metodov fiziko-himicheskogo razuprochneniya massivov krepkih gornyh porod pri rabote mashin tipa KSM // Russian Mining Industry. – 1997. –4 (In Russ.).
10. Shemyakin S.A., Matveev D.N., Cheban A.Y. Economic substantiation of the effectiveness of non-explosive selective mining of minerals and host rocks using technical and technological complexes based on milling combines // Mining Journal. – 2015. – 2. – 43 p. (In Russ.).
11. Usachev V.M., Yurin N.N., Yalputa G.V. Testing of the K-650 compact rotary mechanical shovel at the Udacha Tube open-pit in Northern Yakutia // Russian Mining Industry. – 1995. – 4. – P. 2-4. (In Russ.) URL: <https://mining-media.ru/ru/article/newtech/463-ispytaniyakompaktnogorotornogo-ekskavatora-k-650-na-karere-tr-udachnaya-v-severnoj-yakutii>
12. Butkevich G. R. Vzryvnye i bezvzryvnye sposoby razrusheniya skal'nyh porod na kar'erah // Stroitel'nye materialy. – 2011. – 2. – P. 33-34.
13. Bratchikov N.V., Shornikov V.V., Antipov D.A. Blastless rock mining technology // Cement and its Applications. – 2013. – 1. – P. 2-3. (In Russ.)
14. Vinickij K.E., Voronkov G.YA., Marcinkevich G.I., SHenderov A.I., SHtejncajg R.M. Tekhnologicheskie osnovy razuprochneniya gornyh massivov na otkrytyh razrabotkah ugol'nyh mestorozhdenij. – M.: IGD im. A.A. Skochinskogo, 1995. – 36 p.
15. Khosoev D.V., Ermakov S.A. Estimation of technologies of development a coal deposit of Elginskoe // Ugol'. – 2009. – 11. – P. 9-11. (In Russ.)
16. Panishev S.V., Khosoev D.V., Matveev A.I. Improving the efficiency of development of overburden rocks and coals of the Elga deposit in Yakutia by softening them using surfactants. // Russian Mining Industry. – 2021. (In Russ.) URL: <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-1-00-00>.
17. Ermakov S.A., Il A.P., Khosoev D.V. Assessment of the efficiency of Wirtgen surface miners operation at Elga hard coal deposit // Russian Mining Industry. – 2018. –6. – P. 22-24. (In Russ.) URL: <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2018-6-142-77-79>

УДК 564.8

ТАКСОНОМИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ СПИРИФЕРИД (BRACHIOPODA)

Валерий Баранов, Арсен Николаев

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

TAXONOMICAL SIGNIFICANCE OF MORPHOLOGICAL FEATURES OF SPIRIFERID (BRACHIOPODA)

Valeryi Baranov, Arsen Nikolaev

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

Annotation. The morphology of the external and internal structure of spiriferid shells was studied. This made it possible to rank such characters as the shape of the shell, umbo, auricles, ventral and dorsal areas, deltidium, the nature of the ribbing of the sinus and lateral slopes, microsculpture, and the hinge articulation.

1. Введение

Таксономическое значение морфологических признаков спириферид рассматривается в публикациях отечественных геологов [1, 2, 3, 4]. Важное значение придается элементам внешнего и внутреннего строения раковин спириферид. Авторы ранжировали значение внешних и внутренних признаков для построения объективной систематики спириферид.

2. Внешнее и внутреннее строение

Раковины спириферид характеризуются двояковыпуклой раковиной со строфическим типом роста. Раковины различаются по размеру: очень мелкие от 5 мм и меньше, мелкие от 5 до 20 мм, средние – от 20 до 30 мм, крупные – от 30 до 50 мм и очень крупные – от 50 мм и больше. Размеры раковин имеют видовое и родовое значение. Наблюдаются все вариации раковин от гладких, слабо ребристых или слабоскладчатых до ребристых. Раковины спириферид представлены двумя створками: брюшной и спинной. Плоскость симметрии у них, в отличие от двустворчатых моллюсков, проходит вдоль раковины от макушки к переднему краю. Вздутость раковины может быть различной: слабовыпуклой, выпуклой и сильновыпуклой. В онтогенезе выпуклость раковины, как правило, варьирует от слабовыпуклой до выпуклой или сильновыпуклой. Форма раковины взрослых форм является видовой или подвидовой категорией. Она может быть овально-поперечно вытянутой, треугольной, округло-треугольной, округло-пятиугольной, квадратной и трапецеидальной. Форма раковины является видовым или родовым признаком (рис. 1, 2).

Фиг. 1-2- *Calceolospirifer frequens* Avdeeva et Baranov, 1995: 1 -лекготип № 198/1 (x7): 1а - брюшная створка, 1б-спинная створка, 1в - вид сбоку, 1г - вид сзади, 2 - экз. № 198/2, внутреннее строение брюшной створки (x 16), хр. Тас-Хаяхта, правый борт р. Датна-2, эмсский ярус, геремганджинский горизонт; **фиг. 3-4** - *Mariyaspiriferella sibirica sibirica* Baranov et Blodgett, 2015: 3а - брюшная створка (x2,2), 3б - спинная створка, 3в - вид сбоку, 3г - вид спереди, 3д - вид сзади, 3е - микроскульптура (x 8,2), 4 - экз. № 198/32 (x2,5): 4а - брюшная створка, 4б - спинная створка 4в - вид сзади, 4г - вид сбоку, 4д - вид спереди, Селенггяхский кряж, правобережье р. Талынджи; руч. Кривой; пражский ярус, короткинский горизонт; **фиг. 5-11** - *Mariyaspiriferella impressio* (Perry, 1984): 5-экз. № 198/41 (x4): 5а - брюшная створка, 5б - спинная

створка, 5в – микроскульптура (x10), 6-вид сзади, экз. № 198/42 (x4), 7 - строение спондилиума экз. № 198/43 (x6), 8 - внутреннее строение спинной створки, экз. № 198/44 (x6), Селеняхский кряж, правобережье р. Талынджа, руч. Кривой, эмский ярус, николаевский горизонт, 9 - внутреннее строение спинной створки, экз. № 198/44 (x12), правый борт р. Кольма, эмский ярус, николаевский горизонт, 10 - экз. № 198/45 (x2): 10а - брюшная створка, 10б-спинная створка, 10в-вид сбоку, 10г-вид спереди, 11 - экз. № 198/46 (x2): 11а-брюшная створка, 11б - спинная створка, 11в - вид сбоку, 11г - вид спереди; хр. Сетте-Дабан, правобережье р. Восточная Хандыга, левый борт руч. Тихого, эмский ярус, николаевский горизонт.

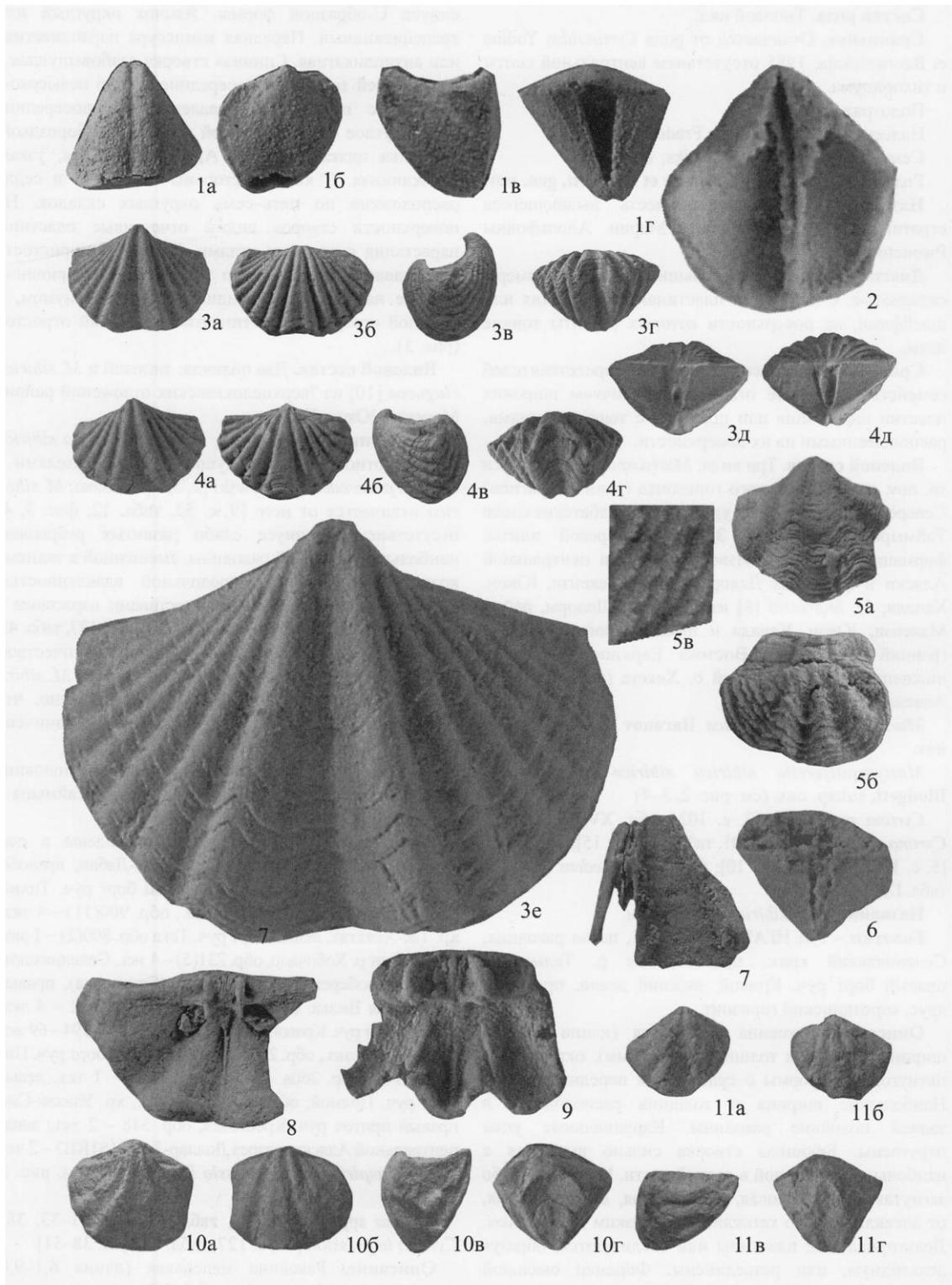


Рисунок 1 – Морфология элементов внешнего и внутреннего строения раковин раннедевонских представителей отряда Spiriferida [5]

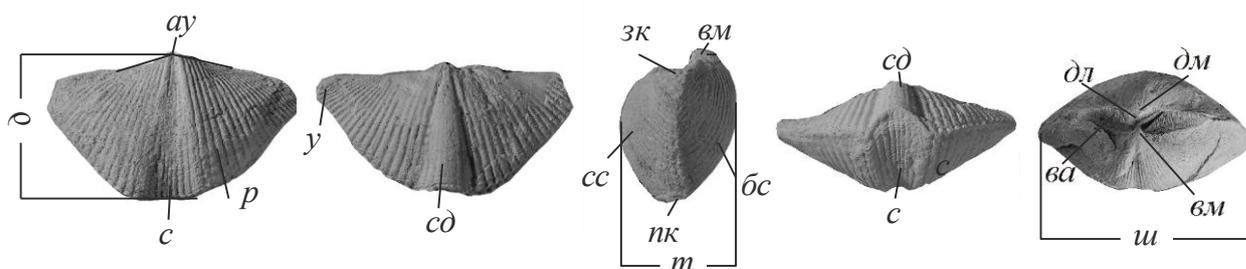


Рисунок 2 – Параметры и элементы строения раковин спириферид: *ay* – апикальный угол, *ва* – вентральная арка, *д* – длина, *дм* – дорсальная макушка, *вм* – вентральная макушка, *зк* – задний край, *нк* – передний край, *p* – ребра, *с* – синус, *сд* – седло, *сс* – спинная створка, *т* – толщина, *у* – ушки, *ш* – ширина.

В строении брюшной створки анализируются следующие элементы внешнего строения: макушка, форамен, дельтирий и его покровы, арка, ушки, синус и форма его дна, наличие или отсутствие в нем ребристости, форма боковых ребер и межреберных промежутков. Макушка брюшной створки расположена в апикальной части и может быть торчащей, слабо- или сильнозагнутой, иногда налегающей на спинную створку. Макушка заканчивается клювом. Под макушкой расположено треугольное отверстие, которое называется дельтирием. Он может быть открытым, полуоткрытым или закрытым. Очень часто по его краям формируются дельтидиальные пластины, соединяясь они образуют дельтидий, при наличии шва их относят к соединенным, при его отсутствии – к сросшимся. Форамен относительно дельтирия может занимать различное положение, на этом основании выделяется несколько его типов (рис. 4). Вентральная и дорсальная арки – это площадки на заднем конце раковины, служившие ей опорой. Вентральная арка имеет различную ширину, ее форма в пределах вида и рода сохраняется, что служит дополнительным диагностическим признаком. На поверхности арки наблюдаются продольная или вертикальная штриховка. Дорсальная арка узкая, вертикальная, иногда в вершине нототирия она закрывается пластиной – хилидием. Систематического значения дорсальная арка не имеет и учитывается только в диагнозе отряда.

Макро- и микроскульптура имеют важное значение в систематике спириферид. Макроскульптура представлена радиальными ребрами или складками и концентрическими линиями или пластинами нарастания. Ребра и складки отличаются размерами, первые – тонкие, в образовании которых принимают участие первый и второй слои раковины, а вторые – крупные и формируются тремя слоями раковины. Ребра могут быть простыми, дихотомирующими и интеркалирующими. В синусе и на седле они отличаются по толщине, форме и характеру ветвления от боковых ребер. Эволюция ребер и складок в онтогенезе, особенно, в синусе является признаком родового, подсемейственного и семейственного рангов. Концентрическая скульптура обусловлена особенностями роста раковины в онтогенезе. Выделяют концентрические линии и пластины нарастания. Образование концентрических линий нарастания связывают с суточным приростом раковинного вещества, а формирование пластин нарастания – с ритмичностью физиологических процессов, происходящих в организме. [3] Данные признаки используются в ранге родовых. Основными типами микроскульптуры являются струйчатая и игольчатая, которые характеризуют крупные таксономические категории. Важную роль особенность микроскульптуры играет при диагностике родов. Н.В. Оленева [7] отмечает, что микроскульптура является надежным признаком для родовой диагностики спириферид, но при этом необходимо учитывать сохранность первого от поверхности слоя раковины.

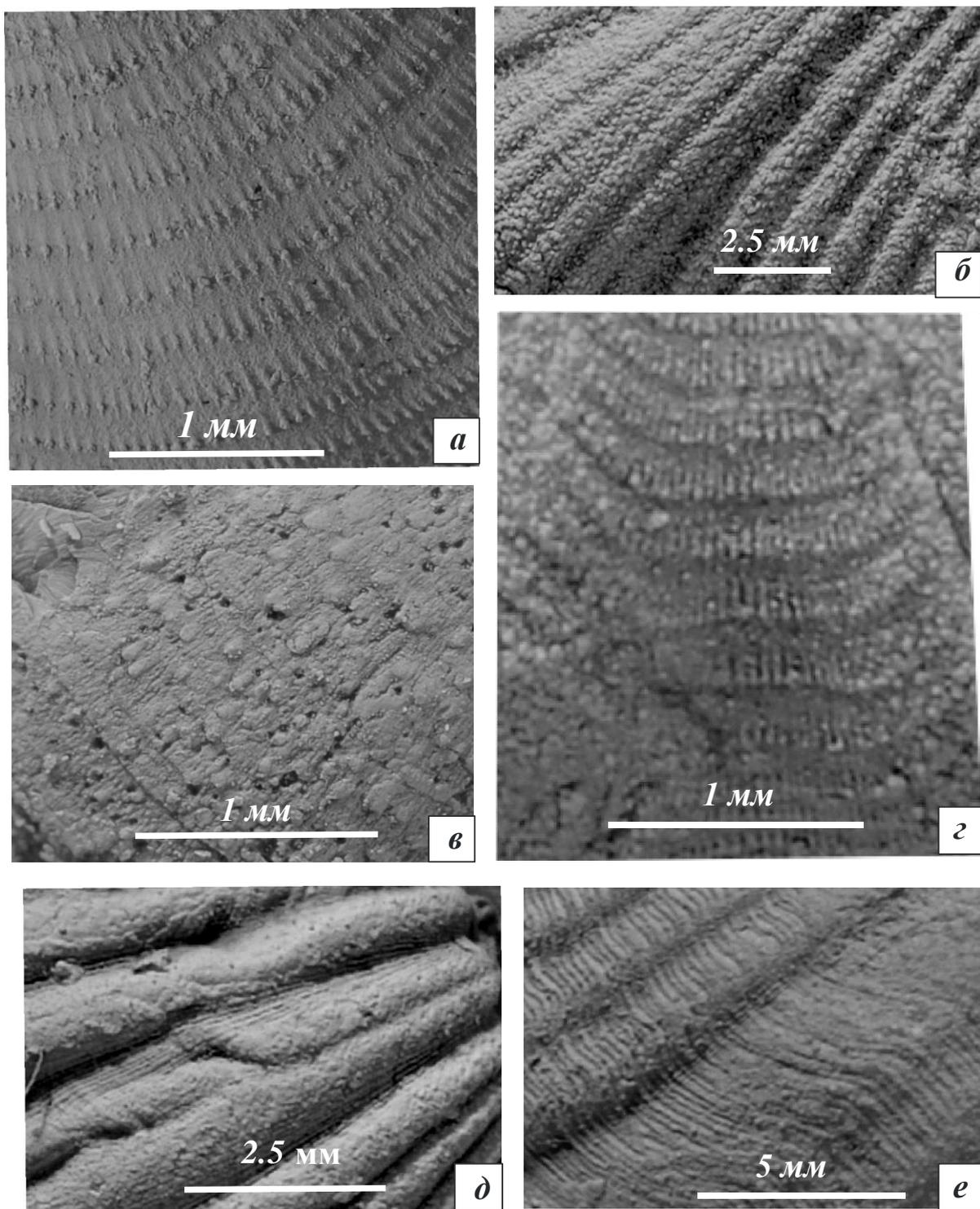


Рисунок 3 – Типы микроскульптуры подсемейств спириферид: *а* – двуствольные иглы на концах пластин нарастания (Martinothyridae), *б* – папиллы на поверхности ребер и в межреберных промежутках (Spiriferinae), *в* – папиллы (Rhychospiriferinae), *г* – одноствольные иглы на поверхности пластин нарастания (Howellellinae), *д* – струйчатая микроскульптура (Strophopleurinae), *е* – концентрические пластины нарастания (Strophopleurinae).

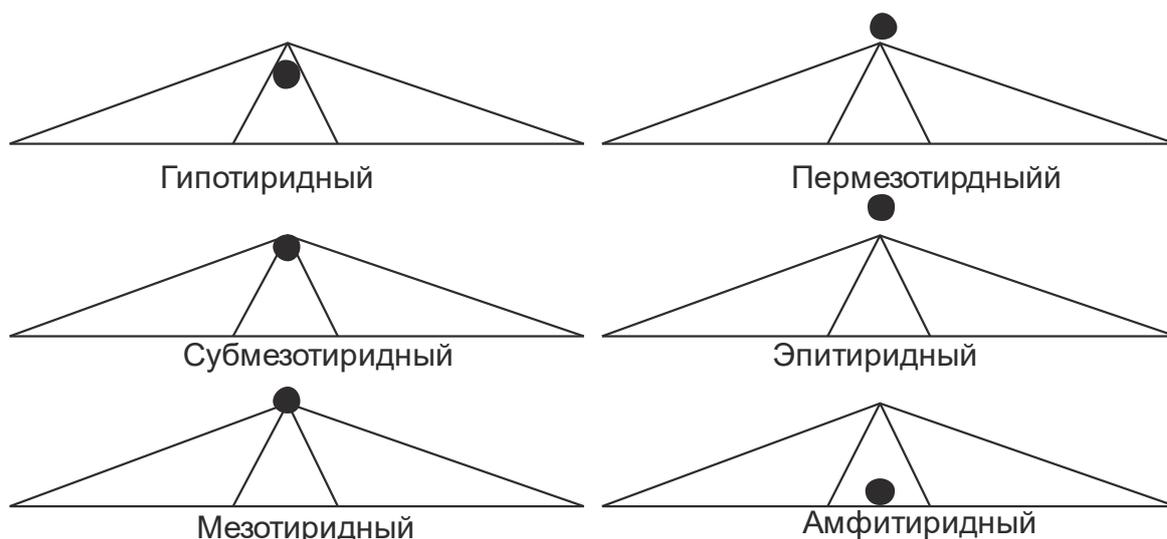


Рисунок 4 – Тип форамена в зависимости от расположения относительно дельтирия [6].

Сочленение створок у спириферид осуществлялось при помощи замочного аппарата, который состоял из зубов и зубных ямок. Зубы представляли выросты, расположенные по краям дельтирия в брюшной створке, которые входили в зубные ямки на противоположной спинной створке, располагающиеся по краям ареи параллельно нототириуму. Дополнительными элементами, которые служили для укрепления замочного сочленения были внешние и внутренние приямочные ребра. В апикальной части раковины расположены зубные пластины. Они состоят из админикул и дельтидиальных килей. Админикулы опираются на дельтидиальные кили и их рост начинается со дна створки. Они могут быть свободными, но чаще сливаются с макушечным утолщением, заполняющим боковые полости. Форма и особенности строения зубов, зубных ямок и замочных пластин могут служить видовым и родовым признаком.

3. Благодарности

Исследования проведены в соответствии с планом НИР ИГАБМ СО РАН и профинансированы Минобрнаукой.

4. Литература

- [1] Sidyachenko A.I. Spiriferids and stratigraphy of the Famennian deposits of central and south-eastern Karatau. – Moscow. Publishing House of the Academy of Sciences, 1962. – 152 p.
- [2] Pavlova E.E. Development of brachiopods of the family Reticulariidae, Proceedings of the Paleontological Institute. – Moscow: Nauka, 1969. – Vol. 120. – P. 1-128.
- [3] Ivanova E.A. Introduction to the study of spiriferids (Comparative morphology). Proceedings of the Paleontological Institute. – Moscow: Nauka, 1971. – Vol. 126. – 104 p.
- [4] Ivanova E.A. The main regularities of the evolution of spiriferids // Paleontological Journal. – 1972. – №. 3. – P. 28-42.
- [5] Baranov V.V., Blodgett R.B. Early Devonian spiriferids of the North-East of Eurasia and North America // Otechestvennaya geologiya. – 2015. – №. 5. – P. 77-82.
- [6] Paleontological Dictionary. Academy of Sciences of the USSR. Paleontological Institute. Edited by G.A. Beznosova and F.A. Zhuravleva. – Moscow: Nauka, 1965. – 615 p.
- [7] Oleneva N.V. Devonian Brachiopods of the Orders Spiriferida and Spiriferinida of the European Russia and Transcaucasia: Systematics, Shell Microstructure, and Microornament // Paleontological Journal. – 2016. – Vol. 50. – № 11. – P. 1207-1296.

УСЛОВИЯ МЕТАМОРФИЗМА ПОРОД ХАТЫМИНСКОГО КОМПЛЕКСА В АМГИНСКОЙ ЗОНЕ ТЕКТОНИЧЕСКОГО МЕЛАНЖА АЛДАНО-СТАНОВОГО ЩИТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПЕТРОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Николай Бондарь^{1,2}, Александр Кравченко¹

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

CONDITIONS OF METAMORPHISM OF ROCKS OF THE KHATYMINSKY COMPLEX IN THE AMGINSKY TECTONIC MELANGE ZONE OF THE ALDAN-STANOVY SHIELD ACCORDING TO THE RESULTS OF PETROGRAPHIC STUDIES

Nikolay Bondar^{1,2}, Aleksandr Kravchenko¹

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

Annotation. The study of metamorphism conditions is relevant to the reconstruction of migration processes of the matter, including fluids transporting various chemical elements. In metamorphic complexes, fluids as a rule circulate in tectonic zones, along which there is a complete or partial replacement of early high-temperature mineral parageneses by late low-temperature ones - the process of diaphoresis. Such a process widely occurs in the Amga tectonic melange zone of the Aldan-Stanovoy shield, where diffuorinated poorly studied dikes of the Khatyminsky complex are developed. The goal of the research was to study the conditions of metamorphism and the influence of host rocks on the features of mineral composition of the Khatyminsky complex dikes. Petrographic studies were carried out and mineral associations were identified. The associations correspond to amphibolite and epidote-amphibolite facies of metamorphism. The differences in the mineral composition of the rocks of the Khatyminsky complex at various sites are associated with the conditions of metamorphism and the processes of migration of chemical elements from the surrounding crystalline rocks



Рисунок 1 – Обзорная карта-схема местоположение объекта исследований

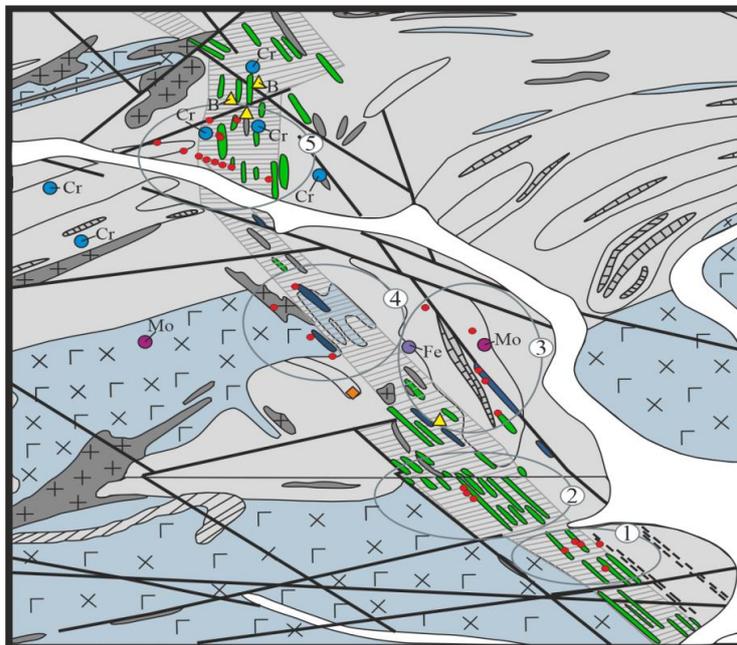
1. Введение

Территория исследований расположена на юге Республики Саха (Якутии) в Нерюнгринском районе (Рисунок 1). Хатыминский комплекс выделен геологами съемщиками Леоновой Ф.Р и Киселевым Г.Н при производстве ГДП-50 [1] в Амгинской зоне тектонического меланжа Алдано-Станового щита [2]. С целью реконструкции условий метаморфизма комплекса нами были выполнены петрографические исследования прозрачных шлифов в количестве 69 шт с использованием поляризационного микроскопа Полам Р-211. В ходе исследований был определен минеральный состав и текстурно-структурные

характеристики. Выполнено сопоставление петрографических характеристик с описанием комплекса и вмещающих пород по данным предшественников рассмотренным ниже.

2. Основной раздел

В пределах изученной площади закартированы породы раннего протерозоя: федоровская толща с пластами карбонатных пород, метагаббро-диориты унгринского комплекса, нерасчлененные граниты и плагииграниты, разломы, катаклазиты и бластомилониты. Хатыминский комплекс



Масштаб 1:50000
Рисунок 2 – Геологическая схема изученной площади с расположением участков исследований, точек наблюдения и выходов пород хатыминского комплекса.

Условные обозначения

| | |
|---|---|
|  | Участки исследований. |
|  | Точки наблюдения. |
|  | Породы федоровской толщи: амфиболовые-плагиигнейсы с биотитом, диопсидом, пироксенами; кристаллосланцы с прослоями диопсидовых, флогопитовых пород и кальцифиров. |
|  | Пласты карбонатных пород федоровской толщи. |
|  | Габбро-диориты унгринского комплекса. |
|  | Нерасчленённые калишпатовые граниты и плагииграниты. |
|  | Дайки хатыминского комплекса, сложенные метадолеритами и пироксеновыми метагорнблендитами |
|  | Разломы |
|  | Катаклазиты и бластокатаклазиты, милониты и бластомилониты. |
|  | Зона диафторических изменений. |
|  | Четвертичные отложения, нерасчлененные. |

Точки минерализации

| | |
|---|------------------|
|  | Точка флогопита. |
|  | Точка бора. |
|  | Точка хрома. |
|  | Точка железа. |
|  | Точка молебдена. |

находится в зоне разломов секущей перечисленные протерозойские породы и состоит из даек метаморфизованных габбро, долеритов и горнблендитов. К зоне разломов приурочена узкая полоса диафторитов наложенных на породы комплекса и вмещающие породы (Рисунок 2). На изученной площади по особенностям геологического строения можно выделить 5 участков. Сходство участков заключается в наличии даек хатыминского комплекса прорывающих федоровскую толщу, а так же зоны диафторических изменений. Имеются некоторые отличия:

На первом участке дайки залегают вблизи катаклазитов, на втором - нерасчлененных гранитов, третьем - пластов карбонатных пород, четвертом - внутри метагаббро-диоритов унгринского комплекса, пятом - вблизи разломов и дайки калишпатовых гранитов.

По данным Д.В Утробина [3], макроскопически породы комплекса темно-серые, темно-зелёные до чёрных, меланократовые с нечётко-сланцеватыми до массивных текстурами и средне-, мелко- или

разнокристаллическими структурами. Наблюдаются реликтовые включения горнблендитов в метагаббро. Минеральный состав довольно изменчив: андезин-лабрадор (5-70%), сине-зелёный амфибол (25-90%), клинопироксен (0-40%), ортопироксен (0-5%), скаполит (0-

50%), биотит (0-5%), кварц (0-3%), акцессорные магнетит (1-10%), ильменит (до 0,6 г/т), турмалин (до 5%), сфен (до 10%), апатит, пирит, пирротин, немного рутила и циркона. По результатам наших исследований среди даек хатыминского комплекса обнаружены метадолериты, кристаллические сланцы и амфиболиты для которых наиболее характерными являются амфибол и плагиоклаз. Характеристики минерального состава пород участков указаны в таблице (Таблица 1).

Таблица 1 – Минеральный состав пород хатыминского комплекса.

| Минералы в % | Участок 1 | Участок 2 | Участок 3 | Участок 4 | Участок 5 |
|-------------------------------|------------------------------------|--------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Метадолериты | | | | | |
| Роговая обманка | 10% | Метадолериты отсутствуют | | | 20-70% |
| Плагиоклаз № 30-60 | 45% | | | | До 25% |
| Скаполит | 5% | | | | До 20%% |
| Клинопироксен | 40% | | | | 0-40% |
| Кварц | Ед.з | | | | Ед.з |
| Кристаллические сланцы | | | | | |
| Роговая обманка | Кристаллические сланцы отсутствуют | 5-40% | 25% | 40% | 30% |
| Плагиоклаз № 30-60 | | 30-45% | 35% | 40-60% | 30% |
| Клинопироксен | | 15-50% | 30% | 0-20% | 25% |
| Кварц | | 0% | 0% | 0% | До 5% |
| Амфиболиты | | | | | |
| Роговая обманка + актинолит | 75-95% | 70-80% | 35-65% | 50-65% | 70-90% |
| Плагиоклаз № 30-60, 0-30 | 0-20% | 0-15% | 10-25% | 20-40% | 10-25 |
| Клинопироксен | До 10% | 0% | 0% | До 10% | До 10% |
| Кварц | 0% | 0% | До 5% | 0% | До 5% |
| Сфен | 0% | 0% | До 5% | До 5% | 0% |
| Эпидот | 0% | 5% | 10-25% | Ед.з | 0% |
| Биотит | 0% | 0% | 0-15% | 0% | 0% |

На первом и пятом участке обнаружены метадолериты с реликтами офитовой структуры. Метадолериты представлены темноцветными, крупно- среднекристаллическими породами с массивной текстурой. Реликты офитовой структуры представлены идиоморфными кристаллами плагиоклаза и ксеноморфными кристаллами клинопироксена заполнившего пространство между плагиоклазом. Исходные минералы были подвержены постмагматическим изменениям. Кристаллы плагиоклаза подвержены скаполитизации, а пироксен частично амфиболитизирован. По первично магматической породе развивается вторичная минеральная ассоциация: амфибол + плагиоклаз + скаполит + клинопироксен ± кварц, которая может быть отнесена к амфиболитовой фации метаморфизма [4] (Рисунок 3, А-Г). На первом участке метадолериты сложены плагиоклазом (до 45%), клинопироксеном (до 40%), амфиболом (до 10%) (Рисунок 3 Д, Е). Метадолериты пятого участка в отличии от первого, богаче амфиболом

(от 20 до 70%), имеют схожее количество клинопироксена (до 40%) в котором часто наблюдается замещение амфиболом и содержат плагиоклаз замещаемый скаполитом (25-40%) (Рисунок 3 Ж, З). Кварц в метадолеритах участков встречается в виде единичных зёрен.

На втором, третьем, четвертом и пятом участке обнаружены кристаллические сланцы. Для всех кристаллических сланцев характерны: большое количество роговой обманки, свидетельствующее о принадлежности к роговообманковым сланцам; нематогранобластовая структура, директивные сланцеватая или полосчатая текстура, а так же ассоциация: амфибол + плагиоклаз + пироксен ± кварц (Рисунок 3 И, К) которая свидетельствует о принадлежности пород к амфиболитовой фации [4]. На пятом участке в сланцах амфибол (актинолит, роговая обманка), плагиоклаз (ортоклаз) и клинопироксен (диопсид) наблюдаются примерно в равных количествах, так же наблюдается кварц (до 5%). Кристаллические сланцы второго, третьего и четвертого участков характеризуются неравномерным распределением амфибола, плагиоклаза и клинопироксена. Процентные содержания амфибола составляют от 5% до 40%, плагиоклаза от 30% до 60% и клинопироксена от 0 до 50%. (Таблица 1).

На всех участках обнаружены амфиболиты крупно-, средне-, мелкозернистые, темноцветные. В отличие от сланцев отсутствует ориентировка минералов слагающих породу. Текстура амфиболитов массивная или сланцеватая, структура гомеобластовая или нематобластовая. Главный минерал амфиболитов - роговая обманка, реже встречается актинолит. Другие породообразующие минералы представлены главным образом плагиоклазом и пироксеном. Плагиоклазы в амфиболитах имеют состав от кислых до основных. Петрографические исследования амфиболитов позволили отметить сходства и отличия этих пород по минеральному составу на различных участках. На первом и пятом участках амфиболиты близки по количеству амфибола, пироксена, плагиоклаза, а так же имеют массивную текстуру (не рассланцованы). На втором и четвертом схожи наличием небольшого количества эпидота и сланцеватой текстурой. На третьем участке в отличие от других амфиболитов наблюдается наибольшее количество эпидота, наличие сфена и биотита а так же сланцеватая текстура.

Для первого и пятого участков амфиболиты в большинстве представлены мономинеральными породами. В амфиболитах первого участка наблюдаются крупнокристаллический амфибол (Рисунок 3 Л, М), иногда в ассоциации с плагиоклазом и пироксеном. Для пятого участка минералы схожи с первым участком, за исключением размеров амфибола (Рисунок 3 У, Ф) и наличия кварца (до 5%). В не рассланцованных амфиболитах первого и пятого участка сохранились парагенезисы минералов амфиболитовой фации: амфибол + плагиоклаз + пироксен ± кварц [4].

На втором и четвертом участке в амфиболитах наблюдается меньшее количество амфибола, а так же эпидот (ед.з – 5%) и/или сфен (до 5%) (Рисунок 3 Н, О). На втором участке минеральная ассоциация амфибол (роговая обманка, актинолит) + плагиоклаз (олигоклаз, альбит) + эпидот связывается нами с эпидот-амфиболитовой фацией. Метаморфизм характеризуется средней интенсивностью. На четвертом участке в отличие от второго участка в амфиболитах присутствует пироксен и сфен (Рисунок 3 С, Т). Минеральная ассоциация в амфиболитах четвертого участка: амфибол + плагиоклаз + пироксен + сфен содержит так же редкие единичные зерна эпидота. Наличие актинолита, эпидота, кислых плагиоклазов, позволяет сделать заключение о перекристаллизации в условиях эпидот-амфиболитовой фации [5]. Метаморфизм характеризуется низкой интенсивностью, и сохранением большей части минералов амфиболитовой фации.

На третьем участке помимо перечисленных минералов второго и четвертого участка в составе амфиболитов встречается биотит (до 15%). Биотит не может быть связаны с изохимическим метаморфизмом пород хатыминского комплекса, так как минералы содержащие калий во всех разновидностях пород комплекса не обнаружены. На данном участке наблюдается ассоциация: амфибол (роговая обманка, актинолит) + плагиоклаз (альбит, олигоклаз) + эпидот + биотит + кварц + сфен (Рисунок 3 П, Р) которая может быть связана с регрессивным метаморфизмом эпидот-амфиболитовой фации [6]. Метаморфизм характеризуется наибольшей интенсивностью преобразований.

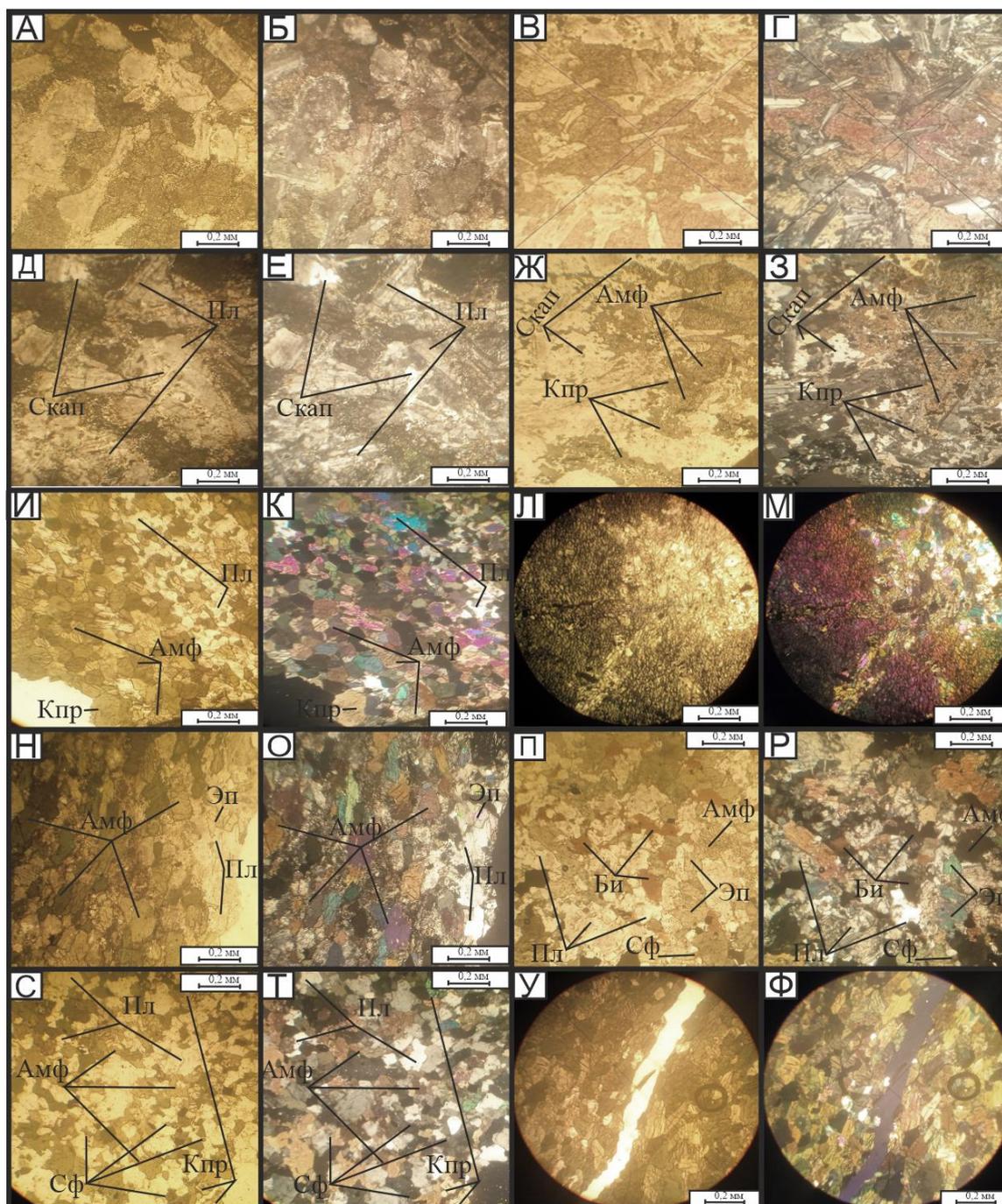


Рисунок 3 – Фото шлифов иллюстрирующие минеральные ассоциации в породах хатыминского комплекса.

А, Б – метадолерит первого участка с офитовой структурой (образец №37, для фото А николи параллельны, фото Б николи скрещены); В, Г – метадолерит пятого участка (образец №56, для фото В николи параллельны, фото Г николи скрещены); Д, Е - метадолерит первого участка с замещением плагиоклаза скаполитом (образец №37, для фото Д николи параллельны, фото Е николи скрещены); Ж, З – метадолерит пятого участка с офитовой структурой и замещением пироксена амфиболом (образец №56, для фото Ж николи параллельны, фото З николи скрещены); И, К ассоциация: амфибол + плагиоклаз + пироксен в кристаллических сланцах (образец №80, для фото И николи параллельны, фото К николи скрещены); Л, М - крупнокристаллический амфиболит первого участка (образец №22, для фото Л николи параллельны, фото М николи скрещены); Н, О – ассоциация: амфибол + плагиоклаз + эпидот в амфиболите второго участка (образец №72, для фото Н николи параллельны, фото О николи скрещены); П, Р – ассоциация: амфибол + плагиоклаз + эпидот + биотит + кварц + сфен в амфиболите третьего участка (образец №11, для фото П николи параллельны, фото Р николи скрещены); С, Т – ассоциация: амфибол + плагиоклаз + пироксен + сфен в амфиболите четвертого участка (образец №86, для фото С николи параллельны, фото Т николи скрещены); У, Ф – мелкокристаллический амфиболит пятого участка (образец №68, для фото У николи параллельны, фото Ф николи скрещены).

3. Заключение

Из выше сказанного можно сделать вывод, что породы хатыминского комплекса, вероятно, были метаморфизованы в условиях регионального метаморфизма амфиболитовой фации. Позже произошёл локальный метаморфизм низких ступеней: эпидот-амфиболитовой и зеленосланцевой фации – диафторез вдоль зоны разломов. Процессы диафтореза более интенсивно проявлены на участках расланцевания и вблизи тела карбонатных пород (участки под номером два, три и четыре). Для амфиболитов хатыминского комплекса перечисленных участков характерно наличие эпидота и сфена. Отмечена миграция калия выраженная в появлении биотита. Дайки пород хатыминского комплекса на этих участках могут представлять интерес в отношении метаморфогенно-гидротермальной рудной минерализации. На удаленных от карбонатного тела первом и пятом участках признаки диафтореза менее проявлены и наблюдается наибольшая сохранность протолитов пород хатыминского комплекса. На этих участках обнаружены метадолериты, которые могут быть использованы для реконструкции магматических событий и определения первичной металлогенической специализации пород хатыминского комплекса.

Работа выполнена в рамках проекта № 0381-2019-0003 государственного задания Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН.

4. Литература

- [1] Leonova F.R. New data on the stratigraphy of the Archaea of the Des-Savgel-Khatyminsky interfluvium of the Aldan Shield // Geology and geochemistry of ore-bearing igneous and metasomatic formations of the small BAM. – Yakutsk: Publishing House of the JF NB of the USSR Academy of Sciences, 1986. – P. 143-148.
- [2] Tectonics, geodynamics and metallogeny of the Sakha Republic (Yakutia). – M: MAIK "Nauka Anterperiodica", 2001. – 571 p
- [3] Utrobin D.V., Report on the results of GMM-200 on Des-Khatyminskaya Square (sheets O-51-XXIII, -XXIV) for 2005-2008
- [4] Howel Williams, Francis J. Turner and Charles M. Gilbert Petrography an introduction to the study of rocks in thin sections San Francisco, 1957. – 425 p.
- [5] Facies metamorphism / N. L. Dobretsov, V. V. Reverdatto, V. S. Sobolev [etc.]; under scientific. red. V. S. Soboleva. – Moscow: Nedra, 1970. – 432 p.
- [6] Fyfe W.S, Turner F.J and Verhoogen. J. Metamorphic reactions and metamorphic facies Baltimore. – 1959. – 414 p.

**НОВЫЕ ДАННЫЕ О ТЕКТОНИЧЕСКОМ СТРОЕНИИ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ
ХАРАУЛАХСКОГО СЕГМЕНТА ВЕРХОЯНСКОГО СКЛАДЧАТО-
НАДВИГОВОГО ПОЯСА**

Дмитрий Васильев¹, Андрей Прокопьев¹, Виктория Ершова^{2,3}

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

2 Институт наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета, 199034,
Россия, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная д.7–9

3 ФГБУН «Геологический институт РАН», 119017, Россия, г. Москва, Пыжёвский пер., 7

**NEW DATA ON THE TECTONIC STRUCTURE OF THE NORTHERN PART OF
THE KHARAUAKH SEGMENT OF THE VERKHOYANSK FOLD-THRUST BELT**

Dmitry Vasiliev¹, Andrei Prokopiev¹, Victoria Ershova²

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

2 Institute of Earth Sciences, St. Petersburg state university, 7–9, Universitetskaya embankment, St
Petersburg, 199034, Russia

3 Geological Institute of RAS, 7, Pyzhevsky lane, Moscow, 119017, Russia

Annotation. In the northern part of the Kharaulakh segment of the Verkhoysk fold-thrust belt, two deformation stages are confidently established. A single structural paragenesis that combines folds, cleavage of the axial surface, thrusts, reverse faults and strike-slip faults is associated with the main fold-thrust stage and was formed in a single stress field during the formation of the Bykovsky anticlinorium and the Central Kharaulakh synclinorium. Some low-amplitude faults can be attributed to the same paragenesis. Some low-amplitude and almost all large faults formed later than the main fold-thrust stage. These deformations are superimposed on the early thrust deformations and were not accompanied by folding. The nature of the identified cleavage in the area of the Bykovskaya channel, which is oriented discordantly to the main folding of the region, is not clear. Its formation may be associated with strike-slip faults. Thermochronological ages (apatites fission track dating and (U-Th)/He method for zircons) suggest the onset of fold-thrust deformations and associated tectonic uplift at 144–92 Ma and their completion at 77–57 Ma. Subsequent extension, which began in the Paleogene and is a reflection of rifting in the area of the continental continuation of the Gakkel spreading center, led to the formation of normal faults and Cenozoic depressions.

1. Введение

Исследования проводились в Хараулахском сегменте Западно-Верхоянского сектора Верхоянского складчато-надвигового пояса [1–4] в устьевой части р. Лены. Хараулахский сегмент на изученной территории представлен двумя главными структурами – Быковским антиклинорием и Центрально-Хараулахским синклинорием, в пределах которых вскрыты деформированные карбонатные и обломочные палеозойские и мезозойские породы. Более молодыми, наложенными структурами, являются грабены, выполненные палеогеновыми терригенными отложениями. Эти толщи имеют сравнительно крутые углы залегания, что свидетельствует об относительно интенсивных тектонических подвижках в постраннепалеогеновое время. В дельте р. Лены в субмеридиональной Сардахской мульде вскрываются практически недеформированные позднеогеновые галечники и конгломераты. Задачей проведенных исследований являлось установление структурных парагенезов, последовательности и возраста деформационных событий.

2. Складчатые структуры

В Быковском антиклинория вскрыты толщи карбонатно-терригенных пород девонско-каменноугольного возраста [4]. Среднедевонские карбонаты предположительно согласно перекрыты карбонатными отложениями франского яруса верхнего девона. Выше с небольшим размывом, наблюдаемым нами на о. Столб в дельте р. Лены, залегают породы фамена. На отложениях фаменского яруса согласно залегает толща турнейских известняков, которая с несогласием перекрыта преимущественно терригенными породами атырдахской свиты визейского яруса («крестяхские» конгломераты). Выше по разрезу согласно залегает алевролито-сланцевая тиксинская свита ранне-среднекаменноугольного возраста, сменяемая выше по разрезу терригенной тугасирской свитой средне-верхнекаменноугольного, верхоянской и хараулахской свитами пермского возраста, которые слагают Центрально-Хараулахский синклиний.

Породы Быковского антиклинория слагают ограниченные разломами блоки. Среди изученных складок более крупного порядка преобладают асимметричные, реже встречаются симметричные и лежащие. У асимметричных складок осевые поверхности наклонены в разные стороны, но незначительно преобладает южное направление, а на побережье Быковской протоки дельты р. Лены, у северного подножия г. Крест-Хомо-Хаята – северо-западное. Симметричные складки в основном представлены синклиналями, антиклинами редки. Складки линейные, их замки обычно округлые. По соотношению мощностей на крыльях и в замках складок они являются концентрическими. По ориентировке шарниров значительно преобладают цилиндрические складки с субгоризонтальным шарниром. Реже встречаются конические складки со слабонаклонными (до 30°) на север, реже на юг шарнирами. Ширина наблюдаемых в обнажениях складок варьирует от 20 до 90 м. Иногда встречаются складки шириной менее 5–7 м. Лежащие складки наблюдались на мысе Крест-Тумса Быковской протоки дельты р. Лены и северном подножии г. Крест-Хомо-Хаята. Они в основном мелкомасштабные шириной в первые метры. На мысе Крест-Тумса присутствуют небольшие изоклиналильные складки, связанные с межслоевыми надвиговыми срывами. Простирающиеся складчатых структур в основном северо-западное ($127\text{--}132^\circ$), рассчитанная ось погружается на юго-восток под $\angle 9\text{--}21^\circ$. На о. Столб простирающиеся структур изменяется на субширотное ($274^\circ \angle 0,5^\circ$), а в обнажениях между полярной станцией «Сокол» и мысом Бояринцева оно субдолготное ($169^\circ \angle 1^\circ$). Оси складок субгоризонтальные. Для деформированных пород франского возраста в северном подножии г. Крест-Хомо-Хаята полюса слоистости на стереограммах образуют две разноориентированные группы – субдолготную и субширотную, что, видимо, свидетельствует о наложении двух этапов деформаций. Несколько иное положение рассчитанной оси складок возле полярной станции «Сокол» вполне вероятно связано с блоковым строением антиклинория и небольшим разворотом его по серии разломов.

Часто встречаются подводно-оползневые складки шириной до первых метров в основном в атырдахской и тиксинской свитах ранне и средне каменноугольного возраста. По форме они сжатые, преобладают лежащие и опрокинутые складки. Рассчитанная ось замеренных подводно-оползневых складок имеет субгоризонтальное ($\angle 8^\circ$) падение и северо-восточное (аз. пад. 42°) простирающиеся.

Центрально-Хараулахский синклиний шириной 30 км расположен к юго-западу от Быковского антиклинория. Складчатые структуры синклиория более сжатые; преобладают опрокинутые на юго-запад линейные складки. По форме замка складки преимущественно округлые, крайне редко встречаются острые. По соотношению мощностей на крыльях и замках складки концентрические. Встречаются как конические, так и цилиндрические складки при небольшом преобладании первых. Шарниры конических складок как правило слабонаклонные, погружающиеся преимущественно на юго-восток, более редко на северо-запад под углами от 15° до 40° ; шарниры цилиндрических складок субгоризонтальные. По углу между крыльями складки в основном закрытые и сжатые. Значительно более редко встречаются как открытые и пологие, так и изоклиналильные складки. Их ширина меняется в широких пределах от первых до

100–120 м. Рассчитанная ось складок под небольшим углом ($\angle 11^\circ$) наклонена на юго-восток (аз. пад. 136°), что согласуется с ориентировкой основных складчатых структур Быковского антиклинория.

3. Кливаж и разрывные нарушения

Кливаж на изучаемой территории проявлен весьма неравномерно. На севере Центрально-Хараулахского синклинория в пермских толщах трещинный кливаж практически отсутствует. Редко наблюдается выдержанная субпараллельная тектоническая трещиноватость, которую условно можно принять за самую начальную стадию образования кливажа. Наиболее интенсивный трещинный кливаж проявляется в преимущественно сланцевых каменноугольных толщах. В карбонатных породах он чаще всего отсутствует, т.е. кливаж имеет четкий литологический контроль. Кливаж сланцеватости интенсивно проявлен в аргиллитах вне зависимости от возраста толщ, но, как правило, практически не затрагивает более компетентные песчаниковые породы, образуя рефракционные структуры и является непроницающим. Часто в обнажениях плоскости кливажа смещены различными типами разломов.

В каменноугольных толщах северного крыла Центрально-Хараулахского синклинория разница между ориентировкой рассчитанной осевой плоскости складок и замеренными кливажными поверхностями составляет небольшую величину (около 20°), что позволяет относить кливаж к кливажу осевой плоскости. Простираение кливажа выдержанное субдолготное. В аргиллитах кливаж проникающий, гладкий (совершенный), сплошной, параллельный. В пластах более крупнозернистых пород наблюдается рефракция кливажа. Часто мощные пласты песчаников не затронуты кливажем, в тонких пластах наблюдается редкая серия трещин, субпараллельных кливажу. В аргиллитах и мелкозернистых алевролитах в пределах одного обнажения часто наблюдается «карандашная» отдельность.

На юге в осевой части синклинория интенсивный кливаж проникающий и ассоциирует с опрокинутыми на юго-запад складками, в которые смяты пермские породы.

В Быковском антиклинории трещинный кливаж параллельного сплошного типа в мелкозернистых терригенных толщах распространен широко. Но в отдельных крупных обнажениях аналогичных по составу толщ трещинный кливаж отсутствует. Причина подобной дискретности неясна. Несмотря на широкое распространение параллельного сплошного кливажа на территории антиклинория другие его типы также встречаются часто. Так местами присутствует редкий и грубый трещинный кливаж; отчетливо наблюдаются относительно крупные от первых до десятков сантиметров мощностью микролитоны. Такой кливаж по структурному рисунку относится к ветвящемуся типу. В девонских толщах трещинный кливаж относительно редкий и дискретный.

Простираение трещинного кливажа в Быковском антиклинории имеет три ориентировки – северо-восточную, северо-западную и субдолготную. У г. Крест-Хомо-Хаята простираение кливажа выдержанное субдолготное. В обнажениях приустьевой части р. Лены кливаж имеет в основном северо-восточное простираение, реже встречается северо-западного и еще реже субдолготного простираения. Кливаж северо-восточного простираения можно считать кливажем поперечным к осевым плоскостям складок, а северо-западного – кливажем осевой плоскости. Кливаж субдолготного простираения, видимо, не связан с основной складчатостью. На мысе Крест-Тумса сделаны единичные замеры кливажа, ориентированного параллельно осевым плоскостям складок; большая же часть кливажа ориентирована поперек складчатости. Преобладающее большинство плоскостей кливажа возле полярной станции «Сокол» имеет субдолготное простираение субпараллельно осевым плоскостям складок; редко встречаются плоскости северо-западного простираения, которые, по всей вероятности, не связаны с основной складчатостью. Таким образом, здесь проявлен кливаж разного морфологического типа и, возможно, разной генерации.

Разломы на изученной территории широко распространены. В морфологическом отношении они представлены практически всеми известными типами. Надвиги и взбросы являются наиболее распространенными в Центрально-Хараулахском синклинории, а в Быковском антиклинории преобладают в основном сбросы. Надвиги, как правило, секут под острым углом пласты песчаников, а местами, преимущественно в аргиллитах и алевролитах, переходят в субпараллельные слоистости межслоевые срывы. Также в обнажениях наблюдались переходы по восстанию пологих надвигов в крутопадающие взбросы, которые также широко распространены. Простираение надвиговых структур в среднем северо-западное, реже встречаются надвиги северо-восточного простираения. В Быковском антиклинории надвиги отличаются меньшей амплитудой, варьирующей от нескольких сантиметров до нескольких дециметров, редко до первых метров. Их вергентность преимущественно юго-западная. В Центрально-Хараулахском синклинории пологие надвиги иногда ассоциируют со складками разнообразных форм, а трассирующийся по глинистым породам сместитель практически незаметен. В синклинории амплитуды смещений по взбросам и надвигам колеблются от нескольких десятков сантиметров до нескольких метров, значительно реже десятков метров. Здесь преобладающей вергентности нет; широко распространено падение сместителей как на северо-восток, так и на юго-запад.

Сдвиги малоамплитудны и парагенетически связаны с надвигами и взбросами, значительно реже со сбросами. В Быковском антиклинории равнозначно встречаются как левые, так и правые сдвиги. В направлении с севера на юг увеличивается количество левосторонних сдвигов. В Центрально-Хараулахском синклинории левые сдвиги преобладают. Если на севере изученной территории простираение сдвигов, в целом, северо-западное и северо-восточное, то на юге в основном преобладает северо-восточное, значительно реже северо-западное, у левых сдвигов – субдолготное простираения.

Сбросы являются наиболее распространенным типом разломов в Быковском антиклинории по сравнению с Центрально-Хараулахским синклинорием. Амплитуды смещений по сбросам на севере антиклинория колеблются от нескольких сантиметров до нескольких десятков метров, а на юге достигают нескольких метров. В антиклинории можно выделить два типа сбросов: постскладчатые секущие надвиговые структуры и постепенно выполаживающиеся и переходящие в межслоевые листрические срывы.

4. Возраст деформаций.

Возраст деформаций до сих пор остается дискуссионным, хотя многие исследователи предполагают, что он позднемеловой [1–4]. Проведенное нами трековое датирование апатитов фиксирует наиболее уверенно термотектоническое событие 95–57 млн лет назад. Наиболее представительные образцы имеют трековый возраст 74–61 млн лет. Нами предполагается, что этот временной промежуток соответствует времени заключительной стадии формирования фронта северной части Хараулаха [5]. (U-Th)/He изотопным методом низкотемпературной термохронологии в геохронологическом центре UTChron Департамента наук о Земле Техасского университета в Остине, США были продатированы обломочные цирконы (ZHe) из каменноугольных и пермских песчаников южной части Центрально-Хараулахского синклинория и Быковского антиклинория. Полученные ZHe возраста показывают две группы разных значений. В Центрально-Хараулахском синклинории для пород нижнего триаса получены возраста от 337 до 227 млн лет. Эти возраста древнее времени осадконакопления вмещающих пород (цирконы повторно не нагревались выше 200°C), и отражают время тектонического подъема (экзгумации) источников сноса обломочного материала. Вторая группа возрастов, полученных для каменноугольно-пермских толщ юга Центрально-Хараулахского синклинория и Быковского антиклинория, варьирует от 144 до 92 млн лет, что, вероятно, характеризует либо более раннюю стадию формирования складчато-надвиговых деформаций, либо указывает на более раннее начало этих событий в тыловой части зоны флоранда и связанного с ними тектонического подъема с глубин порядка 5–6 км.

5. Выводы

1) В северной части Хараулахского сегмента Верхоянского складчато-надвигового пояса уверенно установлены два деформационных этапа. Единый структурный парагенез, объединяющий складки, кливаж осевой поверхности, надвиги, взбросы и сдвиги связан с основным складчато-надвиговым этапом и образовался в едином поле напряжений при формировании Быковского антиклинория и Центрально-Хараулахского синклинория. К этому же парагенезу можно отнести некоторые малоамплитудные сбросы. Некоторые малоамплитудные и практически все крупные сбросы сформировались позже основного складчато-надвигового этапа. Эти деформации наложены на ранние надвиговые и не сопровождались складчатостью.

2) Природа выявленного кливажа в Быковском антиклинории, ориентированного дискордантно к основной складчатости региона, не ясна. Его образование может быть связано со сдвиговыми перемещениями.

3) Установленные термохронологические возраста (трековое датирование апатитов и (U-Th)/He метод по цирконам) позволяют предполагать начало складчато-надвиговых деформаций и связанного с ними тектонического подъема 144–92 млн лет и их завершение 74–57 млн лет назад. Последующее растяжение, начавшееся в палеогене и являющееся отражением рифтогенеза в области континентального продолжения спредингового хребта Гаккеля, привело к образованию сбросов и кайнозойских впадин.

6. Благодарности

Исследование выполнено по плану НИР ИГАБМ СО РАН (проект 0381-2019-0001), при поддержке грантов РФФИ № 20-17-00169 и РФФИ № 14-05-31298.

7. Литература

- [1] Prokopyev, A.V. and Deykunenko, A.V. Deformation structures of fold-thrust belts // *Tectonics, geodynamics and metallogeny of the territory of the Republic of Sakha (Yakutia)* / Edited by L.M. Parfenov, M.I. Kuzmin. – Moscow: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. – P. 156-198. (in Russian).
- [2] Bidjiev, R.A., Gorshkova, E.R. and Leonov, B.N. State geological map of the USSR scale 1:200 000. Verkhoyanskaya series. Sheet R-52-III, IV. Explanatory note. – Moscow, 1979. – 71 p. (in Russian).
- [3] Gogina, N.I. and Groshin, S.I. State geological map of the USSR scale 1:200 000. Nijnelenskaya series. Sheet R-52-I, II. Explanatory note. – Moscow, 1976. – 82 p. (in Russian).
- [4] Gogina, N.I. State geological map of the USSR scale 1:200 000. Nijnelenskaya series. Sheet S-52-XXXI, XXXII. Explanatory note. – Moscow, 1979. – 89 p. (in Russian).
- [5] Vasiliev, D.A., Prokopyev, 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. – P. 49-66. (in Russian).

**СХЕМЫ КОРРЕЛЯЦИИ МЕЗОЗОЯ: ПОРАЙОННЫЕ И РЕГИОНАЛЬНЫЕ
КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ – ИНФОРМАТИВНАЯ ОСНОВА ПЕРСПЕКТИВ
ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ ПОГРЕБЕННЫХ
ЛИТОКОМПЛЕКСОВ (ЗАПАДНАЯ ПЕРИФЕРИЯ ВЕРХОЯНО-КОЛЫМСКОЙ
ОРОГЕННОЙ ОБЛАСТИ И ПРИЛЕГАЮЩАЯ ТЕРРИТОРИЯ
СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ)**

Виталий Гриненко¹, Анна Киричкова²

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

2 ФГУП «Всероссийский нефтяной научно-исследовательский геологоразведочный институт»,
191014, Россия, г. Санкт-Петербург, Литейный пр-т, 39

**MESOZOIC CORRELATION SCHEMES: CORRELATION BY DISTRICT AND BY
REGION – AN INFORMATIVE BASIS FOR THE PROSPECTS OF POTENTIAL
OIL AND GAS CONTENT OF BURIED LITHO-UNITS (THE WESTERN
PERIPHERY OF THE VERKHUYANSK-KOLYMA OROGENIC REGION AND
THE ADJACENT TERRITORY OF THE SIBERIAN PLATFORM)**

Vitaliy Grinenko¹, Anna Kirichkova²

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

2 All-Russian Petroleum Research Exploration Institute (FSUE VNIGRI), St. Petersburg

Annotation. The performed studies on the analysis of stratigraphic schemes – correlations by district and by region, allow us to involve in stratification on equal terms various buried litho-units with different facial (both marine terrigenous and continental terrigenous and sedimentary-volcanogenic) formations. Litho-units carry a voluminous informative basis for the prospects of oil and gas content. They are correlated on equal terms in various Mesozoic schemes of the western periphery of the Verkhoyansk-Kolyma orogenic region and the adjacent territory of the Siberian Platform. Phytostratigraphic horizons of the Siberia are widely used in diagnostics and correlations of geological bodies of litho-units developed in the structures of the first order of the platform and the orogenic region.

1. Изученность и некоторый комментарий к ней

В документах, официально утвержденных МСК для Северо-Востока России и для прилегающей территории Сибирской платформы уже присутствуют региональные (унифицированные) стратиграфические схемы триаса, юры и, рабочие порайонные (корреляционные) схемы мела. Однако следует заметить, что в целом, хотя и существуют такие регламентирующие документы, степень изученности территории востока Сибирской платформы, ввиду погребенного мезозоя под молодыми образованиями чехла, остается еще недостаточной [1–5]. Из анализа разномасштабного картографического материала следует, что на основной её “закрытой”, более 50%, части территории полистная геологическая съемка масштаба 1:200 000 была проведена в период еще 60-70-х и, редко, 70-80-х годов. Имеются площади, не покрытые кондиционными геологическими картами масштабов 1:200 000 и 1:50 000, а на большей их части (более 416 000 кв. км) Вилюйской синеклизы, Алданской антеклизы и Предверхоянского краевого прогиба, проведено в начале 80-х годов лишь аэрофотогеологическое картирование масштаба 1:200 000. Вместе с тем, всю территорию Западной и Восточной Якутии охватывает ряд современных мелкомасштабных карт масштабов 1:1 500 000, а также полистная Геологическая карта Якутии масштаба 1:500 000, сгруппированная в отдельные комплекты разного геологического содержания, охватывающие крупные тектонические элементы (блоки) земной коры. В последнее время ВСЕГЕИ и ряд

подведомственных геологических предприятий Якутии проводили на многих площадях рудных узлов и погребенных перспективных структур геолого-геофизические работы, некоторые из них уже завершены, а также выполнено и региональное мелкомасштабное картосоставление по территории Западной и Восточной Якутии в масштабе 1:1 000 000 (издание третье).

2. Состояние проблемы и постановка задачи

Установлено, что западная периферия Верхояно-Колымской орогенной области и прилегающие структуры востока Сибирской платформы (Виллойская синеклиза, Алданская антеклиза, Предверхоанский краевой и Алдано-Майский прогибы), являются разновозрастными и характеризуются различной историей своего развития [6, 7]. Исследования естественных разрезов осадочных литокомплексов мезозоя по керну глубоких скважин на нефть и газ в бассейнах рр. Лены, Амги и Алдана позволяет, с большей долей вероятности, установить этапы формирования отрицательных и положительных структур платформы, находящихся не только между собой в тесной взаимосвязи, но и имеющих общую, унаследованную историю развития как на востоке Сибирской платформы, так и при формировании сопряженных структур в пределах западной периферии Верхояно-Колымской орогенной области [8–10]. Так, Алдано-Майская отрицательная геоструктура, также как и Ангаро-Ленская и Виллойская, заложилась на докембрийском основании. Они развивались на протяжении палеозоя и мезозоя со свойственными для подобных прогибов типом карбонатных и терригенных формаций, достигнув максимального прогибания во временные интервалы юры и мела (Рисунки 1, 2, 3). Предверхоанский прогиб отличается от Алдано-Майского своей относительной “молодостью”. Он заложился как отрицательная депрессия в нижнем мелу и развивался со своим комплексом фациальных обстановок, включающих, в основном, терригенные осадочные геогенерации. В его истории фиксируется этап торцового взаимодействия с Алдано-Майским прогибом и, вследствие этого, ярко выраженный процесс сопряжения эволюции в формировании угленосных отложений в средне-верхнеюрское – раннемеловое время. Процесс такого сопряжения двух отрицательных геоструктур завершается на рубеже нижнего-верхнего альба меловой системы и, связывается при их взаимодействии, со сменой в пределах континентальной суши Восточно-Сибирского бореального осадочного палеобассейна комплекса мезофитной флоры на кайнофитную [11, 12], с повсеместным доминированием древнейших покрытосеменных растений в верхнемеловых отложениях [13], в ходе завершения формирования разрезов позднего мезозоя верхоянского терригенного комплекса.

3. Выводы

Анализ озвученных выше материалов показывает, что площади соприкосновения крупных складчатых единиц Верхояно-Колымской орогенной области и прилегающей части Сибирской платформы в геологическом обиходе чаще фигурируют как «зоны перехода» или обозначены на созданных ранее мелкомасштабных картах разного геологического содержания как «перспективные зоны сочленения». Такие «зоны» в пределах востока платформы стали привлекательными для недропользователей как «природные резервуары чехла» – потенциально перспективные объекты на обнаружение залежей высоколиквидных полезных ископаемых, в первую очередь, на концентрированные углеводороды, а также, на каустобиолиты, агроруды и алмазы). Поэтому, для оптимизации поисков минерального сырья в отложениях, продуктивные горизонты которых приурочены к определенным стратиграфическим уровням и фациальным обстановкам, необходимо постоянно совершенствовать стратиграфическую основу и уточнять палеогеографические реконструкции рассматриваемого интервала. В западной периферии Верхояно-Колымской орогенной области и прилегающей территории Сибирской платформы разновозрастные и разнофациальные отложения мезозоя [14] как раз и являются тем перспективным объектом, который может включать указанные виды полезных ископаемых. В этой связи, актуальность изучения на новом этапе региональных обобщений погребенных литокомплексов мезозоя с целью перспективного прогноза на возможное наличие в них

ВЫСОКОЛИКВИДНЫХ ЭНДОГЕННЫХ И ЭКЗОГЕННЫХ ВИДОВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ НЕ ВЫЗЫВАЕТ СОМНЕНИЙ.

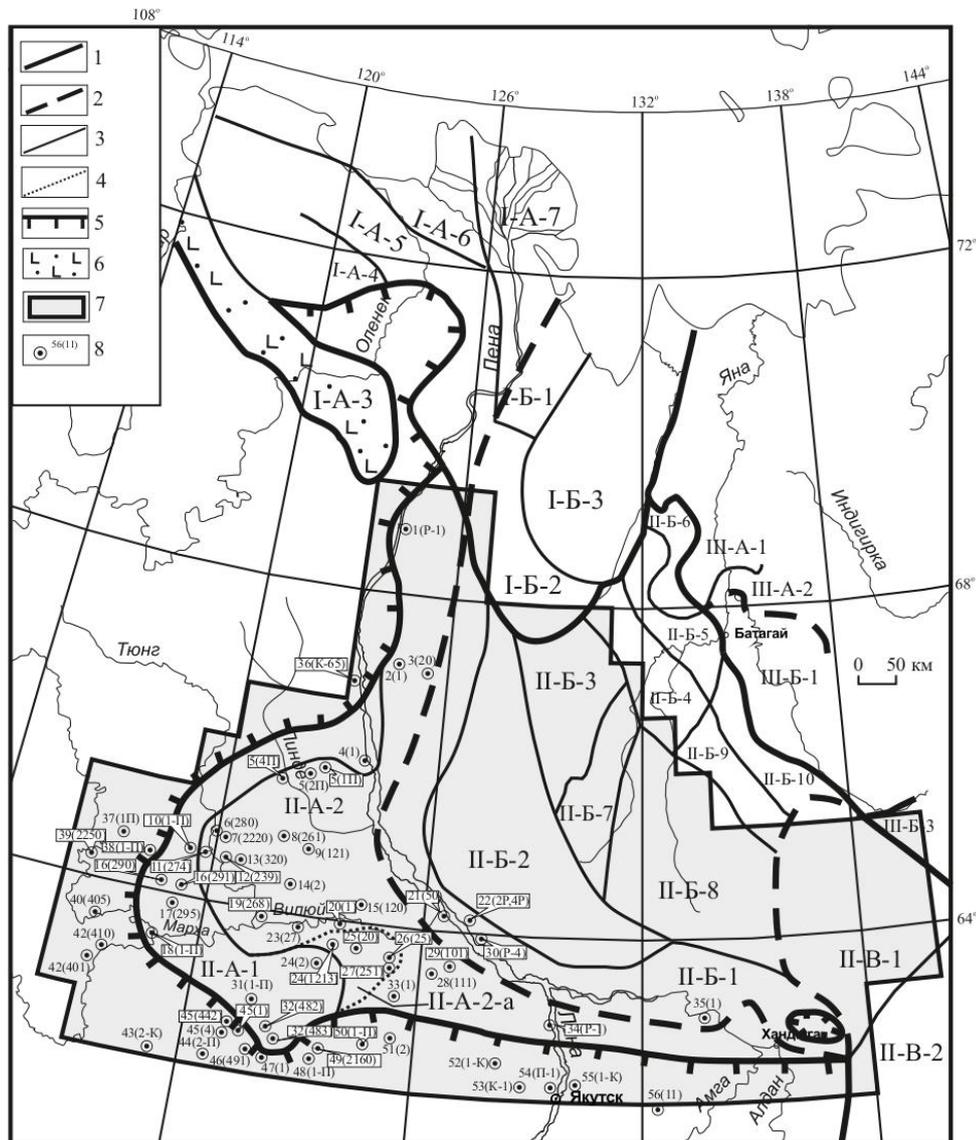


Рисунок 1 – Схема структурно-фациального районирования триасовых отложений.

Границы структурно-фациальных: 1 – областей, 2 – зон, 3 – районов, 4 – площадей; 5 – границы современного распространения отложений, 6 – континентальные вулканогенно-осадочные образования; 7 – контур исследованной территории; 8 – номера площадей, в скобках номера скважин.

ЭЛЕМЕНТЫ РАЙОНИРОВАНИЯ. Анабаро-Омолуйская СФО (I): Хатангско-Нижнеленская СФЗ (I-A): районы: Молодо-Уджинский (I-A-3), Буур-Оленекский западный (I-A-4), Буур-Оленекский восточный (I-A-5), Лено-Оленекский (I-A-6), Нижнеленский (I-A-7); Арга-Юрхская СФЗ (I-B): районы: Хараулахский (I-B-1), Бесюкинский (I-B-2), Куолайский (I-B-3). **Верхоянская СФО (II):** Виллойская СФЗ (II-A): районы: Средневиллойский (II-A-1), Нижневиллойский (II-A-2); площадь: Неджели-Мастахская (II-A-2-а); Западно-Верхоянская СФЗ (II-B): районы: Менкере-Баранский (II-B-1), Муосучанский (II-B-2), Ханнахский (II-B-3), Нижнесартангский (II-B-4), Верхнеянский (II-B-5), Селябирский (II-B-6), Аркачанский (II-B-7), Дулгалах-Хунхадинский (II-B-8), Борулах-Дербекский (II-B-9), Борулах-Молтырканский (II-B-10); Южно-Верхоянская СФЗ (II-V): районы: Томпонский (II-V-1), Аллах-Юньский (II-V-2). **Яно-Сугойская СФО (III):** Полоусненская СФЗ (III-A): районы: Куларский (III-A-1), Центрально-Полоусненский (III-A-2); Адыча-Нерская СФЗ (III-B): районы: Адычанский (III-B-1), Эльгинский (III-B-3)

Список площадей, скважин и их номера.

1 (P-1) Джарджанская опорная; 2 (1) Приленская; 3 (2480) Алысардахская; 4 (1) Бахынайская; 5 (1-П, 2-П, 4-П) Северо-Линденская; 6 (280) Чоргочимская; 7 (2220) Северо-Тюнгская; 8 (261) Верхнелинденская; 9 (421) Хоромская; 10 (1-П) Тюкан-Тюнгская; 11 (274) Западно-Тюнгская; 12 (239) Средне-Тюнгская; 13 (320) Тысактыская; 14 (2) Балагачинская; 15 (120) Уорангская; 16 (290, 291) Южно-Саягыйская; 17 (295) Уданская; 18 (1-П) Усть-Мархинская; 19 (268-1) Усть-Тюнгская; 20 (1) Джикимдидская; 21 (50) Усть-Виллойская; 22 (2р, 4р) Китчанская; 23 (27) Средневиллойская; 24 (2, 1213) Хайлахская; 25 (20) Мастахская; 26 (25) Неджелинская; 27 (251) Южно-Неджелинская; 28 (111) Средне-Лунхинская; 29 (101) Кобяйская; 30 (P-4) Сангарская; 31 (1-П) Чыбыдинская; 32 (482, 483) Кумакская; 33 (1) Байская; 34 (P-1) Намская опорная; 35 (1) Ивановская; 36 (K-65) Жиганская; 37 (1-П) Чучуканская; 38 (1-П) Средне-Конокчанская; 39 (2250) Средне-Мархинская; 40 (405) Малькайская; 41 (419) Сыгдахская; 42 (401) Усть-Менская; 43 (2-К) Кемпендейская; 44 (2-П) Арбайская; 45 (1, 4, 442) Кудэлпичская; 46 (491) Восточная; 47 (1) Верхнесинская; 48 (1-П) Синская; 49 (2160) Северо-Синская; 50 (1-П) Баппагайская; 51 (2) Андреевская; 52 (1-К) Уордахская; 53 (K-1) Кенкеменская; 54 (P-1) Якутская опорная; 55 (1-К) п. Тектор; 56 (11) п. Чурапча.

| Общая стратиграфическая шкала | | Региональные стратиграфические подразделения | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-----------|--|---|-----------------|---|---|----------------------|-----------------------|---|--|---|--|-------------------------|--|
| | | Зоны и слои | | | | | | | | | | | | |
| | | Фауна | | | | | Макростраты растений | | | | | | | |
| | | Аммониты (АМ) | | Двустворки (ДВ) | | Фораминиферы (ФР) | | Спores и пыльца (СПК) | | | Слои | | Комплексы растений (КР) | |
| Верхний | Юрская | 25. <i>Craspedites</i> spp. | 19. <i>Buchia</i> spp. | | 24. <i>Trochammina septentrionalis</i> | 16. <i>Pinuspollenites</i> spp., <i>Podocarpidites</i> spp., <i>Cladophlebidites</i> spp., <i>Cladophlebis</i> spp. | | | Мархинские | | 5. Мархинский | | | |
| | | 24. <i>Tamynophyllites</i> | | | 23. <i>Pseudolamarkia lobensis</i> | 15. <i>Piceapollenites</i> spp., <i>Sciadopitys</i> spp., <i>Macroverrucosus</i> , <i>Classopollis</i> , <i>Convolvosporites</i> | | | Equisetites schetschumenensis, <i>Cladophlebis aldandensis</i> , <i>Raphaelia diamensis</i> , <i>Coniopteris</i> , <i>Czekanowskia</i> spp., <i>Phoenicopsis irkutensis</i> | | Equisetites tschetschumenensis Vassil., <i>E. dissimilis</i> Kiritch., <i>Coniopteris burejensis</i> (Zall) Sew., <i>Cladophlebis aldandensis</i> Vachr., <i>C. serrulata</i> Samyl., <i>Raphaelia diamensis</i> Sew., <i>Betula tungensis</i> Kiritch., <i>Ginkgo</i> , <i>Czekanowskia borealis</i> Kiritch. et Samyl., <i>Czekanowskia</i> spp., <i>Phoenicopsis bungoensis</i> Kiritch. | | | |
| Средний | Байосский | 18. <i>Oxydiscytes tamyrensis</i> | 18. <i>B. ex gr. tenuistriata</i> | | 21. <i>Recurvirostris diputabilis</i> | 14. <i>Piceapollenites</i> spp., <i>Podocarpidites</i> , <i>Classopollis</i> , <i>Cyatidites australis</i> , <i>Osmundacidites</i> | | | Джакофские | | 4. Джакофский | | | |
| | | 17. <i>Aulacostephanus</i> | 17. <i>Buchia concentrica</i> | | 20. <i>Ammodiscus thomsi</i> | 13. <i>Piceapollenites</i> spp., <i>Klukisporites variegatus</i> | | | Osmunda, <i>Cladophlebis aldandensis</i> , <i>C. serrulata</i> , <i>Phoenicopsis intusus</i> , <i>Florinia</i> , <i>Schidolepidopsis</i> spp. | | Gleichenia jacutica Vassil., <i>Osmuda acutipinula</i> Vassil., <i>Coniopteris</i> , <i>Cladophlebis aldandensis</i> Vachr., <i>C. serrulata</i> Samyl., <i>Raphaelia diamensis</i> Sew., <i>R. kirinae</i> Kiritch., <i>Ginkgo vetchojanica</i> Kiritch., <i>Phoenicopsis intusus</i> Kiritch., <i>Taxocladus tschetschumenensis</i> Vassil., <i>Schidolepidopsis</i> spp. | | | |
| Нижний | Пинежский | 16. <i>Amoeboceras</i> spp. | 16. <i>Pr. kirghisensis</i> | | 19. <i>Trochammina oxfordiana</i> | 12. <i>Piceapollenites</i> , <i>Cyatidites</i> , <i>Gleichenidites</i> , <i>Sciadopityspollenites macroverrucosus</i> , <i>Classopollis</i> | | | Ялутские | | 3. Ялутский | | | |
| | | 15. <i>Cardioceras</i> spp. | 15. <i>Praebuchia orientalis</i> | | 17. <i>Ammobaculites igmensis</i> | 11. <i>Cyatidites australis</i> , <i>Classopollis</i> , <i>Osmundacidites</i> spp., <i>Klukisporites vriegatus</i> | | | Equisetites beanii, <i>Raphaelia kirinae</i> , <i>Heilungia aldandensis</i> , <i>Czekanowskia suntarica</i> , <i>Phoenicopsis irkutensis</i> | | Equisetites beanii (Bunb.) Sew., <i>Heilungia</i> sp., <i>Cladophlebis parvifolia</i> Genk., <i>Raphaelia kirinae</i> Kiritch., <i>Ginkgo tapkensis</i> Dolud. et Rasskaz., <i>Sphenobaiera</i> cf. <i>czekanowskiana</i> Heer, <i>Pseudotorellia</i> , <i>Czekanowskia suntarica</i> Kiritch. et Samyl., <i>Phoenicopsis irkutensis</i> Pryn. | | | |
| Синеморский | Пинежский | 14. <i>Eboraceras subvolutum</i> | 14. <i>P. anabarensis</i> et <i>Gr. leskevitschii</i> | | 16. <i>Lingulina delicatulae</i> | 10. <i>Cyatidites</i> spp., <i>Piceapollenites</i> spp., <i>Gleichenidites</i> , <i>Quadraculina limbata</i> , <i>Sciadopitys macroverrucosus</i> | | | Сунтарские | | 2. Сунтарский | | | |
| | | 13. <i>Longaeviceras keyserlingi</i> | 13. <i>Praebuchia anabarensis</i> | | 14. <i>Trochammina nostrovzei</i> | 9. <i>Cyatidites dilucidus</i> , <i>Stereosporites</i> , <i>Diclyophyllites</i> spp., <i>Coniopteris problematicus</i> | | | Pilophyllum | | Pilophyllum sibiricum Samyl. | | | |
| Тетанский | Пинежский | 12. <i>Rondiceras milashevici</i> | 12. <i>R. anabarensis</i> et <i>Gr. leskevitschii</i> | | 11. <i>Ammodiscus arangastachii</i> | 8. <i>Cyatidites minor</i> , <i>Osmundacidites jurassicus</i> , <i>Piceopollenites vanabifomms</i> , <i>Stereosporites</i> , <i>Sciadopitysporites multiverrucosus</i> | | | Укугутские | | 1. Укугутский | | | |
| | | 11. <i>Cadoceras</i> spp. | 11. <i>R. portectus</i> | | 10. <i>Lenticulina nordvikensis</i> | 7. <i>Piceapollenites</i> spp., <i>Stereosporites</i> spp., <i>Quadraculina limbata</i> , <i>Dictyophyllites</i> spp. | | | Annulariopsis, <i>Neocalamites</i> , <i>Czekanowskia vijvensis</i> , <i>Schidolepidopsis iljassica</i> | | Annulariopsis sp., <i>Neocalamites</i> sp., <i>Equisetites lindensis</i> Kiritch., <i>E. viljei</i> ne Kiritch., <i>Haumannia ussuriensis</i> Krysh., <i>Cladophlebis vacensis</i> Ward, <i>Raphaelia diamensis</i> Sew., <i>Ginkgo celebicus</i> Kiritch., <i>Czekanowskia vijvensis</i> Kiritch., <i>Schidolepidopsis lassica</i> (Kiritch.) Dovett | | | |
| Тетанский | Пинежский | 10. <i>A. reticosas harlandi</i> | 10. <i>R. vagt</i> | | 9. <i>Astaculus zvetkovi</i> | 6. <i>Cyatidites</i> , <i>Dicleridae</i> , <i>Maratosporites</i> | | | Укугутские | | 1. Укугутский | | | |
| | | 9. <i>Boreiocephalites borealis</i> | 9. <i>R. lucifer</i> | | 8. <i>Vernuolnoides synduscosensis</i> | 5. <i>Tripartita variabilis</i> | | | Annulariopsis, <i>Neocalamites</i> , <i>Czekanowskia vijvensis</i> , <i>Schidolepidopsis iljassica</i> | | Annulariopsis sp., <i>Neocalamites</i> sp., <i>Equisetites lindensis</i> Kiritch., <i>E. viljei</i> ne Kiritch., <i>Haumannia ussuriensis</i> Krysh., <i>Cladophlebis vacensis</i> Ward, <i>Raphaelia diamensis</i> Sew., <i>Ginkgo celebicus</i> Kiritch., <i>Czekanowskia vijvensis</i> Kiritch., <i>Schidolepidopsis lassica</i> (Kiritch.) Dovett | | | |
| Тетанский | Пинежский | 8. <i>Ps. (T.) fastigiatum</i> | 8. <i>Melaergrina laminastrata</i> | | 7. <i>Ammodiscus silicicus</i> | 4. <i>Stereosporites</i> spp., <i>Uvatsporites argenteiformis</i> ? | | | Укугутские | | 1. Укугутский | | | |
| | | 7. <i>Ps. (T.) fastigiatum</i> | 7. <i>Melaergrina laminastrata</i> | | 6. <i>Ammobaculites lobus</i> | 3. <i>Cycadopsites</i> spp., <i>Uvatsporites argenteiformis</i> , <i>Dipterella obtusilobus</i> , <i>Paleoconiferus assacatus</i> | | | Укугутские | | 1. Укугутский | | | |
| Тетанский | Пинежский | 6. <i>Zugodactylites braunianus</i> | 6. <i>Melaergrina laminastrata</i> | | 5. <i>Ammodiscus silicicus</i> | 2. <i>Cycadopsites medius</i> , <i>Stereosporites infragradulatus</i> , <i>Polycingulatisporites triangularis</i> , <i>Quadraculina anellaformis</i> , <i>Protopicia cerina</i> | | | Укугутские | | 1. Укугутский | | | |
| | | 5. <i>Harboceras filiferum</i> | 5. <i>Melaergrina laminastrata</i> | | 4. <i>Tr. lapidosa</i> , <i>Fr. dubiella</i> | 1. <i>Dipterella obtusilobus</i> , <i>Alisporites pergrandis</i> | | | Укугутские | | 1. Укугутский | | | |
| Тетанский | Пинежский | 4. <i>Elegantoceras elegantum</i> | 4. <i>Melaergrina laminastrata</i> | | 3. <i>Ammodiscus silicicus</i> | 1. <i>Dipterella obtusilobus</i> , <i>Alisporites pergrandis</i> | | | Укугутские | | 1. Укугутский | | | |
| | | 3. <i>Tilonoceras propinquum</i> | 3. <i>Melaergrina laminastrata</i> | | 2. <i>Tr. inusitata</i> , <i>Turnitella volubilis</i> | 1. <i>Dipterella obtusilobus</i> , <i>Alisporites pergrandis</i> | | | Укугутские | | 1. Укугутский | | | |
| Тетанский | Пинежский | 2. <i>A. margaretaus</i> | 2. <i>Melaergrina laminastrata</i> | | 1. <i>Trochammina sublapidosa</i> | 1. <i>Dipterella obtusilobus</i> , <i>Alisporites pergrandis</i> | | | Укугутские | | 1. Укугутский | | | |
| | | 1. <i>Psiloceras planorbis</i> | 1. <i>Pseudomytiloides sinuosus</i> | | 1. <i>Trochammina sublapidosa</i> | 1. <i>Dipterella obtusilobus</i> , <i>Alisporites pergrandis</i> | | | Укугутские | | 1. Укугутский | | | |

Рисунок 2 – Комплексная биостратиграфическая шкала юрских отложений Вилуйской синеклизы и Центрального Приверхоянья.

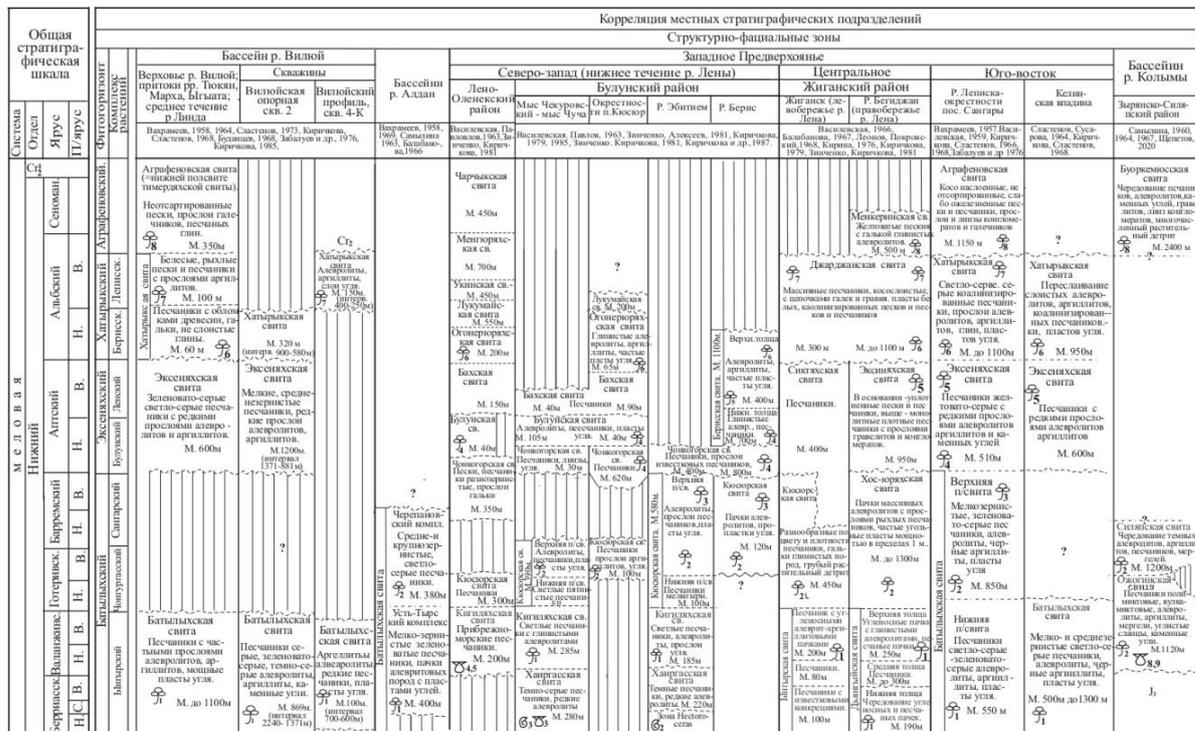


Рисунок 3 – Корреляция региональных стратиграфических подразделений континентальных нижнемеловых отложений Ленского бассейна по палеоботаническим данным.

4. Благодарности

Работа выполнена по государственному заданию ИГАБМ СО РАН и профинансирована Минобрнауки России.

5. Литература

- [1] 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 (state of knowledge, main problems and ways to solve them) // Bulletin of State Committee on Geology. Materials on geology and minerals of the Republic of Sakha (Yakutia).– Yakutsk: Yakutsk branch of SB RAS publishing house, 2001. –№ 1. – P.112-129.
- [2] 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 the Jurassic deposits of the Eastern Yakutia // Russian geology. – 2002. – № 4. – P. 73-80.
- [3] Grinenko V.S. History of formation of the Upper Triassic-Jurassic sediments of the East Siberian sedimentary basin (East Siberian platform and folded framing): abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Geological and mineralogical Sciences. – Irkutsk, 2010. – 19 p.
- [4] Grinenko V.S. The Cretaceous continental formations of the east of the Siberian platform // Russian geology. – 2007. – № 1. – P. 110-118.
- [5] Devyatov V.P., Trushchelev A.M., Grinenko V.S. Stratigraphy of the Triassic deposits of the Verkhoyansk facies region (Central Yakutia) // Geology and mineral resources of Siberia. – 2012. – № 2 (10). – P. 24-37.
- [6] Trushchelev A.M., Grinenko V.S. Boreal Triassic of the interfluvium of the upper reaches of the Yana and Indigirka rivers – new in the stratigraphy of the Q-53 sheet– Verkhoyansk // Bulletin of State Committee on Geology. Materials on geology and minerals of the Republic of Sakha (Yakutia). – Yakutsk: Publishing house of LLC "Company "Dani–Almas»», 2016. – № 1 (15). – P. 33-75.
- [7] Grinenko V.S., Baranov V.V., Kirichkova A.I. The problem of the lower boundary of the Cretaceous system and the stratigraphy of the boundary continental Upper Jurassic-Lower Cretaceous deposits of the Vilyui syncline and the Pre-Verkhoyansk foredeep // Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian Mobile Belt (from ocean to continent). – 2021. – Issue 19. – P. 49-51.
- [8] Grinenko V.S., Knyazev V.G. Stratigraphy of the Jurassic deposits of the Khapchagai and Lena-Vilyui districts: Separation and interregional correlation // Russian geology. – 2008. – № 5. – P. 73-78.
- [9] Grinenko V.S., Knyazev V.G. Laptev subcomplex (T3r2-J3v) of the Verkhoyansk terrigenous complex // Science and Education. – 2012. – № 4 (68). – P. 13-18.
- [10] Grinenko V.S., Devyatov V.P. Kitchansky paralimnic subcomplex of the Verkhoyansk terrigenous complex (east of the Siberian platform) // The Cretaceous system of Russia and the near abroad: problems of stratigraphy and paleogeography. Materials of the Eighth All–Russian Meeting September 26-October 3, 2016 Republic of Crimea / Edited by E.Y. Baraboshkin. – Simferopol: Chernomorpress Publishing House, 2016. – P. 98–99.
- [11] Kirichkova A.I. Paleobotanical characteristics and correlation of continental deposits of the Upper Jurassic of Western Yakutia // Geology and Geophysics. – 1976. – № 11. – P. 44-54.
- [12] Kirichkova A.I. Phytostratigraphy and flora of Jurassic and Lower Cretaceous deposits of the Lena basin. – L.: Nedra, 1985. – 222 p.
- [13] Grinenko V.S., Zharikova L.P. The Upper Cretaceous of the Vilyui syncline: state of knowledge, problems of separation and correlation (east of the Siberian Platform)// The Cretaceous system of Russia and the near abroad: problems of stratigraphy and paleogeography. Materials of the Fourth All–Russian Meeting, Novosibirsk, September 19-23, 2008. – Novosibirsk: Publishing House of SB RAS, 2008. – P. 64-66.

- [14] Grinenko V.S., Knyazev V.G., Devyatov V.P., Nikitenko B.L., Shurygin B.N. New regional stratigraphic scheme of the Upper Triassic-Jurassic deposits of the East 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): 2 volumes. / Edited by B.N. Shurygin, N.K. Lebedeva, A.A. Goryacheva. V1. The Mesozoic. – Novosibirsk: INGG SB RAS, 2011. – P. 65-70.

ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЙ И ПЕТРОХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВЫ ПОРОД ХОТУГУ-ЭЕКИТСКОГО МАССИВА (ОЛЕНЕКСКИЙ ВЫСТУП)

Алексей Иванов, Борис Герасимов, Мичил Иванов, Анатолий Журавлев
ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

PETROGRAPHIC AND CHEMICAL COMPOSITIONS OF ROCKS OF THE KHOTUGU-EYEKIT MASSIF (OLENEKSKY PROPURT)

Alexey Ivanov, Boris Gerasimov, Michil Ivanov, Anatoly Zhuravlev
Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

Annotation. The paper considers the petrographic and petrochemical compositions of the rocks of the Khotugu-Eekit massif. Spatially included in the series of granitoids of the Olenek complex, the Oleneksky ledge of the basement of the northern part of the Siberian craton. As a result of field and petrographic observations, it was revealed that the rocks of the Khotugu-Eekitsky massif are composed of essentially leucocratic, microcline granites with a predominantly hypidiomorphic granular structure. On the basis of which it was concluded that the formation of the latter took place in one stage. According to the content of basic petrooxides, the value of their ratios and ratios, the values of the main indicator petrochemical coefficients, it was concluded that the rocks of the massif belong to A₂-type plumasite granites of the high-potassium calc-alkaline petrochemical series.

1. Введение

Район исследования пространственно приурочен к Оленекскому выступу (или провинции) фундамента Сибирского кратона. В его строении принимают участие образования эекитской серии раннего протерозоя (метапесчаники, филлитовидные сланцы, метаалевролиты), метаморфизованные в условиях зеленосланцевой фации, а также гранитоиды оленекского комплекса, которые секут складчатую структуру эекитской серии и на основании этого относятся к постдеформационному типу (рис. 1). Магматические образования представлены плутонами биотитовых гранитов, гранодиоритов, диоритов и лейкогранитов. Наиболее изученные из которых представлены Ортоку-Эекитским и Сололийским массивами [1]. Одним из практически неизученных гранитоидных образований на рассматриваемой площади является Хотугу-Эекитский массив, локализованный в истоках одноименной реки (рис. 1). В связи с чем, основополагающей и фундаментальной целью нашей работы, являлось установление петрографических и петрохимических характеристик составов слагающих гранитов массива.

2. Петрографический и петрохимический составы пород Хотугу-Эекитского массива

Для гранитов Хотугу-Эекитского массива характерна гипидиоморфнозернистая структура (рис. 2), массивная текстура и следующий минеральный состав: альбит 15%, микроклин 50%, кварц 30%, а также темноцветные (роговая обманка, биотит) 4% и аксессуарные минералы (циркон, апатит) 1%. Альбит представлен самостоятельными призматическими кристаллами и практически полностью серицитизирован, из-за чего с трудом поддается диагностике (рис. 2, а). Наименее измененные кристаллы альбита с едва уловимым полисинтетическим двойникованием. КППШ ранней генерации присутствует в качестве кристаллов призматической и неправильной форм, в большинстве случаев с пертитовым строением и представлен микроклином, для которого характерны тонкие полисинтетические и решетчатые двойники (рис. 2, б, в). Поздняя генерация последнего на ряду с кварцем второй генерации в виде основного базиса заполняют промежутки между калиевых минералов ранних генераций.

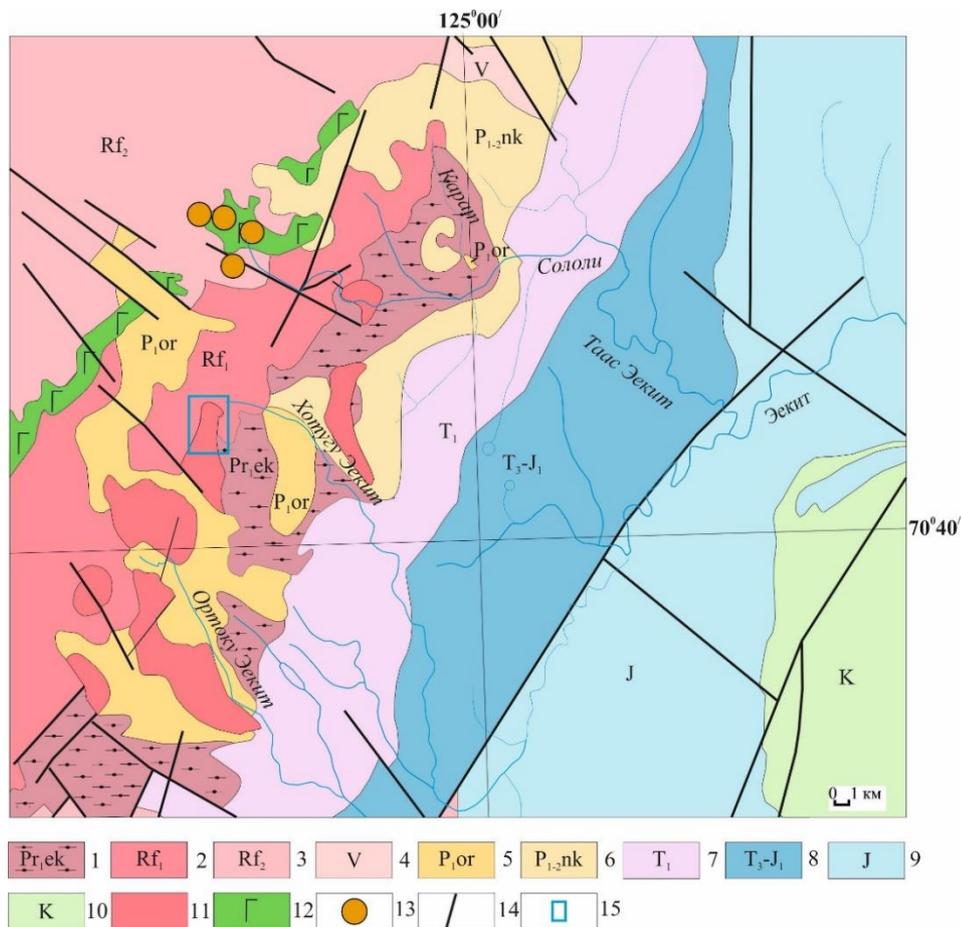


Рисунок 1 – Схема геологического строения дочетвертичных образований Оленекского выступа фундамента Сибирского кратона (по данным [2]):

1– образования экитской серии раннего протерозоя; 2 - раннерифейские песчаники, алевролиты, гравелиты и конгломераты; 3 – позднерифейские среднерифейские песчаники, доломиты и известняки; 4 – вендские песчаники, конгломераты, доломиты и известняки; 5 – конгломераты, гравелиты, песчаники, углистые сланцы, алевролиты ортокинской свиты ранней перми; 6 – переслаивание пачек аргиллитов, алевролитов и песчаников никабытской свиты поздней перми; 7 – триасовые аргиллиты, алевролиты и туфопесчаники; 8 – позднетриасовые-раннеюрские конгломераты, песчаники, алевролиты; 9 – песчаники, конгломераты, прослои аргиллитов и алевролитов, линзы известняков юрского возраста; 10 – меловые песчаники, алевролиты, прослои и линзы конгломератов; 11 – гранитоиды; 12 – раннерифейский уэтяхский комплекс долеритов; 13 – вендский трахибазальт - трахитовый Монгусский комплекс; 14 – разломы; 15 – объект исследований.

Первая генерация кварца диагностируется в качестве гипидиоморфных скоплений угловатых зерен и облачным погасанием (рис. 2, в). Вторая генерация в виде базиса основной массы или выполняет редкие тонкие прожилки в породе (рис. 2, г). Роговая обманка представлена зернами неправильной формы, редко короткими призмами с неправильными очертаниями, зачастую замещается биотитом почти до полных псевдоморфоз (рис. 2, д). Биотит присутствует в виде мелких, неправильной формы зерен, с измененными направлениями спайности (рис. 2, е), для которого характерно неравномерное распределение по породе. По роговой обманке и биотиту интенсивно развит хлорит, карбонат и/или редкий анкерит? в качестве темно-коричневых примазок. Циркон призматического габитуса, в шлифах бесцветен, иногда буроватого оттенка, с характерным прямым углом погасания и высокими цветами интерференции. Кроме того, вокруг зерен циркона часто возникают темные зоны радиоактивного распада. Редкие кристаллы апатита отмечены в виде короткостолбчатых индивидов, как отдельных, так и в виде включений в КПШ ранних генераций (рис. 2, з). Погасание прямое, отдельность по (001). Контакт гранитов массива (шлиф 118/5-2) с вмещающими породами неровный, тектонического

характера, с обилием обломков. Обломки вмещающих пород с характерной каймой плавления (рис. 2, и).

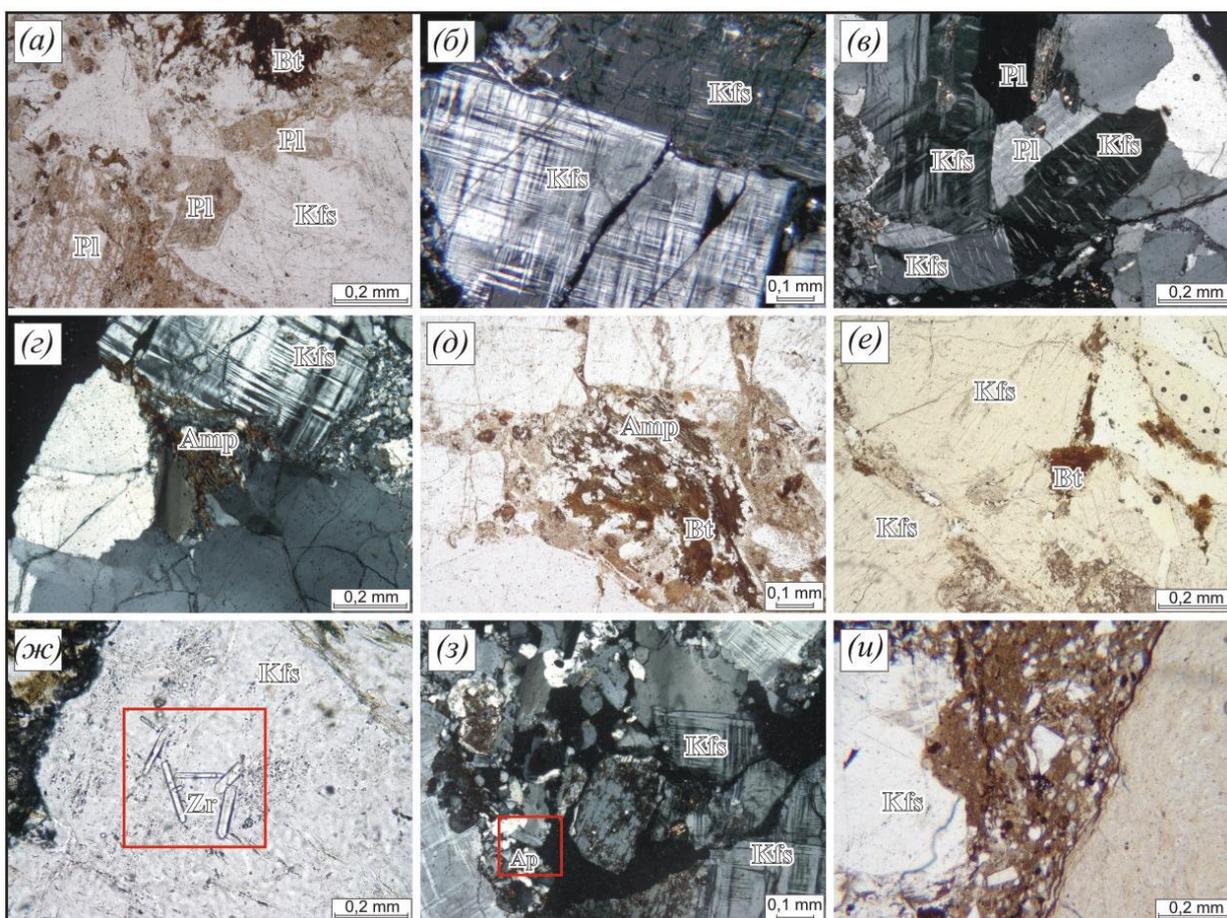


Рисунок 2 – Породы, принимающие участие в строении Хотугу-Экитского массива.

а – Шлиф 118/5-1, наименее измененный гипидiomорфнозернистый гранит. В центре шлифа измененные кристаллы плагиоклаза, увеличение 40. Николи –; б – микроклин с характерным решетчатым двойникованием, увеличение 40, николи +; в – пертитовое строение КПШ, увеличение 40, николи+; г – в центре шлифа измененный амфибол (роговая обманка), увеличение 40, николи+; д – замещение амфибола биотитом, увеличение 40, николи –; е – неправильные зерна биотита в граните, увеличение 40, николи –; ж – центр шлифа, скопление циркона с зонами распада, увеличение 100, николи +; з – в левом нижнем углу кристалл апатита, минералы второй генерации (кварц, КПШ), увеличение 100, николи+; и – Шлиф 118/5-2, контакт гранитов Хотугу-Экитского массива с вмещающими породами, увеличение 40, николи –.

На классификационной диаграмме [3] точки составов пород Хотугу-Экитского массива концентрируются в поле гранитов, являясь умереннощелочными $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 6,45-8,13, ультракислыми образованиями SiO_2 77,51-81,85% [4] (рис 3, а). Граниты массива характеризуются калиевым типом щелочности $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} < 0,3$ (преобладание K_2O 5,16-6,59% над Na_2O 1,26-1,53%). Породы массива по отношению $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ [5] относятся к высококалиевой известково-щелочной серии, хотя и с незначительным отклонением параметров составов к шошонитовой петрохимической серии (рис. 3, б) и характеризуются высокими значениями индекса ASI 1,04-1,22. По отношению глиноземистости к суммарному содержанию щелочей и кальция $\text{Al}_2\text{O}_3 > \text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$, последние близки к плюмазитовым [4] пересыщенным алюминием al' 8,94-15,31, высоко железистым f^* 0,83-0,94 гранитам (рис. 3 в,г).

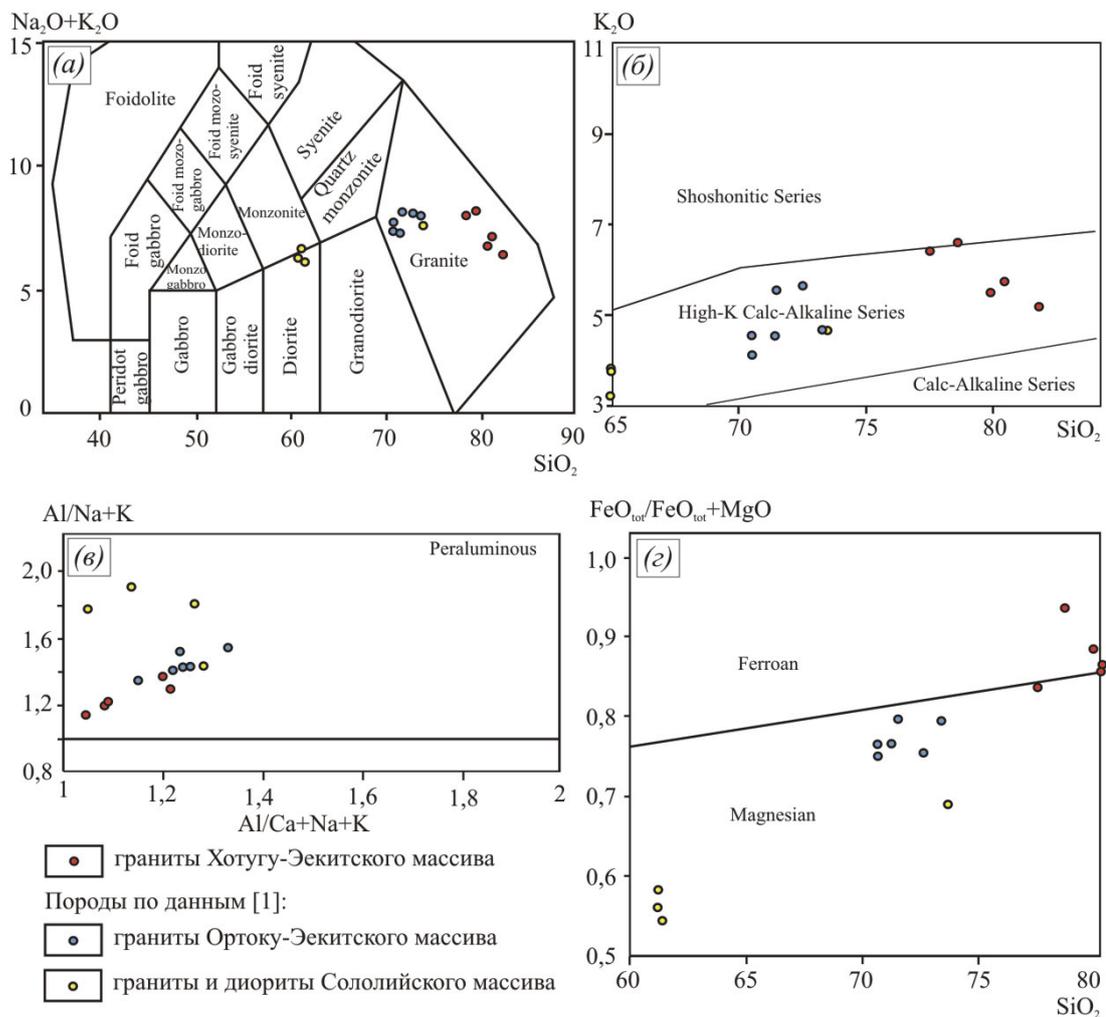


Рисунок 3 – Классификация магматических пород Сололийского поднятия: а – диаграмма $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ - SiO_2 , поля магматических пород по [3], б – классификационная диаграмма $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ для магматических пород: Серии пород [5], классификационные диаграммы по [6] значения в молекулярных количествах: в – $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})=\text{A}/\text{NK}$, г – $\text{FeO}_{\text{tot}}/(\text{FeO}_{\text{tot}}+\text{MgO})-\text{SiO}_2$.

Граниты Хотугу-Экитского массива по содержанию основных петроокислов SiO_2 77,51-81,85%, TiO_2 0,04-0,15%, Al_2O_3 10,05-11,47%, FeO 0,28-0,43%, MgO 0,04-0,16%, CaO 0,31-0,65%, K_2O 5,16-6,59%, соотношению $\text{Ca}/(\text{Na}+\text{K})$ 0,04-0,07, отношению K/Rb 330-354, а также значению индикаторных петрохимических коэффициентов f^* 0,83-0,94, AG 0,73-0,87 близки гранитам А-типа [7, 8]. Соответственно, на диаграмме типизации гранитоидов [9] точки состав пород Хотугу-Экитского массива намечают тренд из поля гранитов S-типа в поле А-типа (рис. 4 а). А по соотношению $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}} \times 5 - (\text{CaO}+\text{MgO}) \times 5$ [10] породы массива отвечают только гранитам А₂-типа (рис. 4 б). Стоит отметить, что в непосредственной близости от выходов Хотугу-Экитского массива, на территории Оленекского выступа получили свое развитие такие массивы гранитоидов как Ортоку-Экитский и Сололийский, которые имеют заметные отличия петрохимических параметров составов от последнего (рис. 3, 4) и относятся к I и S-типам гранитов [1].

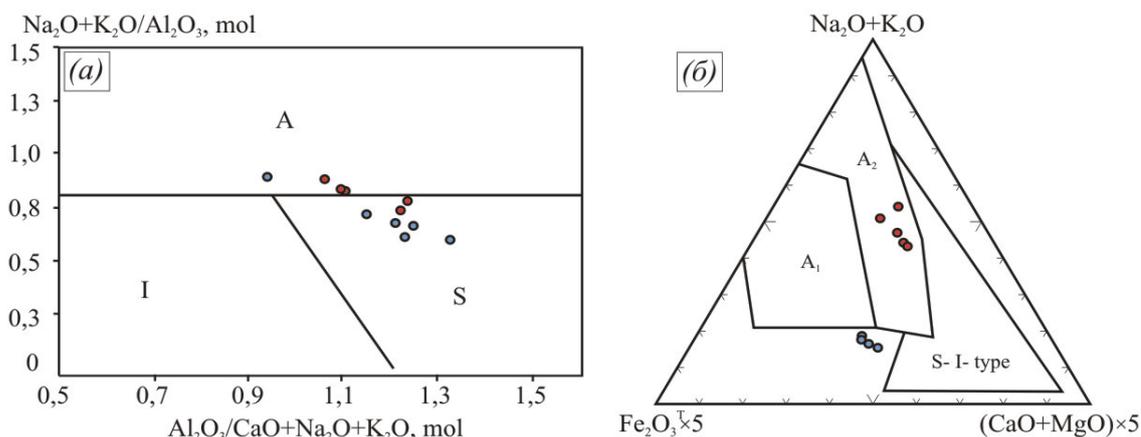


Рисунок 4 – а – типизация пород гранитоидного состава, поля по [9] А, I, S – петрогенетические типы гранитоидов; б – диаграмма $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})\text{-Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}} \times 5\text{-(CaO+MgO)} \times 5$ для гранитов, поля по [10], A_1 , A_2 , I, S – петрогенетические типы гранитоидов.

3. Выводы

Таким образом, исходя из полевых и петрографических наблюдений выявлено, что породы Хотугу-Экитского массива сложены существенно лейкократовыми, микроклиновыми гранитами с преобладающей гипидиоморфнозернистой структурой. Массив монотонен по своему составу т.е. становление последнего происходило в один этап. По содержанию основных петроокислов, значению их отношений и соотношений, значениям основных индикаторных петрохимических коэффициентов породы массива наиболее близки к плюмазитовым гранитам A_2 -типа высококалиевой известково-щелочной петрохимической серии.

4. Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-20033

5. Литература

- [1] Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Mazukabzov A.M. Early Proterozoic granitoids of the Olenek complex (northern part of the Siberian craton): petrogenesis and geodynamic position // *Geology and Geophysics*. – 2018. – V. 59. – No. 3. – P. 286-299.
- [2] Smetannikova L.I., Grinenko V.S., Malanin Yu.A., Prokopjev A.V. State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). Anabar-Vilyui series. Sheet R-51 – Jarjan. Explanatory note. St. Petersburg: VSEGEI. (2013).
- [3] Middlemost E.A.K. *Magma and Magmatic Rocks. An Introduction to Igneous Petrology*. – London; New York: Longman, 1985. – 266 p.
- [4] *Petrographic Code of Russia*. – St. Petersburg: VSEGEI, 2009. – 200 p.
- [5] Peccerillo A., Taylor S.R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from Kastamonu area, Northern Turkey // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 1976. – V. 58. – P. 63-81.
- [6] Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J., Arculus R.J., Ellis D.J., Frost C.D. // *Journal of Petrology*. – 2001. – V. 42. – № 11. – P. 2033-2048.
- [7] Collins, W.J., Beams, S.D., White, A.J.R., Chappell, B.W. Nature and origin of A-type granite with particular reference to southeastern Australia // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 1982. – 80. – P. 189-200.
- [8] Nenakhov V.M., Ivannikov V.V., Kuznetsov L.V., Strik Yu.N. Features of the study and geological mapping of collisional granitoids. – M.: Roskomnedra, 1991. – 101 p.
- [9] Maeda J. Opening of the Kuril Basin deduced from the magmatic history of Central Hokkaido, northern Japan // *Tectonophysics*. – 1990. – N 174. – P. 235-255.
- [10] Grebennikov A.V. A-type granitoids: problems of diagnostics, formation and systematics // *Geology and Geophysics*. – 2014. – V.55. – No. 9. – P. 1356-1373.

**ПЕТРОГРАФИЯ МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОД ЭВОТИНСКОГО МАССИВА
(АЛДАНО-СТАНОВОЙ ЩИТ, ЮЖНАЯ ЯКУТИЯ)**

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

**PETROGRAPHY OF IGNESSIVE ROCKS OF THE EVOTA MASSIF (ALDAN
SHIELD, SOUTHERN YAKUTIA)**

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

Annotation. The paper considers the petrographic composition of the igneous rocks of the Evota massif, the outcrop area of which is 100 km². As a result of field and petrographic studies, it was found that the Evota massif has a two-phase structure, the compositions of which have clear differences. Quartz syenites are represented by essentially leucocratic (the content of mafic minerals is not more than 10%) rocks. Formations of the next phase in terms of the ratio of plagioclase to K-feldspar content, as well as the clear idiomorphism of oligoclase to orthoclase phenocrysts, are attributed to monzonites. According to the geological position (clear contact between the phases), the sequence of intrusion was revealed, presented in the following form: the first phase is quartz syenites, the second is monzonites. Based on the results of the research, a conclusion was made about the antiodromic nature of the introduction of rocks.

1. Введение

Мезозойский магматизм Алдано-Станового щита отличается спецификой и исключительным многообразием состава изверженных пород и представлен образованиями монцонит-сиенитовой, лейцит-щелочносиенитовой, щелочно-базитовой, гранит-гранодиоритовой формаций, слагающими массивы, штоки, лакколлиты, силлы, дайки, жилы, нежки 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. [2]. Несмотря на длительный период изучения мезозойского щелочного магматизма Алдано-Станового щита, [3,4,5 и др.] многие вопросы эволюции, связанные с мезозойской активизацией территории и особенно металлогении магматических пород, остаются дискуссионными. В этом плане актуальным является изучение отдельных многофазовых массивов, каковым является Эвотинский плутон. В пределах Центрально-Алданского рудного района с подобными многофазовыми структурами, образовавшимися в период мезозойской тектономагматической активизации, связаны многочисленный золоторудные проявления [6].

2. Геология и петрография Эвотинского массива

Мезозойский щелочной и умеренно щелочной интрузивный магматизм в пределах Эвотинского рудного района представлен как небольшими массивами (Медведевский, Таежный, Михайловский и др.), так и крупным Эвотинским плутоном площадь выходов которого на дневную поверхность составляет 100 км² (рис. 1 а). По материалам предшественников, в частности В.Г. Амарского [7] в составе массива выделяются две фазы пород – авгитроговообманковые кварцевые сиенит-порфиры и роговообманковые граносиенит-порфиры. В южной части массив осложняется многочисленными субгоризонтальными апофизами, образующими силлы мощностью до 40 м и протяженностью в первые километры. Северные контакты массива с породами фундамента прямолинейные, приспособленные к разломам СВ и СЗ простираний, но не тектонического, а интрузивного характера. Вмещающие породы

северных контактов массива катаклазированы, милонитизированы, тогда как в эндоконтактовых частях эти изменения не наблюдаются [7]. По нашим полевым и петрографическим наблюдениям, установлено, что составы пород массива имеют заметное отличие от описанных в работах предшественников.

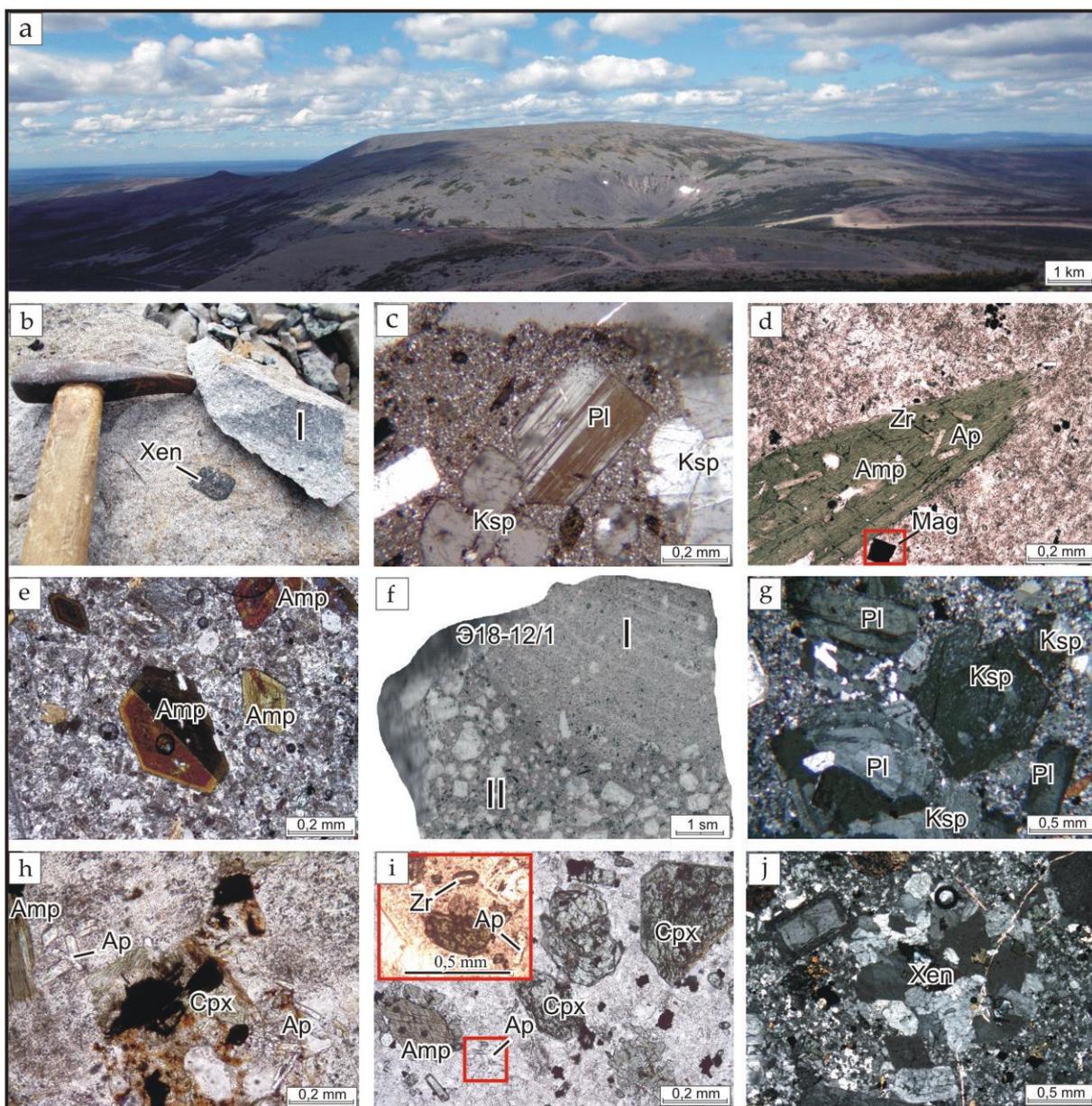


Рисунок 1 – Породы, участвующие в строение Эвотинского массива.

а – общий вид массива, б – кварцевые сиениты I, с – полисинтетический двойник олигоклаза в сиените. Увел. 40, николи+, д – кристалл роговой обманки с включениями акцессорных минералов. Увел. 100, николи-, е – кристаллы баркевикита простых и сдвойникованных зерен в сиените. Увел. 40, николи+, ф – кварцевые сиениты I, монцониты II, г – идиоморфизм плагиоклаза относительно КПШ в монцонитах. Увел. 40, николи+, h – кристаллы роговой обманки, измененного пироксена, а также скопления апатита в монцонитах. Увел. 40, николи-, i – Кристаллы авгита, верхнем левом углу кристаллы циркона и апатита в монцоните. Увел. 40, 100, николи-, j – ксенолит гранита в монцонитах. Увел. 40, николи+.

Кварцевые сиениты Эвотинского массива представлены светло-серыми, розовато-серыми, лейкократовыми породами, содержащими не более 10% темноцветных минералов. Структура – порфировая, текстура массивная (рис. 1 б). Породы фазы характеризуются низким содержанием ортоклаза – 35%, высоким – олигоклаза 55%, содержанием кварца – 5%, роговой обманки,

баркевикита – 10%, аксессуарных апатита, циркона, магнетита – 2% и рудных минералов до – 3%.

Калиевый полевой шпат (ортоклаз) двух генераций. Первая – собственно порфиновые идиоморфные кристаллы ортоклаза более 1 см (видимая часть в шлифе) таблитчатой формы (рис. 1 с). Характерны каймы плавления. Периферические и/или ядерные части зерен частично замещены продуктами вторичных изменений (пелитизация) из-за чего приобретают буроватые и темно бурые тона. Вторая генерация в основной массе представлена более мелкими трудно диагностируемыми зернами ортоклаза с неровными очертаниями, а также неправильной вытянутой формы, наряду с мелким плагиоклазом. Олигоклаз представлен двумя генерациями, ранняя из которых выделяется крупными идиоморфными, порфировыми кристаллами, для которых характерны полисинтетические двойники и зональные индивиды частично подверженные серицитизации, имеющие каймы плавления (рис. 1 с). Поздняя генерация – мелкие неправильной формы вытянутые кристаллы основной массы, с едва заметным полисинтетическим двойникованием, сильно изменены вторичными процессами. Кварц встречается как в основной массе в виде бесформенных, иногда остроугольных зерен, занимающих межзерновое пространство в основной массе. Амфибол в виде роговой обманки имеет хорошую спайность угол между направлениями спайности 120° (в зависимости от среза). Большинство кристаллов удлиненно призматической формы, а также в виде неправильной формы кристаллов с резким плеохроизмом от желтовато-зеленого до темно-буро-зеленого цветов, имеет зональное строение. Редко в виде моноскоплений. Зачастую несет в себе апатит и циркон. Редкий магнетит представлен кристаллами кубической формы (рис. 1 d) Неравномерно распределен по породе. Стоит отметить незначительное присутствие баркевикита в виде простых и сдвойникованных зерен (рис. 1 e). Цвет плеохроизма светло-коричневый-желтый.

Монцониты (рис. 1 f) Эвотинского массива имеют порфировую, монцонитовую структуры на фоне гипидиоморфнозернистой основной массы. Вкрапленники представлены плагиоклазом, КПШ и темноцветными минералами. Состав пород: альбит, олигоклаз – 40%, ортоклаз – 35%, темноцветные минералы роговая обманка, авгит – 15%, рудные минералы – 5%, аксессуарные апатит, циркон – 2%, кварц – 3%. Основная масса сложена олигоклазом, ортоклазом и роговой обманкой. Плагиоклаз двух генераций. Первая – в виде идиоморфных вкрапленников альбита и олигоклаза призматической формы с полисинтетическим двойникованием, зонального строения, с косым погасанием, вторая генерация в виде мелких кристаллов олигоклаза основной массы. В породах второй фазы отмечаются индивиды вкрапленников плагиоклаза с недоразвитыми гранями, незакономерно прирастающими друг к другу. Стоит отметить идиоморфизм плагиоклаза относительно КПШ, обуславливающий монцонитовую структуру (рис. 1 g). Ортоклаз также двух генераций. Ранняя из которых представлена порфировыми кристаллами призматической формы в виде простых двойников, поздняя – мелкими зернами основной массы. Призматические, обломанные вкрапленники амфибола в виде роговой обманки имеют размеры до 0,4 мм, угол погасания до 30° - 45° , отчетливо плеохроирует до коричневого цвета, спайность несовершенная, с сильной интерференционной окраской (рис. 1h). Минерал имеет неравномерное распределение по породе. Пироксен (авгит) встречается в виде сильно измененных кристаллов удлиненной формы слабо травяно-зеленого цвета со слабым плеохроизмом (рис. 1 i). Размеры кристаллов до 0,3 мм, границы последних часто не ровные, цвета интерференции 2-3 порядка. Рудный минерал развит по амфиболу и пироксену, а также в виде самостоятельных индивидов, неравномерно распределенных по породе. Апатит отмечен в виде короткостолбчатых так и удлиненных кристаллов. Как в виде включений в роговой обманке, так и в качестве самостоятельных зерен, погасание прямое, отдельность по (001). Циркон бесцветный до светло-бурого, с характерными плеохроичными двориками (рис. 1 h, i). Единичные зерна кварца имеют неправильные формы, с облачным погасанием, на ряду с КПШ и плагиоклазом выполняет базис основной массы. Ксенолит содержащийся в породе, гранитного состава (рис. 1 j).

В результате полевых и петрографических исследований нами установлено, что Эвотинский массив имеет двух фазовое строение. Одна из фаз представлена существенно лейкократовыми

(содержание темноцветных минералов не более 10%) кварцевыми сиенит порфирами. Породы следующей фазы по отношению содержаний плагиоклазов к КПШ, а также по четкому идиоморфизму вкрапленников олигоклаза к ортоклазу, является монцонитами. Последовательность внедрения согласно геологической позиции (четкий контакт между фазами) определяется следующим образом: первая фаза кварцевые сиениты, вторая – монцониты (рис. 1 f). То есть, в строение Эвотинского массива наблюдается антидромный характер внедрения пород. Стоит отметить, что антидромные ряды характерны для структур, закладывающихся на прогретой после предшествующего цикла магматизма континентальной коре. Характерными примерами являются окраинные моря и континентальные рифты, возникающие непосредственно после орогенеза (эпиорогенные рифты). В них с начала магматических циклов возникают мантийно-коровые и коровые породы среднего и кислого состава, сменяясь основными по мере разрушения (деструкции) континентальной коры. В случае если этот процесс заходит достаточно далеко, как, например, в окраинных морях, то континентальная кора в результате сложного комплекса процессов, включающих растяжение, сменяется океанической [8,9].

3. Выводы

Таким образом, можно сделать один из основных выводов, что в строении Эвотинского массива четко выделяются две фазы внедрения: первая – кварцевые сиениты и вторая – монцониты. То есть, в строение Эвотинского массива отмечается отчетливый антидромный характер внедрения пород, отвечающий условиям образования континентальных рифтов.

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) // *Pacific Geol.* – 2010. – 29. – P. 3-26.
- [2] Vetluzhskikh, V.G.; Kazanskii, V.I.; Kochetkov, A.Y.; Yanovskii, V.M. *Geol. ore Depos.* – 2002. – 44. – P. 467-499.
- [3] Kononova, V.A.; Pervov, V.A.; Bogatikov, O.A.; Myus-Shumaher, U.; Keller, I. Mesozoic Potassium Magmatism of Central Aldan: Geodynamics and Genesis // *Geotectonics.* – 1995. – P. 35-45. (In Russian)
- [4] Dvornick, G.P. Gold-Ore Metasomatic Formations of the Central-Aldan Region // *Lithosphere.* – 2012. – 2. – P. 90-105.
- [5] Kochetkov, A.Y. Mesozoic Gold-Bearing Ore-Magmatic Systems of Central Aldan // *Geol. i Geofiz.* – 2006. – 47. – P. 850-864.
- [6] Gusev, A.I. *Petrology of Gold-Forming Magmatism.* – Moscow: Natural sciences academy, 2012. – P. 147.
- [7] Amarsky V.G. On the connection between ore formation and magmatism. (on the example of the Evotinsky district of the Aldan shield). – *Izvestia Z a. Baikal branch of the Geographical Society of the USSR.* – 1971. – V. 7. – No. 2. – P. 11-18.
- [8] Taylor, S.R. and McLennan, S.M. *Continental crust: composition and evolution.* – Moscow: Mir, 1988. – 384 p. (translated from English).
- [9] Frolova T.I., Perchuk L.L., Burikova I.A. *Magmatism and transformation of the earth's crust of active margins.* – M.: Nedra, 1989. – 261 p.

**МЕТАСОМАТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В КСЕНОЛИТЕ
АЛМАЗОНОСНОГО ПЕРИДОТИТА ИЗ ТРУБКИ МИР**

Александр Иванов¹, Здислав Специус²

1 ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет»,
199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2
2 ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39

**METASOMATIC TRANSFORMATIONS IN XENOLITH OF DIAMONDIFEROUS
PERIDOTITE FROM THE MIR KIMBERLITE PIPE**

Alexander Ivanov¹, Zdislav Spetsius²

1 Saint-Petersburg Mining University, 2, 21st Line, Vasilievsky island, St. Petersburg, 199106, Russia
2 Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia

Annotation. The phase transformations of the mineral composition of diamond-bearing mantle xenolith, represented by garnet peridotite, from the kimberlite pipe Mir under the influence of metasomatising mantle fluids have been studied. Olivine, the main rockforming mineral of the xenolith, is replaced by serpentine, forming characteristic pseudomorphoses. In the process of metasomatic transformations (secondary changes), easily migrating elements with small ionic radius (iron and nickel) are removed from the olivine lattice. Thus, during the metasomatoses of mantle xenoliths in kimberlites and, possibly, during the rise and cooling of other ultrabasic melts in upper mantle conditions, fluxes of volatile chemical elements such as chlorine, sulfur and phosphorus are formed.

1. Введение

Несомненно, что мантийные алмазосодержащие ксенолиты важны не только для понимания условий алмазообразования, но и для расшифровки условий протекания процессов в мантии, в том числе мантийного метасоматоза. С этой точки зрения, исследование минерального состава гранатового перидотита с алмазами из трубки Мир имеет первостепенное значение для понимания мантийных процессов. Это тем более важно учитывая то, что алмазосодержащие перидотиты крайне редки. В частности, в кимберлитовой трубке Мир, до настоящего времени найдено всего лишь три образца этого рода уникальных ксенолитов [1-3]. Представляемая публикация базируется на результатах детальных исследований фазовых минеральных преобразований в ксенолите уникального алмазосодержащего мантийного гранатового перидотита из кимберлитовой трубки Мир (обр. М-12). Определение состава минералов ксенолита осуществлялось с использованием микрозонда JXA-8230 в стандартных условиях в НИГП АК «АЛРОСА».

2. Основной раздел статьи

Изучены фазовые преобразования минерального состава алмазосодержащего мантийного ксенолита, представленного гранатовым перидотитом, под воздействием метасоматизирующих мантийных флюидов. При этом, оливин — основной породообразующий минерал данного ксенолита, замещается серпентином, образующим характерные псевдоморфозы по оливину с сохранением редких реликтов исходного минерала. Оливин — характерный породообразующий минерал ультраосновных ксенолитов в кимберлитах, магнезиально-железистый силикат с формулой $(Mg, Fe)_2[SiO_4]$. Он образует группу или ряд оливина. Химический состав минералов группы оливинов в кимберлитах обычно характеризуется стабильными повышенными содержаниями никеля от 0,3 до и, редко, более 0,4 вес. % и на уровне около 10 вес. % окиси железа. Содержания окиси магния составляют около 50 весовых % и около 40% составляет окись кремния. В процессе метасоматических преобразований (вторичных изменений) из решетки

оливина выносятся легко мигрирующими элементами с малыми ионными радиусами - железо и никель. Таким образом, в процессе метасоматоза мантийных ксенолитов в кимберлитах и, возможно, при подъеме и остывании других ультраосновных расплавов в верхнемантийных условиях образуются потоки летучих химических элементов, таких как хлор, сера и фосфор. Возгоняемые летучие химические элементы (хлор и сера) легко соединяются с элементами группы железа, в особенности железом и никелем, выносимыми из решетки оливинов. Часть вынесенного железа и никеля минерализуется в псевдоморфозах оливина в виде мелких выделений сульфидов (рис.1), размеры которых составляют единицы микрон. В некоторых случаях они образуют удлинённые цепочки, свидетельствующие об их взаимосвязи с потоками метасоматизирующих флюидов, что хорошо просматривается на приведенном снимке.

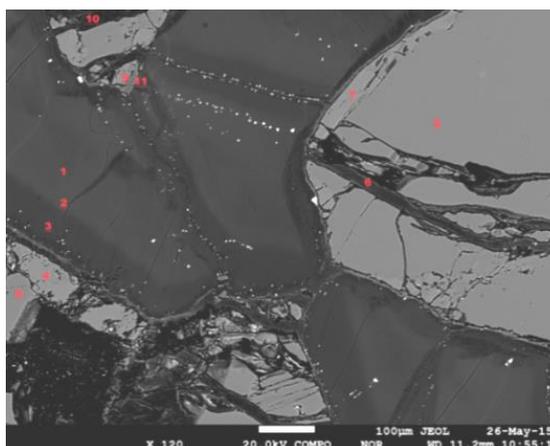


Рисунок 1 – Фотография в фазовом контрасте (режим СОМРО) фрагмента ксенолита алмазонасного перидотита из трубки Мир (обр. М-12). Четко прослеживаются две цепочки сульфидов в серпентине, совпадающие по направлению с флюидными прожилками в гранате.

Кристаллики сульфидов хорошо видны на фотографии в виде отдельных белых точек в псевдоморфозах оливина. Ниже приведена таблица составов минералов (Таблица 1), которые определены в точках аншлифа ксенолита на вышеприведенном рисунке (Рисунок1).

Таблица 1 – Составы минеральных неоднородностей в ксенолите гранатового перидотита из трубки Мир (обр. М-12).

| № | MnO | MgO | Na ₂ O | TiO ₂ | Cr ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | FeO | CaO | K ₂ O | Cl | SO ₃ | Sc ₂ O ₃ | Сумм. | Мин. |
|----|-----|------|-------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|-----|------|------------------|-----|-----------------|--------------------------------|-------|------|
| 1 | 0,1 | 33,8 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,5 | 38,7 | 7,9 | 0,3 | 0,1 | 1,5 | 0,1 | 0,0 | 83,2 | Sp1 |
| 2 | 0,2 | 32,8 | 0,0 | 0,0 | 0,2 | 0,7 | 38,2 | 8,7 | 0,3 | 0,0 | 1,6 | 0,1 | 0,0 | 82,7 | Sp1 |
| 3 | 0,1 | 35,9 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,5 | 39,7 | 6,1 | 0,3 | 0,0 | 1,2 | 0,1 | 0,0 | 84,0 | Sp1 |
| 4 | 0,1 | 15,5 | 4,0 | 0,3 | 3,1 | 2,1 | 53,4 | 1,3 | 20,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 100,6 | Срх1 |
| 5 | 0,1 | 10,1 | 4,1 | 0,3 | 2,1 | 6,2 | 53,6 | 1,6 | 14,9 | 1,7 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 94,7 | Срх1 |
| 6 | 0,0 | 37,8 | 0,1 | 0,0 | 0,4 | 0,7 | 39,6 | 3,3 | 0,2 | 0,0 | 0,7 | 0,1 | 0,0 | 82,7 | Sp2 |
| 7 | 0,1 | 15,3 | 5,2 | 0,2 | 3,1 | 2,9 | 53,6 | 1,3 | 19,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 101,6 | Срх2 |
| 8 | 0,0 | 13,7 | 7,1 | 0,2 | 2,9 | 4,1 | 53,9 | 1,2 | 18,5 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 101,8 | Срх2 |
| 9 | 0,0 | 39,6 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,4 | 42,1 | 1,7 | 0,1 | 0,0 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 84,3 | Sp2 |
| 10 | 0,1 | 20,7 | 10,3 | 0,6 | 1,0 | 4,4 | 53,0 | 2,2 | 7,6 | 1,3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 101,4 | Срх3 |

Примечание: Sp – серпентин, Срх - клинопироксен

Ниже, на рисунке (Рисунок 2), представлен рентгеновский линейный профиль по железу и хлору через зерно измененного оливина - замещенного серпентином и основные спектральные линии регистрируемых химических элементов.

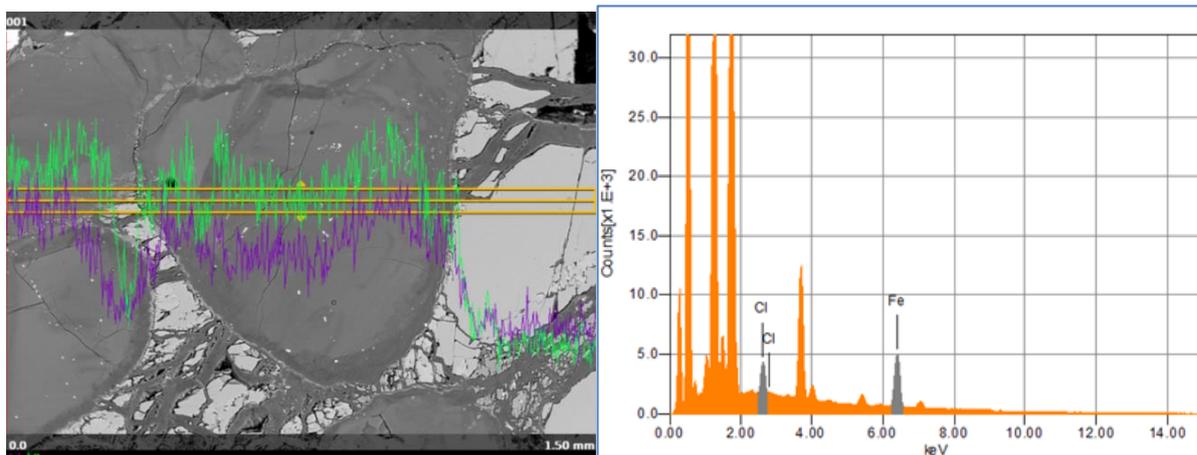


Рисунок 2 – Линейный профиль характеристического излучения хлор и железа через зерно измененного оливина, расположенного в виде включения в гранате (обр. М-12).

В процессе серпентинизации оливина хлор проникает в структуру серпентина, где он соединяется в паре с атомами железа, это подчеркивается высоким коэффициентом корреляции (+0,99) хлора с железом и на фотографии сканирующего линейного профиля через псевдоморфозу по оливину (см. Рисунок 2).

Таблица 2 – Корреляционная матрица химических элементов состава минералов ксенолита М-12.

Корреляции (m12c15)

Отмеченные корреляции значимы на уровне $p < 0,05000$

N=21 (Построчное удаление ПД)

| | MnO | MgO | NiO | Na ₂ O | TiO ₂ | Cr ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | FeO | CaO | K ₂ O | Cl | P ₂ O ₅ | SO ₃ | Sc ₂ O ₃ |
|--------------------------------|------|------|------|-------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|------|------|------------------|------|-------------------------------|-----------------|--------------------------------|
| MnO | 1,0 | 0,2 | -0,1 | -0,3 | -0,1 | -0,4 | -0,3 | -0,5 | 0,8 | -0,4 | -0,1 | 0,8 | -0,2 | 0,4 | -0,1 |
| MgO | 0,2 | 1,0 | -0,4 | -0,8 | -0,5 | -0,9 | -0,8 | -0,9 | 0,6 | -0,9 | -0,2 | 0,7 | -0,4 | 0,8 | -0,2 |
| NiO | -0,1 | -0,4 | 1,0 | 0,7 | 0,9 | 0,4 | 0,8 | 0,5 | -0,3 | 0,2 | 0,9 | -0,5 | 0,4 | -0,3 | -0,2 |
| Na ₂ O | -0,3 | -0,8 | 0,7 | 1,0 | 0,7 | 0,6 | 0,7 | 0,9 | -0,7 | 0,6 | 0,6 | -0,8 | 0,5 | -0,7 | 0,0 |
| TiO ₂ | -0,1 | -0,5 | 0,9 | 0,7 | 1,0 | 0,5 | 0,8 | 0,5 | -0,4 | 0,3 | 0,7 | -0,5 | 0,2 | -0,4 | -0,1 |
| Cr ₂ O ₃ | -0,4 | -0,9 | 0,4 | 0,6 | 0,5 | 1,0 | 0,8 | 0,8 | -0,7 | 1,0 | 0,2 | -0,8 | 0,3 | -0,8 | 0,2 |
| Al ₂ O ₃ | -0,3 | -0,8 | 0,8 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 1,0 | 0,6 | -0,6 | 0,7 | 0,5 | -0,7 | 0,3 | -0,6 | 0,0 |
| SiO ₂ | -0,5 | -0,9 | 0,5 | 0,9 | 0,5 | 0,8 | 0,6 | 1,0 | -0,8 | 0,8 | 0,3 | -0,9 | 0,4 | -0,8 | 0,2 |
| FeO | 0,8 | 0,6 | -0,3 | -0,7 | -0,4 | -0,7 | -0,6 | -0,8 | 1,0 | -0,7 | -0,2 | 1,0 | -0,2 | 0,6 | -0,2 |
| CaO | -0,4 | -0,9 | 0,2 | 0,6 | 0,3 | 1,0 | 0,7 | 0,8 | -0,7 | 1,0 | 0,0 | -0,7 | 0,3 | -0,8 | 0,3 |
| K ₂ O | -0,1 | -0,2 | 0,9 | 0,6 | 0,7 | 0,2 | 0,5 | 0,3 | -0,2 | 0,0 | 1,0 | -0,3 | 0,4 | -0,1 | -0,3 |
| Cl | 0,8 | 0,7 | -0,5 | -0,8 | -0,5 | -0,8 | -0,7 | -0,9 | 1,0 | -0,7 | -0,3 | 1,0 | -0,3 | 0,7 | -0,2 |
| P ₂ O ₅ | -0,2 | -0,4 | 0,4 | 0,5 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,4 | -0,2 | 0,3 | 0,4 | -0,3 | 1,0 | -0,2 | 0,2 |
| SO ₃ | 0,4 | 0,8 | -0,3 | -0,7 | -0,4 | -0,8 | -0,6 | -0,8 | 0,6 | -0,8 | -0,1 | 0,7 | -0,2 | 1,0 | -0,1 |
| Sc ₂ O ₃ | -0,1 | -0,2 | -0,2 | 0,0 | -0,1 | 0,2 | 0,0 | 0,2 | -0,2 | 0,3 | -0,3 | -0,2 | 0,2 | -0,1 | 1,0 |

Примечание: Красным цветом в таблице 2 выделены корреляционные коэффициенты, которые называют значимые, так как 95% определений попадают в доверительные интервал корреляционной линии.

Вследствие чрезвычайно высокой реакционной способности хлор встречается в свободном виде только в вулканических газах. В связанном виде хлор находится в горных породах, в морской, речной и озерной водах, в растительных и животных организмах [4]. Кимберлитовые трубки прорывают толщи горных пород и захватывают минералы содержащие хлор (в том числе и солевые толщи). Такой процесс образования кимберлитов может объяснить содержание

минерала галита (NaCl) в составе основной массы кимберлитов, но этого недостаточно для объяснения повышенных содержаний хлора в ореолах кимберлитовых трубок. Ореолы с повышенными содержаниями хлора вокруг кимберлитовых трубок можно объяснить тем, что кимберлитовые тела – это древние вулканы, в которых хлор поступал из мантийных глубин в свободном виде [5, 6] и вступал в реакцию с минералом оливином, преобразовывая его в серпентиновые псевдоморфозы по оливину. Не исключено, что процесс глубинного мантийного метасоматоза, происходящий под воздействием мантийных флюидов, сопровождается или происходит также при активном участии углеводородов в составе восходящих флюидов. Таким образом, вполне возможен и процесс образования углеводородов (нефти), который происходил параллельно с метасоматическим преобразованием оливинов в серпентин, о чем косвенно свидетельствуют обильные выделения нефти на глубоких уровнях кимберлитовых трубок, фиксируемые при их отработке (Рисунок 3). На приведенной фотографии показан забой в кимберлитовой трубке Интернациональная на глубине более 1700 метров от поверхности. По наблюдениям геологов, нефтью пропитана вся кимберлитовая порода, при этом нефть не вытекает, а высачивается из кимберлита. Характерных трещин не отмечено, нефть поступает из шнуров или просто из каверн кимберлитового массива.



Рисунок 3 – Шнуровидные выделения нефти в кимберлите трубки Интернациональная (фото главного геолога шахты А.Т. Илькова).

3. Заключение и выводы

Гипотетическое объяснение anomalно повышенных концентраций хлора в кимберлитах и во вмещающих их породах может заключаться в схожем геохимическом поведении хлора в процессе внедрения кимберлитов аналогично эманациям и минералообразованию в продуктах современного вулканизма. Деятельность вулканов сопровождается различными газово-флюидными эманациями, так называемыми - фумаролами, представляющими собой, в основном, пары и флюиды разнообразных летучих компонентов: хлорида железа, хлорида натрия, окиси железа, двуокиси серы, хлористого водорода, сероводорода, углекислого газа, серы, хлористого аммония, борной кислоты, фтористых соединений, а также незначительного количества благородных металлов, металлов и полуметаллов [7]. Самыми распространёнными продуктами этих процессов являются соединения хлора, которые по трещинам и небольшим отверстиям в кратере вулкана или на его склонах выделяются из магмы и ещё не остывших лавовых потоков, пронизывают вмещающие породы и просачиваются на поверхность, образуя различные минеральные образования. Возможно, что подобным процессам обязаны своим существованием и первичные ореолы хлора вокруг кимберлитовых трубок. Другим

объяснением аномальных содержаний хлора вокруг кимберлитовых трубок может являться его накопление в тектонически ослабленных зонах вмещающего цоколя за счет перераспределения осадочного хлора под действием минерализованных глубинных флюидов.

Соответственно, в процессе метасоматоза мантийных ксенолитов в кимберлитах и, возможно, при подъеме и остывании других ультраосновных расплавов в верхнемантийных условиях образуются флюидные потоки летучих химических элементов, таких как хлор, сера и фосфор. Не исключена также вероятность образования углеводородов, при метасоматическом преобразовании оливинов и их серпентинизации в ультрамафитах под воздействием глубинных флюидов.

4. Литература

- [1] Ponomarenko A.I. The first discovery of garnet-ilmenite peridotite with diamonds from the kimberlite pipe "Mir" // DAN USSR. – 1977. – Vol. 235. – No. 4. – P. 914-917.
- [2] Ponomarenko A.I. The first find of diamond-bearing phlogopite pyroxenite (xenolith from the kimberlite pipe "Mir", Yakutia) // DAN USSR. – 1987. – Vol. 297. – No. 5. – P. 1210-1213.
- [3] Spetsius Z.V. Diamond-bearing xenolith of garnet peridotite from the kimberlite pipe Mir // DAN USSR. – 1990. – Vol. 313. – N 4. – P. 939-944.
- [4] Properties of elements. – Moscow: Publishing house "Ore and Metals", 2003. – Vol. 2. – 117 p.
- [5] Simonenko V.I., Vasilyeva V.I. Indicator properties of chlorine in the search for kimberlites by primary geochemical halos // Tez. dokl. IV Regional scientific. practical conference. – Mirny (Yakutia), 2014. – P. 209-211.
- [6] Taran Yu. A., Ustinov V. I., Grinenko V. A. Geochronological aspect of geochemistry of stable isotopes of thermal waters // DAN USSR. – 1989. – Vol. 308. – No. 4. – P. 963-966.
- [7] Fedotov S.A. Volcanology today and tomorrow // Volcanoes, events, people. – Petropavlovsk-Kamchatsky, 2002. – P. 30-32.

**О ВЕРТИКАЛЬНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ РАННЕИНДСКИХ АММОНОИДЕЙ В
ТИПОВОМ РАЗРЕЗЕ ТОМПОФИЦЕРАСОВЫХ СЛОЕВ ПРАВОБЕРЕЖЬЯ Р.
СЕТОРЫМ ЮЖНОГО ВЕРХОЯНЬЯ**

Афанасий Килясов, Руслан Кутыгин

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

**ON THE VERTICAL DISTRIBUTION OF EARLY INDIAN AMMONOIDS IN THE
TYPE SECTION OF TOMPOPICERASIC BEDS ON THE RIGHT BANK OF THE
SETORYM RIVER, SOUTHERN VERKHOYANIE**

Afanasiy Kilyasov, Ruslan Kutugin

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

Annotation. The *Tompophiceras* Beds of the Suol-Sliyanie section, located at the confluence of the Pravyi Suol and Levyi Suol creeks, have been studied in detail. Ammonoids in the section are unevenly encountered. The lower part of the *Tompophiceras* Beds (Member 7) is characterized by an exceptionally poor content of invertebrate remains and assigned to the *Tompophiceras pascoei* Zone according to literary sources. Member 8 contains the ammonoid association, including the species *Tompophiceras pascoei* (Spath), *T. aff. pascoei* (Spath), *T. gracile* (Spath) and *T. aff. gracile* (Spath), allowing us to assign Member 8 to the *Tompophiceras pascoei* Zone. The thickest Member 9 contains *Tompophiceras morpheos* (Popow) and *T. gerbaense* (Popow) typical of the *Tompophiceras morpheos* Zone. At the same time, the main part of the finds of ammonoids falls on the upper, more calcareous part of the member. The overlying Member 10, which contains *Tompophiceras morpheos* (Popow) and representatives of the genus *Metophiceras*, is assigned to the *Tompophiceras morpheos* Zone. The two nonammonoid upper members of the Lower Nekuchan Subformation are assigned to the *Tompophiceras* Beds by a high degree of conventionality.

1. Введение

В Аллах-Юньской структурно-фациальной зоне нижняя подсвита некучанской свиты биостратиграфически делится на две части – отоцерасовые и томпофицерасовые слои [1]. Отоцерасовые слои (*Otoceras* Beds) пограничного пермско-триасового интервала занимают нижнюю часть подсвиты [2] и содержат аммоноидей почти исключительно относящихся к роду *Otoceras*. Недавно в базальной части некучанской свиты басс. р. Дыбы нами были выделены слои с *Paramexioceras aldanense* [3, 4], взаимоотношение которых с отоцерасовыми слоями является предметом дальнейших исследований. Томпофицерасовые слои (*Tompophiceras* Beds) занимают верхнюю часть нижнекекучанской подсвиты и относятся к нижеиндскому подъярису. Этот интервал разреза разделен А.С. Дагисом и С.П. Ермаковой [5] на зоны *Tompophiceras pascoei* и *Tompophiceras morpheos* со стратотипами, расположенными в едином обнажении на руч. Лекеер бассейна р. Томпо. Стратотипы этих зон труднодоступны, поскольку их посещение требует вертолетной заброски. Поэтому томпофицерасовые слои нами были изучены в разрезах правобережья р. Сеторым, расположенных недалеко от федеральной автотрассы "Колыма". Изучение этих разрезов позволило уточнить вертикальное распространение аммоноидных комплексов.

2. Материал

Томпофицерасовые слои нами изучались в рамках комплексных межинститутских био- лито- и хемотратиграфических исследований опорных разрезов верхней перми и нижнего триаса, ежегодно проводившихся с 2016 по 2022 годы. Томпофицерасы обнаружены в разрезах по р.

Кобюме [6, 7], Кюрбелях, в правобережье р. Восточная Хандыга и левобережье р. Сеторым [8]. Однако наиболее представительные сборы амmonoидей были выполнены на руч. Суол правобережья р. Сеторым, где в береговых обрывах протягивается цепь обнажений нижнекучанской подсветы. Подсвета в полном объеме вскрывается в слиянии ручьев Правый и Левый Суол, где совмещающиеся обнажения PS (левый борт приустьевой части Правого Суола) и LS (правый борт приустьевой части Левого Суола) образуют единый разрез Суол-Слияние. Основные сборы амmonoидей приходятся на обнажение LS (его третий распадок). В коллекции диагностированы 74 экземпляра амmonoидей, собранных на различных стратиграфических уровнях (преимущественно в обн. LS), что позволило установить некоторые закономерности вертикального распределения таксонов в ключевом разрезе нижнего инда Аллах-Юньской структурно-фациальной зоны.

3. Результаты исследований и обсуждение

Томпофигерасовые слои по руч. Суол ранее были послойно описаны А.С. Дагисом с коллегами [9, 10], которые к этому интервалу отнесли слои 6–12 [10] суммарной мощностью 81.2 м. Многократные измерения Суольского разреза, проводившееся нами в разные годы, и сопровождавшиеся детальным отбором проб для геохимических исследований, показали, что рассматриваемый интервал обладает существенно меньшей мощностью, равной 43 м. Вся нижнекучанская подсвета нами разделена на 11 пачек (пачки 2–12), которые прослеживаются по всему правобережью р. Сеторым. Отдельные пачки дополнительно разделены на слои с буквенными обозначениями. Томпофигерасовые слои отделяются от отоцерасовых наиболее мощным в нижнекучанской подсвете пластом пудинговых песчаников (1.8–2.2 м), обозначенным нами пачкой 6, а в литологических описаниях А.С. Дагиса с коллегами [9, 10] слоем 5. Хотя в этом пласте амmonoидеи не известны, традиционно он относится к кровле отоцерасовых слоев. Далее приводится сокращенное описание томпофигерасовых слоев разреза Суол-Слияние (обнажения PS и LS).

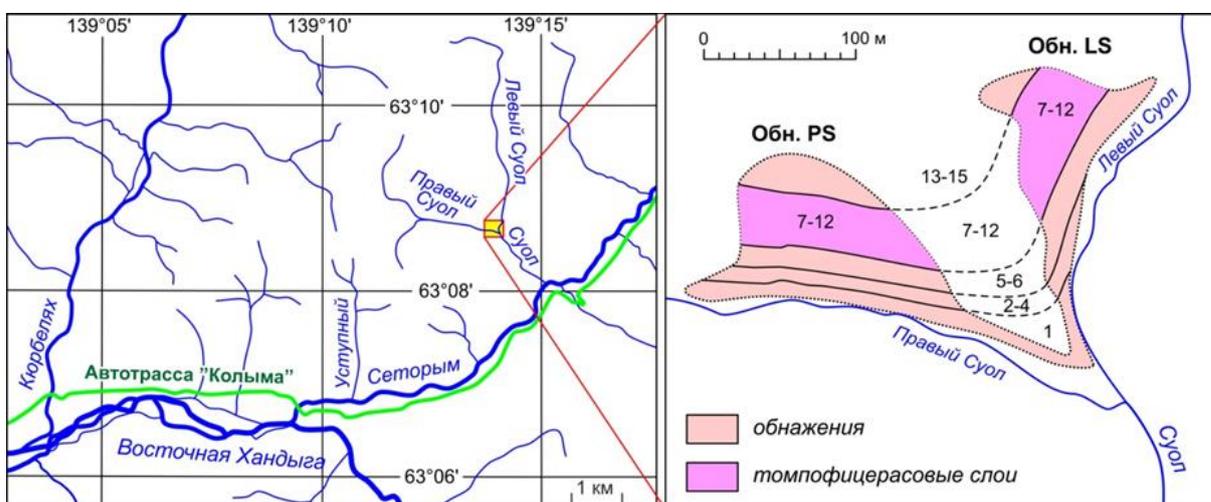


Рисунок 1 – Местоположение разреза Суол-Слияние (слева) и площади распространения томпофигерасовых слоев в обнажениях PS и LS (справа).

Пачка 7 (слой 6 по [9, 10]). Аргиллиты темно-серые мелкоалевритистые с относительно редкими небольшими, преимущественно лепешковидными, конкрециями. Остатки беспозвоночных исключительно редки – они представлены мелкими двустворками и гастроподами плохой сохранности. Поиски амmonoидей в этой пачке, проводившиеся нами в многочисленных разрезах басс. р. Сеторым, успехом не увенчались. Лишь в обн. LS в средние пачки 7 обнаружен отпечаток мелкой уплощенной раковины с тонким сигмоидальным поперечным орнаментом, отнесенной к *Hypophiceras?* sp. Мощность пачки 5.7 м. Пачка 8 разделена на два неравнозначных по мощности слоя.

Слой 8А (слой 7 по [9, 10]). Песчаники серые несортированные с обильным глинистым цементом и многочисленными включениями и линзочками темно-серых аргиллитов. Обломки, преимущественно кварцевого состава, обладают различной степенью окатанности и размерами до 1 мм, изредка до 2–4 мм. Нижняя граница более резкая, чем верхняя. Мощность слоя изменяется от 0.2 до 0.4 м, в среднем составляет 0.3 м. Фауна не обнаружена.

Слой 8В (слой 8 по [9, 10]). Аргиллиты темно-серые мелкоалевритистые с многочисленными карбонатно-кремнисто-глинистыми конкрециями разнообразной формы. На уровне 2–2.8 м ниже кровли слоя проявляется повышенная пиритизация породы, которая на выветрелой поверхности заметна в виде выдержанной заохрненной полосы. На этом же уровне приходится наиболее массовое распространение конкреций шаровидной формы, отличительной особенностью которых являются обильные включения пирита. Аммоноидеи встречены в интервале 3.2–5.3 м: *Tompophiceras pascoei* (Spath) (13 – здесь и далее количество экземпляров), *T. aff. pascoei* (Spath) (1), *T. gracile* (Spath) (12), *T. aff. gracile* (Spath) (1), *T. cf. gracile* (Spath) (3), *T. sp.* (5). Мощность слоя 6.8 м.

Пачка 9 (слои 9 и 10 (без верхней части) по [9, 10]) делится на три слоя.

Слой 9А (слой 9 по [9, 10]). Песчаники, аналогичные слою 8А. Мощность слоя 0.15–0.25 м, в среднем 0.2 м. Фауна не обнаружена.

Слой 9В (нижняя часть слоя 10 по [9, 10]) . Аргиллиты темно-серые мелкоалевритистые, плавно огрубляются вверх по разрезу, превращаясь в алевролиты мелкозернистые. При этом увеличивается степень биотурбации породы и усиливается роль ихнофоссилий. По всему слою рассеяны карбонатно-кремнистые конкреции, преимущественно лепешковидной формы. Аммоноидеи встречаются неравномерно. В интервале 1–1.6 м обнаружены *Tompophiceras ex gr. morpheos* (Porow) (1) и *T. sp.* (3). На уровне 9.6 м выше подошвы слоя в обнажении PS найдены *Tompophiceras morpheos* (Porow) (1), *T. cf. gerbaense* (Porow) (1), *Tompophiceras sp. 1* (1) и *Tompophiceras sp.* (3). В интервале 15.7–21 м присутствуют *Tompophiceras morpheos* (Porow) (7), *T. gerbaense* (Porow) (6), *T. cf. gerbaense* (Porow) (1), *T. sp. 1* (3), *T. sp.* (2).

Слой 9В (средняя часть слоя 10 по [9, 10]). Алевролиты серые мелкозернистые известковистые с обильными ихнофоссилиями. Характерны линзующиеся прослои (10–20 см) известкового аргиллита, выделяющиеся рыжевато-бурым цветом выветрелой поверхности. В описываемом разрезе аммоноидеями слой не охарактеризован, однако в аналогичном слое устьевой части руч. Суол (руч. Нижний) обнаружены *Tompophiceras morpheos* (Porow). Мощность слоя 1.3 м.

Пачка 10 (верхняя часть слоя 10 по [9, 10]). Алевролиты серые разномелкозернистые известковые с обильными ихнофоссилиями. Для слоя характерны скопления двустворок и конхостраков. В интервале 0.6–1 м найдены *Tompophiceras morpheos* (Porow) (3) и *Metoponiceras sp.* (6). Мощность пачки 4.2 м.

Пачка 11. Песчаники желтовато-серые мелкозернистые алевритистые горизонтальнослоистые. Фауна не обнаружена. Мощность пачки 0.5 м.

Пачка 12. Внизу алевролиты серые мелкозернистые крупноалевритистые, в средней и верхней частях относительно тонкое переслаивание разномелкозернистых алевролитов и песчаников с увеличением песчаной разности вверх по разрезу. Фауна не обнаружена. Мощность пачки 1.5 м.

Выше залегают песчаники верхненекучанской подсвиты.

4. Выводы

В изученном разрезе Суол-Слияние томпофицеровые слои характеризуются неравномерным распределением аммоноидей. Нижняя часть слоев (пачка 7) отличается исключительной бедностью остатками беспозвоночных – из аммоноидей здесь обнаружена лишь отпечаток мелкой раковины *Hypophiceras?* sp. Эта часть разреза может быть отнесена к зоне *Tompophiceras pascoei* только на основании указаний А.С. Дагиса и С.П. Ермаковой на находки вида-индекса [10]. В пачке 8 присутствует комплекс аммоноидей, включающий виды *Tompophiceras pascoei* (Spath), *T. aff. pascoei* (Spath), *T. gracile* (Spath) и *T. aff. gracile* (Spath), которые позволяют уверенно относить эту пачку к зоне *Tompophiceras pascoei*. Наиболее

мощная пачка 9 содержит виды *Tomphoceras morpheos* (Popov) и *T. gerbaense* (Popov), характерные для зоны *Tomphoceras morpheos*. При этом основная часть находок аммоноидей приходится на верхнюю, более известковистую, часть пачки. К указанной биостратиграфической зоне отнесена вышележащая пачка 10, в которой, помимо вида-индекса, появляются представители рода *Metophoceras*. Лишенные аммоноидей две верхние пачки нижненекучанской подсвиты к томпофицерасовым слоям относятся с большой долей условности.

5. Благодарности

Монографическое изучение аммоноидей выполнено за счет Российского научного фонда и Республики Саха (Якутия) (грант № 22-24-20112), <https://rscf.ru/project/22-24-20112/>, литостратиграфическое обоснование проведено за счет государственного задания ИГАБМ СО РАН (FUEM-2019-0002).

6. Литература

- [1] Kilyasov A., Kutugin R. On the lithological and biostratigraphic division of the Otoceras Beds on the right bank of the Setorym river, Southern Verkhoyanie // *Geology and Mineral Resources of Northeast Russia: Conference Proceedings*. – Yakutsk: SVFU, 2022. – P. 61-66.
- [2] 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. – P. 111-120.
- [3] Kutugin 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. – Vol. 27 (4). – P. 475-485.
- [4] Kutugin R.V., Kilyasov A.N., Biakov A.S. The first record of the goniatite genus *Paramexioceras* in the Changhsingian deposits of the Upper Permian in Northeastern Asia // *Doklady Earth Sciences*. – 2023. – Vol. 509. – P. 312-315.
- [5] Dagens A.S., Ermakova S.P. A Detailed Biostratigraphic Scheme of the Boreal Lower Triassic // *Stratigraphy and Geological Correlation*. – 1993. – Vol. 1. – P. 142-153.
- [6] Kutugin R.V., Budnikov I.V., Biakov A.S. et al. First findings of *Otoceras* (Ceratitida) in the Kobayama Zone of the Southern Verkhoyansk Region, Northeastern Russia // *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta-Seriya Estestvennyye Nauki*. – 2019. – Vol. 161. – No. 4. – P. 550-570.
- [7] Davydov V.I., Budnikov I.V., Kutugin R.V. et al. Possible bipolar global expression of the P3 and P4 glacial events of eastern Australia in the Northern Hemisphere: Marine diamictites and glendonites from the middle to upper Permian in southern Verkhoyanie, Siberia // *Geology*. – 2022. – Vol. 50. – No. 8. – P. 874-879.
- [8] 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 // *Morphogenesis, Environmental Stress and Reverse Evolution*. Cham, Switzerland, Springer Nature Switzerland AG. – 2020. – P. 197-231.
- [9] Dagens A.S., Dagens A.A., Kazakov A.M. et al. Biostratigraphy of the Lower Induan in the Eastern Verkhoyansk region // *Biostratigrafiya mezozoya Sibiri i Dal'nego Vostoka*. – Novosibirsk: Nauka, 1986. – P. 21-31.
- [10] Dagens A., Ermakova S. Induan (Triassic) Ammonoids from North-Eastern Asia // *Rev. Paleobiol.* – 1996. – Vol. 15. – No. 2. – P. 401-447.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ НОВЫХ ФОРМ МИКРОФОССИЛИЙ ВЕНДА ЯКУТИИ

Пётр Колосов¹, Ирина Охлопкова²

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

INTERPRETATION OF THE NEW FORMS OF MICROFOSSILS IN YAKUTIA

Petr Kolosov¹, Irina Okhlopkova²

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

Annotation. Scientific research on the fundamental question of the origin, development and ecology of the earliest forms of life on Earth is highly relevant. The papers on this issue in Siberia are very perspective, as proved by numerous published results. This article provides new factual material. In the Byuk formation of the Vendian (Ediacaran) of the Berezovsky trough in the southeast of the Siberian platform along the Torgo River (the left tributary of the Tokko River in the Olekma river basin), new forms of microfossils of excellent preservation were found in the silicified columnar stromatolites. They were extensively studied using a scanning electron microscope. By comparing the morphology of the found fossils with the modern microorganisms, it was possible to biologically interpret and systematically identify microfossils as microscopic foliose lichens. Yeast fungi lived on the surface of microscopic lamellar green algae as parasymbionts. It was a mild parasitism, i.e. parasymbiosis, which may have led to the development of early lichen later at that time.

1. Введение

Грибы на Земле появились примерно 1,3 млрд лет назад [1]. Происхождение лишайников как симбиотрофной группы И. В. Каратыгин [2] датирует концом ордовикского – началом силурийского периодов палеозоя (между 480–440 млн лет назад). Публикации о находках эдиакарских ископаемых лишайников возрастом около 600 млн лет [3] вызывали довольно серьезную критику, и дискуссия по этому вопросу так и не завершена [4].

В Березовском прогибе на юго-востоке Сибирской платформы распространена бюкская (порохтахская) свита верхнего венда. Обнаруженные в её столбчатых строматолитах (рис. 1) некоторые новые микрофоссилии характеризуются в настоящей статье. Они исследованы в аншлифах на СЭМ и петрографических шлифах (рис. 2). Сравнительно-морфологическим методом биологически интерпретированы и систематически идентифицированы с использованием самого распространенного и эффективного в научных исследованиях приёма – аналогии.

Бюкская свита согласно залегает на кэдэргинской свите венда и так же согласно перекрывается нохтуйской свитой нижнего кембрия [5, fig. 2]. По стратиграфическому положению она сопоставляется с тинновской свитой Уринского поднятия. Разрез бюкской свиты [5, fig. 2] сложен снизу вверх: базальными песчаниками гравелито-кварцевого состава мощностью до 3 м; местами строматолитовыми доломитами и известняками с прослоями аргиллитов. Мощность свиты 112–114 м. Бюкская (порохтахская) свита однозначно коррелируется с усть-юдомской свитой венда Учуро-Майского региона Восточной Сибири, датируемой Pb-Pb методом 553±23 млн лет [6].

2. Материал, его обсуждение и результаты

В настоящей статье характеризуются новые микрофоссилии, интерпретируемые как примитивные лишайники. Они найдены в тех же строматолитах столбчатой формы (рис. 1), в которых ранее были обнаружены и описаны зеленые водоросли и дрожжевые грибы [7, fig. 3, 4]; [8].



Рисунок 1 – Строматолит столбчатой формы, содержащий характеризующие лишайники.

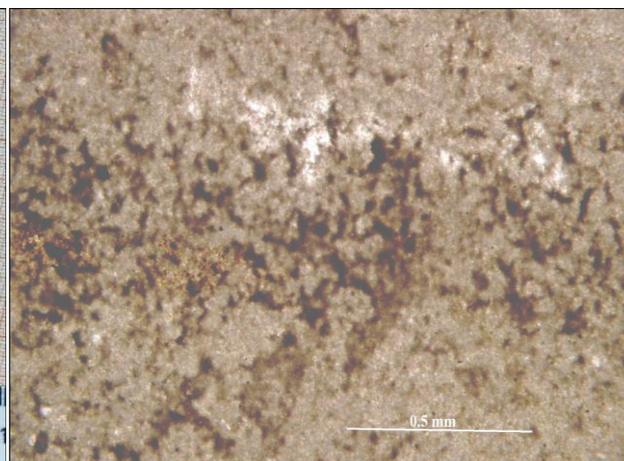


Рисунок 2 – Тёмный слой строматолита, демонстрируемого на рис. 1. В виде тёмных вытянутых образований видны минерализованные остатки микроорганизмов.

Использование данных по современным лишайникам: «размер, форма, строение, окраска спор у лишайников являются очень важными постоянными признаками, а потому имеют большое значение для систематики лишайников..., листоватые и кустистые формы нередко довольно хорошо отличаются именно по своеобразным особенностям слоевища» [9, с.150] - позволяет утверждать, что основные морфологические элементы, структуры микрофоссилий почти идентичны таковым рецентных лишайников, от которых отличаются в основном своей экологией и микроскопическими размерами.

Фотобионт (водоросль) представлен пластинчатым с неровными краями талломом, прикрепленным к субстрату суженным основанием, оканчивающимся грибными гифами (рис. 3–5). Талломы лишайников имеют большое сходство с пластинчатой формы зелеными водорослями порядка *Ulvales*. Пластинчатой формы зелёные водоросли ранее были описаны из демонстрируемого строматолита (рис. 1); [8]. Наряду с другими водорослями, они растут в литорали, на глубине первых метров (например, кладостефусы — на глубине 2–7 м). В теплых условиях современные зеленые водоросли главным образом развиваются в поверхностной пленке воды (нейстоне). Возможность активного участия современных зеленых водорослей в строительстве столбчатых (колломорфных) строматолитов, растущих в литоральной зоне морей, хорошо известна по материалам залива Шарк в Западной Австралии [10].

Формы, принимаемые за микобионты (грибы), являются дрожжевыми грибами. Они имеют: округлую или неправильную форму; прикрепленные к субстрату талломы; «хвостик» гифы, свидетельствующий апикальный рост, характерный для грибов (рис.3, 4). Контакт между составляющими протолишайника не ясен, возможно, одноклеточные грибы (микобионты) посредством гиф проникают в пластинчатой формы талломы/слоевища зеленых водорослей (фотобионтов). Как известно по данным современных зеленых водорослей, путём фотосинтеза они производят органические вещества (многоатомные спирты), легко усваиваемые грибами. Последние размножались почкованием, эволюционировали в палеоэкосистеме строматолитов, паразитируя на талломах зеленых водорослей [7, fig. 3, 4].

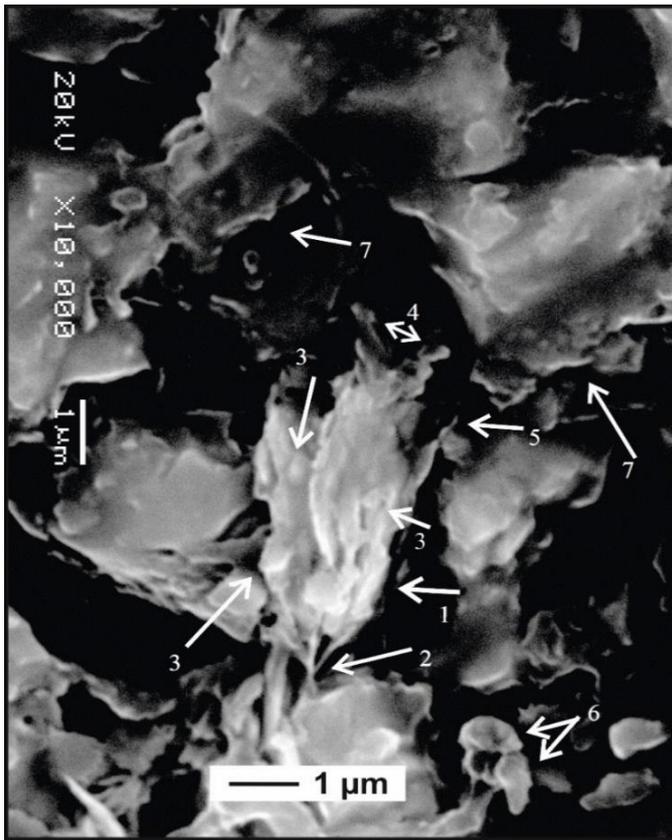


Рисунок 3 – Листоватый лишайник: 1 – таллом (слоевище, тело) в виде вертикально расположенных пластинок (длиной 1.99 мкм, шириной от 0.96 до 1.32 мкм); 2 – гифы грибов (длиной 0.73-0.79 мкм), посредством которых таллом прикреплен к субстрату; 3 – микобионт (гриб) на талломе фотобионта (водоросли) (размерами 0.53 x 0.40 мкм, 0.45 x 0.3 мкм, 0.26 x 0.25 мкм); 4 – микобионты на терминальном конце фотобионта (длиной 0.76-0.92 мкм, шириной 0.17-0.34 мкм); 5 – остроконечное, как шип, окончание фотобионта, свидетельствующее о верхушечном росте лишайника (длиной 0.24 мкм, шириной 0.06 мкм); 6 – дисковидные образования другого лишайника, прикрепляющие его к субстрату (размерами 0.92 x 0.55 мкм, 0.52 x 0.93 мкм); 7 – дрожжевые грибы с почками (длиной 0.11-0.13 мкм, шириной 0.15-24 мкм), посредством которых они размножаются.

Талломы (слоевища, тела) современных листоватых лишайников имеют вид пластинок. У немногих листоватых лишайников таллом срастается с субстратом только в одном месте с помощью грибных гиф (гомфом). Обнаруженные в бюкской свите лишайники имеют такой же вид пластинок и прикрепляются к субстрату в одном месте посредством грибных гиф. Приведенное утверждение мы обосновываем рисунком 3. Лишайник листоватый, таллом длиной 1.99 мкм, толщиной от 0.96 до 1.32 мкм. Он в виде вертикально расположенных пластинок в форме кустика, прикрепленного к субстрату посредством гифов грибов длиной 0.73–0.79 мкм. Эти пластины являются фотобионтом лишайника. Предположительно фотобионт представлен зелеными водорослями. Микобионт (гриб размерами 0.53 x 0.40 мкм, 0.45 x 0.3 мкм, 0.26 x 0.25 мкм); расположен на талломе фотобионта (водоросли). Некоторые микобионты наблюдаются на терминальном конце фотобионта длиной 0.76-0.92 мкм, толщиной 0.17-0.34 мкм. Остроконечное, как шип (длиной 0.24 мкм, толщиной 0.06 мкм), окончание фотобионта указывает на верхушечный рост лишайника. В окружении характеризуемого лишайника присутствуют: дрожжевые грибы с почками (длиной 0.11–0.13 мкм, толщиной 0.15–24 мкм), посредством которых они размножаются; соединенные гифами два дисковидных образования (размерами 0.92 x 0.55 мкм, 0.52 x 0.93 мкм), по-видимому, прикрепляющие другой лишайник к субстрату. На основе этого факта можно предположить, что охарактеризованный лишайник прикреплялся к субстрату посредством упомянутых выше гиф, соединяющих его с диском. Рисунками 4 и 5 мы демонстрируем ту же особенность, что изложена выше: листоватые талломы лишайников к низу сужаются и постепенно оканчиваются гифами, предположительно входящими в субстрат.

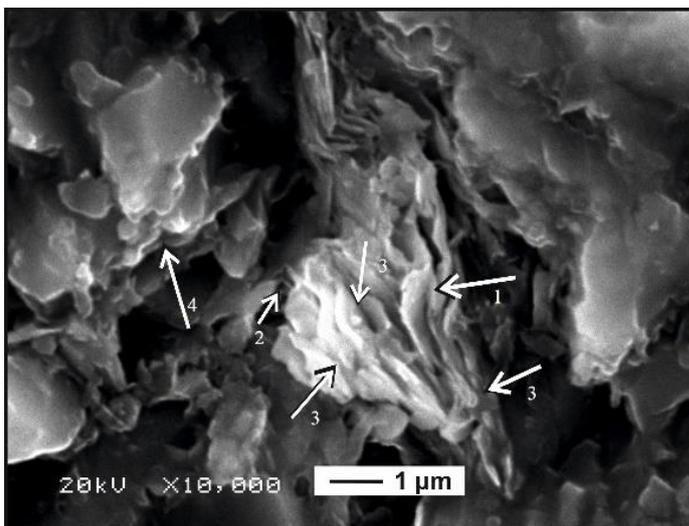


Рисунок 4 – Лишайник: 1 – таллом листоватой формы (длиной 2.59 мкм, шириной 0.5 мкм); 2 – терминальное остроконечное, как шип, окончание лишайника, указывающее на его верхушечный рост (длиной 0.30 мкм, шириной от 0.09 до 0.41 мкм); 3 – микобионты (грибы) со средней длиной 0.30 мкм и шириной 0.23 мкм; 4 – дрожжевые грибы с почками (длиной 0.18-0.26 мкм, шириной 0.14-0.19 мкм).

Характерными местами обитания рецентных дрожжей являются наземные экосистемы. А в докембрии 600 млн лет тому назад ранние представители дрожжей появились в водной среде, когда территория всей Сибирской платформы, за исключением Алданского и Анабарского щитов, была покрыта морями. Дрожжевые грибы – микобионты характеризуемых в статье лишайников - обитали в экосистеме строматолитов. Как известно, строматолиты формируются в водной среде. Следовательно, обнаруженные в них дрожжи, вступившие в симбиоз с зелеными водорослями, обитали не на суше, а в водной среде. Строматолиты почти целиком представлены минерализованными остатками разной формы и размеров дрожжевых клеток (особей) (рис. 3, 4), имеющих почки и споры, посредством которых они размножаются.

В современных лишайниках основную роль в образовании таллома обычно играет гриб [9]. В отличие от этого, в начале становления лишайников, в частности характеризуемых в строматолитах венда (эдиакария), в формировании формы таллома в основном доминировала водорослевая составляющая (фотообионт), как имеющая к тому времени на Сибирской платформе хорошо сформировавшуюся морфологию по сравнению с грибами. В исследуемом образце строматолита (рис. 1) грибы окружают водоросли, их гифы местами являются ищущими, проникают в клетки водорослей [8, табл. 1, фиг. 1в), как у современных лишайников. При этом пластинчатая форма талломов зеленых водорослей сохраняется, оставаясь определяющей в формировании габитуса лишайников. На основе этого можно утверждать, что по отношению к водорослям грибы (паразиты) выступали не только жестко [7, fig. 2], но и мягко (сохраняли клетки водорослей), то есть в роли микобионтов лишайников. В венде (эдиакарии) Березовского прогиба, возможно, был парасимбиоз. Парасимбиотическое развитие впоследствии могло привести к мутуалистическому (взаимовыгодному) симбиозу, формированию морфологически дифференцированных структур лишайников. Для этого палеоэкосистема строматолитов оказалась весьма подходящим биотопом (средой, местом).

Колл. № 87 хранится в Геологическом музее Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН (г. Якутск). Она собрана в среднем течении руч. Торго в бассейне р. Токко (правый приток р. Чара в бассейне р. Олёкма).

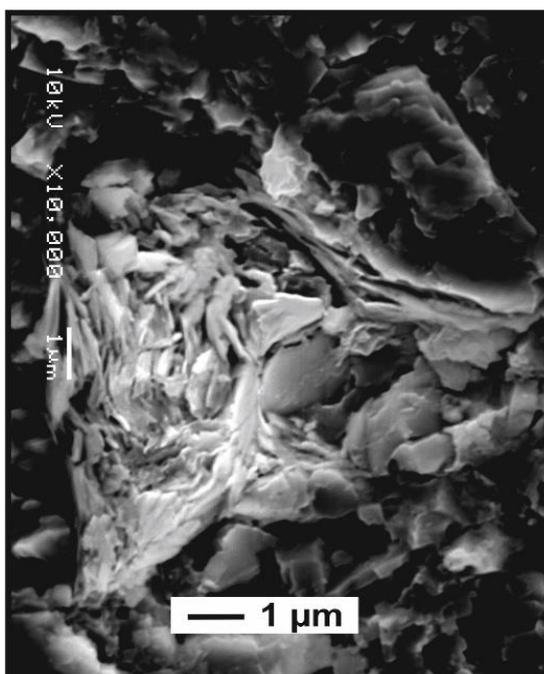


Рисунок 5 – Таллом (слоевище, тело) листоватого лишайника: длина 6.56 мкм, ширина 3.1 мкм.

3. Выводы

В результате изучения на сканирующем электронном микроскопе микрофоссилии, содержащиеся в столбчатом строматолите буюкской свиты венда Берёзовского прогиба на юго-востоке Сибирской платформы, биологически интерпретированы, и установлено, что они являются окаменевшими остатками лишайников. В настоящее время это самые ранние на Земле хорошо сохранившиеся и наиболее полно доказанные лишайники. В отличие от современных лишайников, в которых в формировании формы таллома (тела) определяющую роль играют грибы (микобионты), в буюкских лишайниках венда – пластинчатой формы зеленые водоросли (фотобионты). Это, по-видимому, связано с развитостью к венду зеленых водорослей с хорошо сформировавшейся морфологией.

4. Благодарности. Исследования выполнены за счет финансирования госзадания, выполняемого Институтом геологии алмаза и благородных металлов СО РАН.

5. Литература

- [1] Schopf J.W., Hayes J.M., Walter M.R. Evolution of Earth's Earliest Ecosystems: Recent Progress and Unsolved Problems // *Earth's Earliest Biosphere. Its origin and evolution.* Princeton University Press. Princeton, New Jersey, 1983. – P. 361-384.
- [2] Karatygin I. V. Coevolution of fungi and plants. – St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 1993. – 119 p. Proceedings of the V. L. Komarov Botanical Institute. Issue 9.
- [3] Yuan X., Xiao S., Taylor T.N. Lichen-Like Symbiosis 600 Million Years Ago // *Science.* – 2005. – V. 308 (5724). – P. 1017-1020. URL: doi:10.1126/science.1111347.
- [4] Lücking R. & M.P. Nelsen. Ediacarans, protolichens and lichen-derived *Penicillium*: a critical reassessment of the evolution of lichenization in fungi. In: Krings, M., Harber, C.J., Cuneo, N.R. and G.W. Rothwell (Eds.), *Transformative paleobotany: papers to commemorate the life and legacy of Thomas N. Taylor* // Academic Press, London, UK. 2018. – P. 551-590.
- [5] Kolosov P.N. New microorganisms from the Vendian (Ediacaran) of the Berezovsky Trough, Southern Siberian platform // *Paleontol. Journ.* – 2016. – V. 50. – No 6. – P. 549-556. URL: <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2018-25-3-22-27>.

- [6] Semikhatov M A, Kuznetsov A B, Podkovyrov V N, Bartley J, Davydov Yu V. The Yudoman complex of a stratotype area: C-isotopic chemostratigraphic correlations and relation to the Vendian // Stratigraphy. Geological Correlation. – 2004. – 12. – P. 3-28 (in Russian).
- [7] Kolosov P N. Uniquely preserved fungi in the Vendian (Ediacaran) of Yakutia // Paleontological Journal. – 2021. – 55. – 4. – P. 455-461.
- [8] Kolosov P N. Paleoulvaria green algae of the Vendian (Ediacaran) Berezovsky trough (South of the Siberian platform) // Paleontological Journal. – 2023 (accepted for publication, in Russian).
- [9] Oxner A.N. Morphology, systematics and geographical distribution. Handbook of the lichens of the U.S.S.R. – Issue 2. – L.: Nauka, 1974. – 284 p.
- [10] Sedimentation and facies conditions: In 2 vols. Vol. 1: Translated from English. – M.: Mir, 1990. – 352 p.

ВЫСОКОТОЧНОЕ U-Pb ДАТИРОВАНИЕ СИЕНИТ-ПОРФИРОВ ЧАРО-СИНСКОГО ДАЙКОВОГО ПОЯСА, ВИЛЮЙСКИЙ ПАЛЕОРИФТ, СИБИРСКАЯ ПЛАТФОРМА

Ольга Королева¹, Андрей Прокопьев¹, Олег Полянский², Сандра Камо³ Ричард Эрнст^{4,5}

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

3 Департамент наук о Земле Университета Торонто, Канада

4 Департамент наук о Земле Университета Карлетон, Оттава, Канада

5 Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050, Россия, г. Томск, пр-т Ленина, 36

HIGH-ACCURACY U-Pb DATING OF SYENITE PORPHYRY OF THE CHARA-SINSK DYKE SWARM, VILYUI PALEORIFT, SIBERIAN PLATFORM

Olga Koroleva¹, Andrei Prokopiev¹, Oleg Polyansky², Sandra Kamo³, Richard Ernst^{4,5}

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

2 V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS,

3, Acad. Koptuyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia

3 Department of Earth Sciences, University of Toronto, Canada

4 Department of Earth Science, Carleton University, Ottawa, Canada

5 National Research Tomsk State University, 36, Lenin av., Tomsk, 634050, Russia

Annotation. A precise U-Pb zircon CA-ID-TIMS age of 366.14 ± 0.28 Ma was obtained for a syenite of the Olekminsk stock, located at the southeastern flank of the Vilyui paleorift. The main propose of this study is to test whether this intrusive syenite porphyry stock is part of the ca. 380–360 Ma Yakutsk-Vilyui large igneous province (LIP) or whether it is part of another magmatic event in the Siberian platform. Additional high-precision isotopic data in favor of the Middle Paleozoic (Famennian, 366 Ma) age of the formation of syenite porphyries from the Olekma stock are presented. Their relationship with the manifestation of mafic magmatism of the Yakutsk–Vilyui LIP and the formation of the Vilyui paleorift has been unambiguously confirmed. The time of manifestation of the magmatic event has been clarified. The present result is significant for paleogeodynamic, paleogeographic, and paleoclimatic reconstructions.

1. Введение

Неопротерозойско-мезозойские магматические события, сформировавшие крупные магматические провинции (КИП) произошли в пределах Сибирского кратона в условиях внутриконтинентального растяжения и сопровождались внедрением долеритовых даек и силлов. Среднепалеозойский Виллюйский палеорифт и сопряженная с ним Якутско-Виллюйская КИП (ЯВКИП) – один из примеров масштабного проявления рифтинга и магматической активности. Обзор современных представлений о происхождении Виллюйского осадочного бассейна дан в работе [1]. На флангах Виллюйского рифта широко распространены основные дайки и силлы, образование которых произошло 389–345 млн лет назад с проявлением двух основных импульсов магматизма: 374,1 и 363,4 млн лет назад [1 и ссылки там]. Интрузивы сложены, главным образом, долеритами, габбро-долеритами и их кварцевыми аналогами, субщелочными габбро-долеритами. Реже встречаются кремнекислые разновидности. В сложении многофазных даек участвуют кварцевые монцонит- и сиенит порфиры. Монцониты известны как в Виллюйско-Мархинском [2], так и преимущественно в Чара-Синском дайковых поясах [3, 4, 5, 6]. Сиениты известны только в Чара-Синском поясе в составе сложной дайки

наряду с субщелочными кварцевыми габбро-долеритами в низовьях р. Олекмы, а также слагают самостоятельное тело, известное как Олекминский шток [3, 4, 5, 7]. Большинство исследователей рассматривают кремнекислые разновидности как производные субщелочной толеит-базальтовой магмы в составе единого эволюционного ряда: долериты – монциты – сиениты [3, 4, 5, 6]. Однако необычная в дайковом поясе форма проявления и высококалиевый кремнекислый состав пород Олекминского штока, широкое распространение щелочных вулканитов на юго-восточном фланге Вилюйского рифта вызывали вопрос: формировались ли сиениты в составе ЯВКИП (380–360 млн лет назад) или они принадлежат другому магматическому событию на Сибирской платформе. Цель данного исследования протестировать возраст сиенитов Чаро-Синского дайкового пояса U-Pb методом.

2. Результаты и обсуждение

Впервые проведено высокоточное U-Pb датирование интрузивов юго-восточного фланга Вилюйского палеорифта (Чаро-Синский дайковый пояс). Для исследования был взят образец сиенита из центральной части Олекминского штока. Из пробы были выделены три зерна циркона и проанализированы методом CA-ID-TIMS в геохронологической лаборатории Департамента наук о Земле Университета Торонто (Канада). Получен возраст конкордии U-Pb $366,14 \pm 0,28$ млн лет. Значение возраста циркона $366,14 \pm 0,28$ млн лет близко к $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ изотопным возрастам плагиоклазов из даек Чаро-Синского пояса: $364,2 \pm 3,3$ и $362,1 \pm 3,9$ млн лет, полученным нами ранее [1] и U-Pb возрасту циркона 371 ± 5 млн лет (SHRIMP II), полученному коллегами из ВСЕГЕИ также для сиенитов Олекминского штока [7]. Новый возраст согласуется со временем девонского дайкового магматизма в ЯВКИП (380–360 млн лет назад) и соответствует его второму импульсу с пиком около $363,4$ млн лет по [1], или 365 млн лет по В.Л. Масайтису [8].

ЯВКИП имеет общие черты с одновозрастной Кольско-Днепровской КИП Восточно-Европейского кратона. Близко по возрасту Кедонское магматическое событие (~ 400 – 345 млн лет назад) Омолонского кратона. К этому времени относятся фран-фаменские глобальные бескислородные события, с которыми связывают одно из крупнейших в истории Земли массовых вымираний [9 и ссылки там].

3. Выводы

Представлены дополнительные высокоточные изотопные данные в пользу среднепалеозойского (366 млн лет, фамен) возраста формирования сиенит-порфиров Олекминского штока, однозначно подтверждена их связь с проявлением основного магматизма ЯВКИП (380–360 млн лет назад) и формированием Вилюйского палеорифта, уточнено время проявления магматического события. Результат имеет значение для палеогеодинамических, палеогеографических и палеоклиматических реконструкций и понимания абиотических факторов биотических кризисов. Многоимпульсный магматизм Якутско-Вилюйской и Кольско-Днепровской КИП (380–360 млн лет назад) и связанных с ними карбонатитов и кимберлитов требует дополнительной точной U-Pb геохронологии также для полной проверки конкретных связей с биотическими кризисами.

4. Благодарности

Исследование выполнено по плану НИР ИГАБМ СО РАН и ИГМ СО РАН. Изотопно-геохронологические работы профинансированы в рамках LIPs-Industry Consortium-NSERC CRD Project. Авторы благодарят А.Г. Копылову и М.Д. Томшина за помощь при проведении полевых работ и сборе коллекции.

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. Time correlation between the formation of dike swarms and

- crustal extension stages in the Middle Paleozoic Vilyui rift basin (Siberian platform) // *Lithos.* – 2017. – Vol. 282-283. – Iss. – P. 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). – P. 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 p. (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 p. (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. – P. 535-540.
- [6] Koroleva O.V., Specific compositions and genesis of basic and alkali-siliceous magmatic associations of the Siberian and Hindustan platforms // Polyakov, G.B. (Ed.), *Siberian and Deccan Traps: Similarities and Differences.* – Novosibirsk: Nauka, 1991. – P. 177-195. (in Russian)
- [7] 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.
- [8] Masaitis V.L., Bogomolov E.S., Lebedev P.B., Sergeev S.A. Middle Paleozoic volcanic province of the Siberian Platform and Sr-Nd isotopic systematics of basaltoids // *Regionalnaya geologiya i metallogeniya.* – 2006. – No. 28. – P.153-157 (Russian Journal *Regional Geology and Metallogeny.* – 2006. – Vol. 28. – P. 1543-157. (in Russian)
- [9] Ernst R.E., Rodygin S.A., Grinev O.M. Age correlation of Large Igneous Provinces with Devonian biotic crises // *Global and Planetary Change.* – 2020. – Vol. 185, 103097.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ДЛЯ ВЫЯСНЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ОЧАГОВОЙ ЗОНЫ МЕЛКОФОКУСНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Альбина Куляндина

ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова»,
677000, Россия, г. Якутск, ул. Белинского, 58

QUANTITATIVE INTERPRETATION OF GEOPHYSICAL FIELDS TO ELUCIDATE THE GEOLOGICAL STRUCTURE OF THE FOCAL ZONE OF A SHALLOW-FOCUS EARTHQUAKE

Albina Kulyandina

North-Eastern Federal University, 58, Belinsky str., Yakutsk, 677000, Russia

Annotation. The elucidation of underlying geological conditions in earthquake focuses is one of the major problems of seismology. Its solution gives the possibility to obtain information about the main features of the seismotectonic process with energy occurring as a result of destruction of the medium and caused by the action of tectonic stresses in the Earth's crust. Vertical fluid migration may play an important role in the origin of a shallow-focus earthquake. Faults promote the accumulation of fluid flows and serve as the main routes for the transport of matter and energy. In this communication, a forward and backward solution of the problem is given for the focal zone of shallow focus earthquake hypocenter development based on gravity and magnetic survey data in the profile version. Analysis of gravity and magnetic data and their application to construct an analytical continuation of potential field circulation in the lower half-space is presented. A comprehensive interpretation of the geological characteristics of the earthquake focal zone has made it possible to draw some important conclusions about the movement of tectonic processes.

1. Введение

Количественная интерпретация в гравиразведке и магниторазведке выражается решением двух задач – прямой и обратной. Решение обеих задач взаимно связано, однако результат их различен: прямая задача имеет единственное решение, в то время как обратная задача не решается строго однозначно, т.е. заданному полю аномалий можно поставить в соответствие несколько возможных распределений аномальных масс. В связи с этим нужно выявить распределения возмущающих объектов, при которых однозначное решение окажется возможным.

Объектом исследования был выбран участок в междуречье Буоркалах и Бур, расположенный в пределах Лено-Анабарского прогиба [1] и примыкающий с юга к Лено-Таймырской сейсмоактивной зоне [2]. Здесь 20 мая 2011 года 04h 51m с $Kp=12.6$, $\varphi=72.80^{\circ}N$, $\lambda=125.95^{\circ}E$ зафиксировано землетрясение с магнитудой 4,78 [3]. При этом его очаг залегал на глубине 8 км, и носил по-видимому, флюидный характер. На данной территории ранее глубоким бурением на глубине с 1470-3100 м были выявлены нефтегазовые проявления [1]. Это факт позволил изучить здесь особенности геологической среды по геофизическим полям.

2. Составление плотностных и магнитных моделей геофизических разрезов

Составление плотностных и магнитных моделей геофизических разрезов осуществлялось в два этапа, решение обратной и прямой задачи для гравиразведки и магниторазведки в профильном варианте [4]. Модели геолого-геофизических разрезов были составлены с использованием программы GravMagInv2D. Решение прямой задачи гравиразведки осуществлялось для

аномалий ΔG_a , где точность подбора составила ± 0.1 мГал. Расчёт плотностной модели выполнен относительно плотности промежуточного слоя $\sigma = 2.3$ г/см³.

Основой для создания плотностной модели геолого-геофизического разреза по данным гравиметрических измерений являлся временной сейсморазведочный разрез. При расчётах использовались сведения о плотностных свойствах пород из фондовых и опубликованных материалов (Таблица 1, Таблица 2).

Таблица 1 – Стратиграфическая привязка пластов, их мощность и пластовые скорости

| Чарчыкская скважина П-1 | | | | | | | |
|-------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| № пласта | Интервал глубин | Мощность пласта | Пластовая скорость, м/с | Стратиграфическая привязка | Опорные горизонты | Глубины опорных горизонтов, м | Примечание |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| I | 0-420 | 420 | 4180 | нижний мел | | | Зона многолетне мерзлых пород |
| II | 420-1260 | 840 | 3540 | мел, юра, триас | в подошве пласта гор. Т-II | 1240 | |
| III | 1260-1700 | 440 | 4230 | пермь | | | |
| IV | 1700-2140 | 440 | 5790 | пермь-кембрий | в кровле Р-Є | 1800 2100 | |
| V | 2140-2550 | 410 | 6360 | кембрий | | | |
| VI | 2550-2800 | 250 | 4360 | кембрий | | | |
| VII | 2800-3100 | | 6380 | кембрий+венд | в кровле гор. Є-V | 2800 | |

Отложения чехла по плотностной характеристике расчленяются на два основных комплекса: 1) карбонатно-терригенные породы верхнего протерозоя и нижнего палеозоя; 2) терригенные породы среднего и верхнего палеозоя, мезозоя и кайнозоя. Значения σ_{cp} первого комплекса составляют 2.65-2.70 г/см³, второго – 2.30-2.50 г/см³. Плотность пород фундамента колеблется от 2.56 до 2.97 г/см³, ее средневзвешенное значение 2.71 г/см³. Разность плотности между отдельными комплексами фундамента изменяется от 0.10 до 0.45 г/см³, а между породами фундамента и осадочного чехла – от 0.10 до 0.40 г/см³.

С привлечением материалов сейсморазведочных данных [1] была построена блочная модель с границами раздела (стратиграфические горизонты). Размеры блоков задавались исходя из мощности структурных этажей и их физических свойств. Таким образом, сплошная среда была разбита на горизонтальные и вертикальные блоки.

На первоначальном этапе моделирования ставилась задача очень грубого соответствия модели предполагаемого геологического разреза на основе сопоставления модельных и наблюдаемых полей. Далее осуществлялась детализация на основе подбора верхних кромок блоков и подбора неоднородности плотности/намагниченности в каждом блоке. В результате выявлена зона разуплотненных пород, которая характеризуется повышенными пластовыми давлениями [5] и пониженными плотностями и для названной модели соответствует 2,10-2,30 г/см³. Результаты решения упомянутой прямой задачи потенциальных полей показаны зеленым и фиолетовым линиями на графике над разрезом (Рисунок 1).

Таблица 2 – Обобщенная сейсмическая характеристика структурных этажей и их стратиграфическая привязка

| № п/п | Структурный этаж | Тип и состав горных пород | Мощность, м | Физические свойства | |
|-------|--|--|----------------|------------------------------|---|
| | | | | Плотность, г/см ³ | Магнитная восприимчивость, $\times 10^{-6}$ ед. СГС |
| 1. | Архейско-нижне-среднепротерозойский | Ультраосновные породы (перидотиты, пироксениты) | более 15000 | 2,89-2,97 | до 8000 |
| | | Кристаллические сланцы, мраморы | | 2,66-2,71 | 1250 |
| | | Гранитоиды | | 2,56-2,71 | до 500 |
| 2. | Верхнепротерозойско-нижне-среднепалеозойский | Карбонатные отложения | с Кембрий 2500 | 2,72 | Отложения практически немагнитны |
| | | различным соотношением доломитов и известняков, встречаются терригенные разности | Ордовик 650 | 2,77 | |
| | | | Силур до 610 | 2,75 | |
| | | | Девон до 1100 | 2,78 | |
| 3. | Верхнепалеозойский-нижнемезозойский | Терригенно-угленосные отложения верхнего карбона и перми | до 500 | 2,3-2,5 | Практически немагнитны |
| | | Верхнепермские-нижнетриасовые вулканогенные образования | 1400-1800 | 2,72-2,82 (2.64*) | 1000 у основных и ультраосновных интрузий до 8000 |
| 4. | Мезозойско-кайнозойский | Юрско-меловые терригенные отложения | до 7000-8000 | 2,36-2,40 | Практически немагнитны |

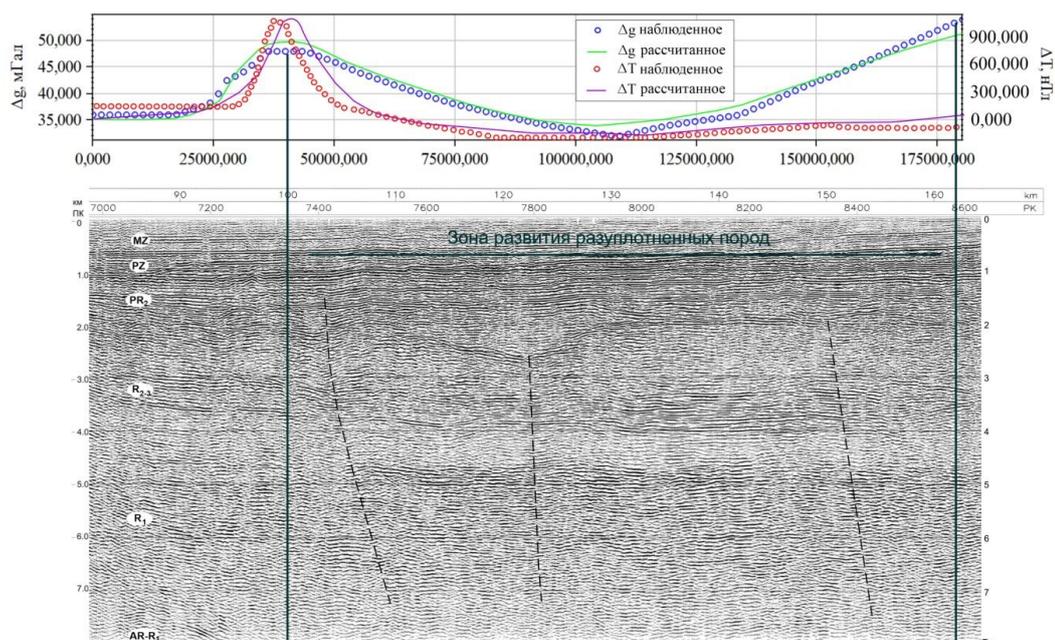


Рисунок 1 – Сейсмический временной разрез МОГТ-2D по профилю в интервале 0-8,0 с. Пунктирной линией показаны разрывные нарушения.

Для локализации плотностных и магнитных неоднородностей в разрезе осадочного чехла были выполнены пересчёты значений поля ΔG_a и ΔT_a в нижнее полупространство (Рисунок 1, Рисунок 2). Возможности пересчета магнитного и гравитационного полей вниз основаны на том, что величины магнитного и гравитационного потенциала и их производных, определенные в некоторой области, не занятой возмущающими источниками, могут быть найдены и внутри возмущающих масс. Там заданная функция сохраняет свою гармоничность, что обеспечивает однозначность операции.

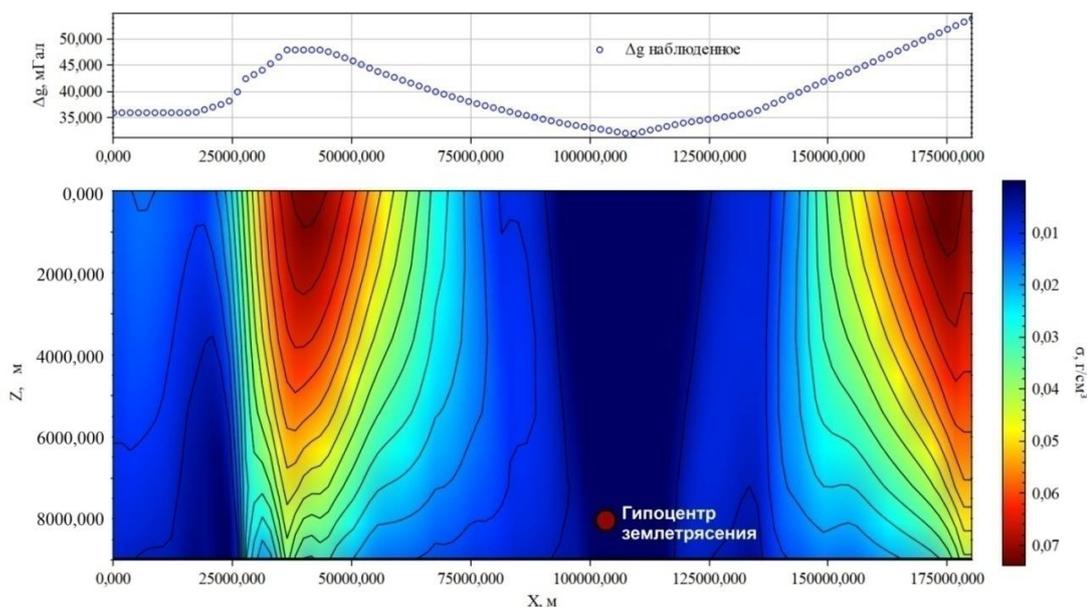


Рисунок 2 – Плотностной разрез очаговой зоны мелкофокусного землетрясения.

На наблюдаемом поле силы тяжести выделяется локальный гравитационный минимум над эпицентром землетрясения, что вероятно, вызвано как разуплотнением пород в своде структуры, так и наличием нефтегазовой залежи. Интенсивность гравитационной аномалии составляет 18-20 мГал (Рисунок 2).

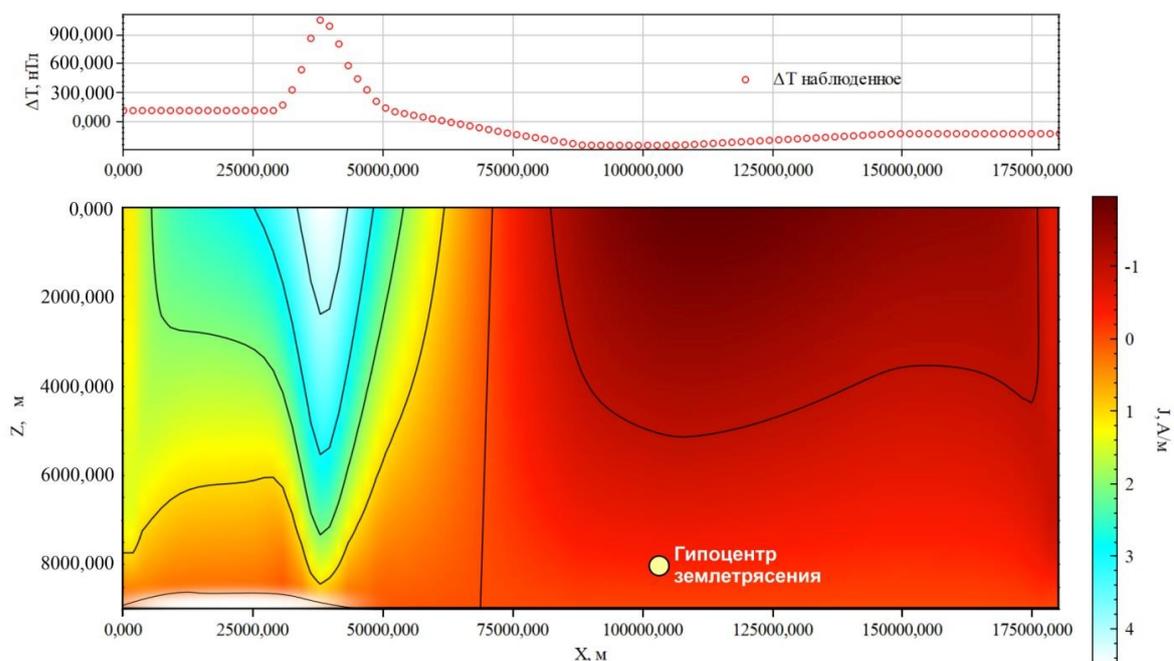


Рисунок 3 – Распределения намагниченности в нижнее полупространство.

На графике наблюдаемого магнитного поля эпицентру землетрясения соответствует отрицательная аномалия, видимо, нефтегазовая залежь снижает величину магнитной аномалии [6], в то время как вмещающие ее породы имеют положительную магнитную восприимчивость (Рисунок 3).

При сопоставлении результатов интерпретации сейсморазведки и гравиразведки по профилю наблюдается корреляция морфологии отражающих опорных горизонтов и аномалий силы тяжести, что подтвердилось при решении прямой задачи гравиразведки. Рисунок ΔG_a соответствует локальным структурным особенностям строения рельефа отражающих горизонтов и плотностным неоднородностям в разрезе осадочного чехла. В вертикальном разрезе магнитного поля наблюдается переходная зона от слабо магнитной осадочной толщи в магнитоактивную толщу пород фундамента. По сейсморазведочным данным кристаллический фундамент на этой территории прослеживается на глубине 9-10 км. Качество решения обратной задачи определяется степенью близости модельных и наблюдаемых полей. В итоге сходимость вычисленной и наблюдаемой кривых магнитного и гравитационного полей определилась среднеквадратической ошибкой не ниже 0.01.

3. Заключение

По полученным данным установлены корреляционные связи между структурным строением очаговой зоны мелкофокусного землетрясения и аномалиями гравитационного и магнитного полей. Над припущенным блоком фундамента расположена локальная неантиклинальная структура осадочного чехла. Выделенное локальное опускание, по-видимому, соответствует, и припущенному блоку фундамента, и структуре облекания в низах осадочного чехла, что и отмечается гравитационным минимумом. Такая аномалия ΔG свидетельствует о мощной зоне разуплотнения в осадочных отложениях на данном участке площади. Именно зоны развития разуплотненных пород могут являться аккумуляторами углеводородов из окружающих осадочных нефтегазопроизводящих толщ. Также на это указывает пониженная намагниченность. Углеводородные флюиды относятся к диамагнетикам, а вмещающие ее породы имеют положительную магнитную восприимчивость. В связи с вышеизложенным нефтегазовая залежь будет уменьшать значение магнитной аномалии.

4. Благодарность

Выражаю благодарность Чепиго Льву Станиславовичу за предоставление программного обеспечения GravMagInv2D (<https://www.gravmaginv.ru>).

Работа выполнена с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gstras.ru/unu/>).

5. Литература

- [1] Gubin I.A., Kontorovich V.A. Towards a seismogeological model of the structure of the Anabar-Olenok zone // *Georesursy*. – 2021. – 23(1). – P. 70-77. URL: <https://doi.org/10.18599/grs.2021.1.7>.
- [2] Shibaev S.V., Kozmin B.M., Petrov A.F., Timirshin K.V. Lena-Taimyr anomaly of seismoactive environment on the Laptev Sea shelf // *Natural Resources of the Arctic and Subarctic Vyp.* – 2014. – 2. – P. 105-109.
- [3] Shibaev S.V., Kozmin B.M., Petrov A.F., Timirshin K.V., Peresypkin D.M., Lysova G.V., Starkova N.N. Yakutia // *Russian Earthquakes in 2011*. – Obninsk: GS RAS, 2011. – P. 44-48.
- [4] Martyshko P.S., Ladovsky I.V., Fedorova N.V., Byzov D.D., Tsidaev A.G. // *Theory and methods of complex interpretation of geophysical data*. – Yekaterinburg: UrO RAS, 2016 – 94 p.
- [5] Kuzin A.M. Earth degassing: from earthquakes to formation of mineral deposits of fluid genesis // *Actual problems of oil and gas*. – 2018. – Vol. 4(23). URL: <http://oilgasjournal.ru>
- [6] Abukova L.A. Models and mechanisms of downward HC migration from sedimentary cover into elevated basement blocks // *Petroleum hydrogeology at the present stage (theoretical problems, regional models, practical issues)*. – GEOS. 2007. – P. 191-209

**РАННЕПЕРМСКИЕ АММОНОИДЕИ ПОДСЕМЕЙСТВА UDDENITINAE В
ЗАПАДНОМ ВЕРХОЯНЬЕ**

Руслан Кутыгин

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

**EARLY PERMIAN AMMONOIDS OF THE SUBFAMILY UDDENITINAE IN
WESTERN VERKHOYANIE**

Ruslan Kutugin

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

Annotation. Uddenitinae in Verkhoyanie are known from four stratigraphic levels of the Lower Permian. The first level, containing *Prouddenites evolutus*, is considered as the basal part of the Permian system of the region. From the lower part of the Echij Formation (second level), a single specimen of Uddenitinae without generic diagnosis is known. The third level (the lower part of the Upper Echij Subformation of the Artinskian) contains *N. echiensis*, the most primitive species of the genus *Neouddenites* known to date. The vertical distribution range of the youngest Verkhoyanian Uddenitinae (*Neouddenites andrianovi*) is limited by the Orol Formation, which allows us to consider it purely Kungurian. The presence of an advanced form of *Prouddenites* with a distinctly asymmetric lateral lobe at the base of the Permian of Verkhoyanie suggests that the *P. evolutus* was the ancestor of the genus *Neouddenites*. Middle Permian (Roadian) *Neouddenites* are known only in the Kazanian deposits of the Volga-Ural region. They have a simple trapezoidal whorl section without distinct lateral grooves and ventrolateral ridges. Since, among the Kungurian *Neouddenites*, such a shell shape is characteristic only of the Verkhoyanian *N. andrianovi*, it can be assumed that the latter species was the ancestor of the Volga-Ural *Neouddenites*, which entered in the Ural water area from the Verkhoyanian Sea at the beginning of the Roadian.

1. Введение

Среди пермских аммоноидей удденитины являются очень редкой и слабо изученной группой. Стратиграфическая роль пермских удденитин ранее считалась малозначимой, однако недавние исследования [1, 2] показали, что эта группа головоногих может использоваться в биостратиграфии ассельско-роудского интервала, а также в выяснении путей миграций пермских аммоноидных сообществ. Выяснение вертикального распределения удденитин является немаловажной задачей, решение которой представляет большой научный интерес. Во всем мире известно немногим более двух десятков экземпляров раннепермских удденитин, из которых более половины найдено в Западном Верхоянье. Выяснению вертикального распределения западноверхоянских представителей подсемейства Uddenitinae посвящен настоящий доклад.

2. Вертикальное распределение удденитин

В 1960 г. в центральной части Западного Верхоянья (басс. р. Тумары) В.Н. Андрианов собрал первую представительную коллекцию пермских аммоноидей, в которой В.Е. Руженцев [3] установил необычных удденитин, отнесенных к новому роду *Neouddenites*. Находка неоудденитов в верхней части нижней перми стала неожиданной, поскольку их боковая лопасть по морфогенетической организации занимает промежуточное положение между позднекаменноугольными родами *Uddenites* и *Uddenoceras*, а наличие огромного геохронологического разрыва между удденитами и неоудденитами вызывало вопросы, касающиеся их филогенетических связей. Согласно современным стратиграфическим

построениям [4, 5], обнаруженные В.Н. Андриановым неоуддениты происходят из нижнетумаринского подгоризонта, уверенно относимого к кунгурскому ярусу [6, 7].

Единственный представитель верхоянских удденитин, не относящийся к роду *Neouddenites*, найден в пограничном каменноугольно-пермском интервале разреза на р. Дьеленджа. Он относится к ранее считавшемуся сугубо карбоновому роду *Prouddenites*. Верхоянский проудденит, описанный как *Prouddenites evolutus* Kutugin [2], резко отличается от вида *Prouddenites terminalis* Ruzhencev из гжельского яруса Южного Урала, но близок к более древнему виду – *Prouddenites primus* Miller их касимовских отложений южной части США. По количеству элементов лопастной линии *P. evolutus* отстает от обоих позднекаменноугольных таксонов, что могло бы свидетельствовать о его примитивности, однако форма боковой лопасти указывает на то, что он относится к новой стадии морфогенетического развития рода *Prouddenites*, направленной к формированию характерной для *Neouddenites* резко ассиметричной боковой лопасти с очень глубокой внутренней ветвью и широкой уплощенной внешней. Вероятно, именно от *Prouddenites evolutus* произошел род *Neouddenites*, приобретший широкое географическое распространение в кунгурском веке. В составе последнего рода выделено пять раннепермских видовых таксонов, относящихся к территориям разных палеобиогеографических провинций: Верхоянье [2, 3], Омолонский массив [6], Монголия [8] и Северо-Западная Канада [9]. Неоуддениты встречены также в роудском ярусе средней перми Волго-Уральского региона [1].

Основные сборы неоудденитов (*N. andrianovi*), сделаны в орольской свите, которая является нижним стратонем тумаринской ритмосвиты. Совместно с орольскими *N. andrianovi* обнаружены многочисленные гониатиты вида *Tumaroceras yakutorum*, свидетельствующие о кунгурском возрасте вмещающих отложений. Поэтому род *Neouddenites* ранее часто ассоциировался с сугубо кунгурским веком, что позволяло относить новые находки неоудденитов к кунгурскому ярусу, даже при отсутствии других данных о точном возрасте вмещающих отложений. Действительно, наиболее богатые местонахождения неоудденитов (орольская свита Верхоянья и средняя подсвита джигдалинской свиты Омолонского массива) уверенно относятся к кунгурскому ярусу. Однако существуют данные о присутствии рода *Neouddenites* и в более древних отложениях.

Из нижней части эчийской свиты разреза по р. Аркачан В.Н. Андриановым указывался ?*Neouddenites* sp. [6, с. 53], что является наиболее низкой зафиксированной находкой неоудденитов, происходящей из сакмарских слоев. Следующий в Верхоянье уровень с неоудденитами приходится на верхнюю часть эчийской свиты, относящейся к артинскому ярусу. Проведенное морфологическое изучение верхнеэчийских неоудденитов показало их принадлежность к отдельному виду *Neouddenites echiensis* Kutugin, являющемуся самым древним из установленных видовых таксоном рода *Neouddenites*. Сравнивая верхнеэчийских неоудденитов с орольскими, нельзя не отметить их существенные различия в форме раковин и строении лопастной линии. Верхнеэчийские экземпляры отличаются большими размерами раковины и наличием устойчивого признака – продольного вентролатерального валика, разделенного срединной и боковой бороздами.

До недавнего времени для рода *Neouddenites* не было известно ни одного поперечного сечения раковины, что не позволяло понять, каким образом изменяется форма в процессе индивидуального развития. Для восполнения этого пробела впервые был изучен онтогенез типового вида [2, 10]. В индивидуальном развитии формы раковины орольского вида *N. andrianovi* стадия формирования вентролатеральных валиков и боковых борозд отсутствует, а срединная борозда к последнему обороту взрослой раковины исчезает. Следовательно, среди раннепермских неоудденитов только типового вида (*N. andrianovi*) характеризуется отсутствием боковых борозд и вентролатеральных валиков, ранее ошибочно считавшихся диагностическим признаком всего рода *Neouddenites*. Указанные морфологические особенности сближают верхоянских *N. andrianovi* с роудскими (среднепермскими) неоудденитами Волго-Уральского региона [1], что может свидетельствовать об их филогенетических и биогеографических связях.

3. Выводы

Удденитины в Верхоянье происходят из четырех стратиграфических уровней нижней перми. Первый уровень, содержащий *Prouddenites evolutus* Kutugin, рассматривается в качестве базальной части пермской системы региона. Из нижней части эчийского горизонта (второй уровень) известен единственный экземпляр удденитин без родовой диагностики. Третий уровень (нижняя часть верхнеэчийской подсвиты артинского яруса) содержит наиболее примитивный из известных на сегодняшний день видов рода *Neouddenites* – *N. echiensis* Kutugin. Вертикальный диапазон распространения наиболее молодого из верхоянских видов неоудденитов (*N. andrianovi* Ruzhencev), ограничивается орольской свитой, что позволяет считать его сугубо кунгурским. Присутствие в основании перми Верхоянья продвинутой формы *Prouddenites* с отчетливо асимметричной боковой лопастью позволяет предположить, что предком рода *Neouddenites* являлся *Prouddenites evolutus*. Среднепермские (рудские) *Neouddenites* известны только в казанских отложениях Волго-Уральского региона. Они обладают простой трапецевидной формой сечения оборота без отчетливых боковых борозд и вентролатеральных валиков. Поскольку среди кунгурских неоудденитов подобная форма раковины характерна лишь для верхоянского *N. andrianovi*, можно предположить, что последний вид являлся предком волго-уральских неоудденитов, и именно верхоянские представители рода *Neouddenites* проникли в начале рудского века в Уральскую акваторию.

4. Благодарности

Палеонтологические исследования выполнены по госзаданию ИГАБМ СО РАН (0381-2019-0002), биостратиграфическое обоснование проведено за счет гранта Российского научного фонда № 22-77-10028, <https://rscf.ru/project/22-77-10028/>.

5. Литература

- [1] Barskov I.S., Leonova T.B., Shilovsky O.P. Middle Permian Cephalopods of the Volga–Ural Region // *Paleontol. J.* – 2014. – Vol. 48. – No. 13. – P. 1331-1414.
- [2] Kutugin R.V. The Permian Ammonoid Family Medlicottiidae in the Verkhoyansk Region // *Paleontol. J.* – 2020. – Vol. 54. – No. 6. – P. 571-0583.
- [3] Ruzhencev V.E. First ammonoids from the Permian deposits of Verkhoyanie // *Paleontol. zhurnal.* – 1961. – No. 2. – P. 50-63 (in Russ.).
- [4] Resolutions of the Third Interdepartmental Regional Conference on the Stratigraphy of the Precambrian, Paleozoic, and Mesozoic of Northeastern Russia / T.N.Koren' and G.V.Kotlyar. – St. Petersburg: Vseross. Nauchno-Issled. Geol. Inst., 2009. – 268 p. (in Russ.).
- [5] Budnikov I.V. et al. Permian stratigraphy and paleogeography of Central Siberia (Angaraland) – A review // *J. Asian Earth Sci.* – 2020. – Vol. 196. – Article 104365. – P. 1-21.
- [6] Andrianov, V.N. Permian and some Carboniferous Ammonoids of Northeastern Asia. – Novosibirsk: Nauka, 1985. – 180 p. (in Russ.).
- [7] Kutugin R.V. Permian ammonoid associations of the Verkhoyansk Region, Northeast Russia // *J. Asian Earth Sci.* – 2006. – Vol. 26. – Iss. 3-4. – P. 243-257.
- [8] Bogoslovskaya, M.F. Class Cephalopoda // *Permskiye bespozvonochnyye Yuzhnoy Mongolii.* – Moscow: Nauka, 1991. – P. 139-141 (in Russ.).
- [9] Nassichuk W.W., Furnish W.M., Glenister B.F. The Permian ammonoids of Arctic Canada // *Bull. Geol. Surv. Canada.* – 1965. – No. 131. – P. 1-56.
- [10] Kutugin R.V. Shell ontogeny of the type species of the genus *Neouddenites* (Ammonoidea, Medlicottiidae) from the Kungurian of Western Verkhoyanie // *Paleontol. J.* – 2023. – Vol. 57.

СУБВУЛКАН ОРЛИНСКИЙ - ОБОСНОВАНИЕ ВЫДЕЛЕНИЯ ТАКОЙ СТРУКТУРЫ

Бер Левин

Иерусалим, 9330621, Израиль, Bernice str., h.12-a

SUBVOLCANO ORLINSKY - RATIONALE FOR THE ALLOCATION OF SUCH A STRUCTURE

Ber Levin

h.12-a, Bernice str., Jerusalem, 9330621, Israel

Annotation. The Orlinky subvolcano is located within the Zakoronny prominence of the basement of the Omolon massif (Russia, Magadan region). It was first identified on a geological map of scale 1:50000, but after a while, the geological map of scale 1:200000 returned to the old ideas about the separation in time of Orlinky massif granodiorites and numerous manifestations of quartz diorite-porphyrates. The article provides evidence of the connection and unity of the origin of these rocks using different methods - mapping, structural, petrographic.

1. Введение

Орлинский субвулкан расположен в пределах Закоронного выступа фундамента Омолонского массива (РФ Магаданская обл.) и занимает весьма значительную часть его площади. Вообще этот выступ насыщен магматическими проявлениями, среди которых преобладают, как показано уже на первых картах, гранодиориты и кварцевые диорит-порфириды. Гранодиориты на них выходят в виде крупного Орлинского массива (только на правобережье р. Омолон) и еще небольшими аналогичными массивами в северной половине выступа. Обильные рой существенно более молодых даек кварцевых диорит-порфиритов на тех картах рассыпаны по всему выступу. В середине 80-х годов при разработке легенды по архею для Государственной геологической карты м-ба 1:50000 (далее - Геокарта-50) выявлена тесная связь гранодиоритов с близповерхностными образованиями, т.е. по сути – их комагматичность. При этом кварцевые диорит-порфириды были переопределены в дациты. Но позднее геологи-съёмщики карты м-ба 1:200000 (далее - Геокарта-200) вернулись к исходным представлениям - гранодиориты на ней отнесены к PZ_1 , а кварцевые диорит-порфириды к C_1 . С этим разногласием между двумя картами и следует здесь разобраться.

2. Основной раздел

Итак, диорит-порфириды в Закоронном выступе ранее отражались как рой даек, однако, при разработке легенды по архею для Геокарты-50, выявлено выполнение ими больших площадей этого выступа так, что обычно именно они образуют раму, в которой «плавают» блоки архея, а не наоборот (рис. 1). Нередко они перемежаются с метаморфическими породами при мощностях одного порядка с последними – 20-50 м (рис.2), что больше походит на межпластовые инъекции, чем на дайки, которые, в силу их трещинного генезиса, должны иметь существенно меньшую ширину, чем промежутки между трещинами.

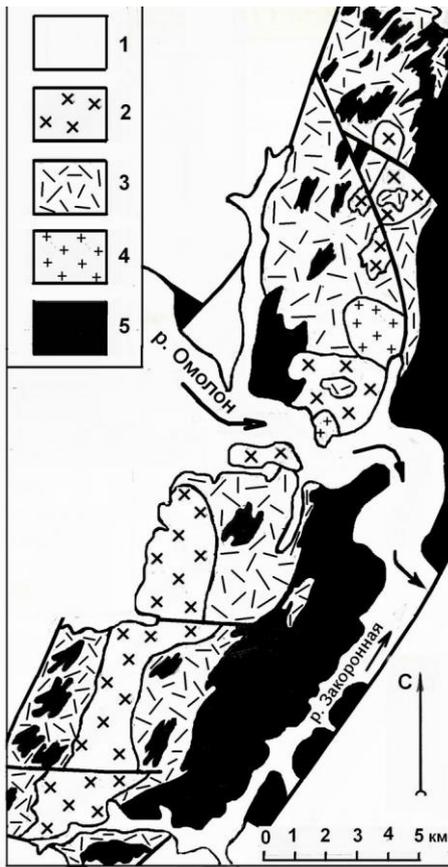


Рисунок 1 – Схема строения субвулкана Орлинский в Закоронном выступе.

1 - чехол массива (Rf и выше); 2 - гранодиориты осевой зоны субвулкана; 3 - дациты периферийной зоны субвулкана; 4 - граниты; 5 - архейские породы фундамента массива.

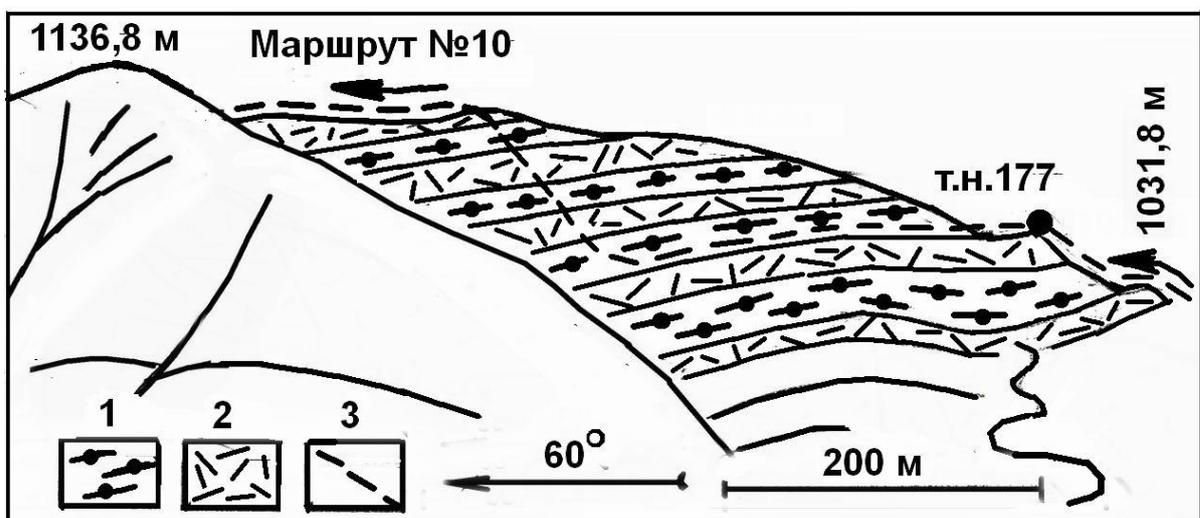


Рисунок 2 – Перемежаемость пачек глубинных пород фундамента и дацитов Орлинского субвулкана.

1 - Диопсидовые гнейсы нижней толщи разреза Закоронного выступа; 2 - дациты Орлинского субвулкана; 3 - маршрутный ход.

Секущие контакты этих магматических пород с метаморфитами тоже наблюдались, но они не доминируют, как должно было бы быть у даек. На Геокарте-200 эти моменты были все-таки учтены - порфириды отрисованы уже не дайками, а как силлы, лопполиты, штоки и т.д., но, как и в прежних схемах, они оторваны по возрасту от гранодиоритовых интрузий. Вместе с тем, на этой карте вполне просматривается пространственная связь порфиридов и гранодиоритов (рис. 3). Уже это одно есть серьезный довод против разнесения данных пород по разным возрастам, тем более, что на всем закартированном листе ни той, ни другой породы не отмечено нигде, кроме как здесь, в границах Закоронного выступа.

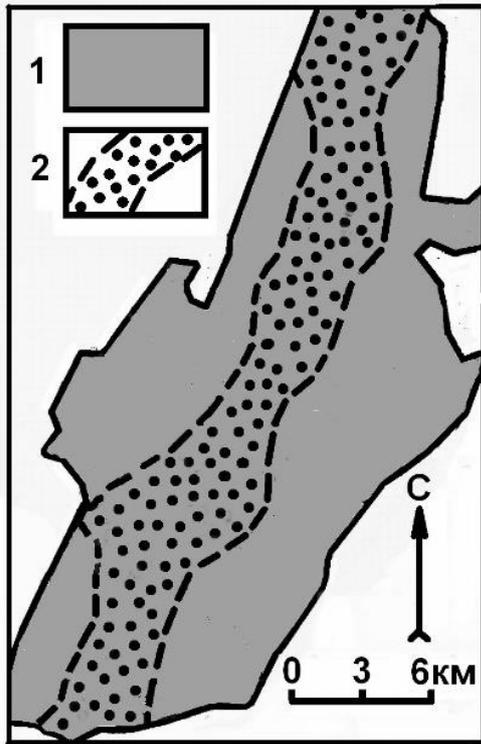


Рисунок 3 – Деталь строения Закоронного выступа, выявляемая по карте м-ба 1:200000 (2001 г.)

1 - Закоронный выступ в границах карты 1:200000; 2 – полоса проявлений гранодиоритовых массивов (PR_1) и площадных выходов кварцевых диорит-порфиритов (C_1).

Вне указанной полосы из этих двух пород отмечаются только немасштабные дайки диорит-порфиритов, с неясным распространением их по выступу из-за неясности их разграничения с полями меловых даек разных составов

Есть и другие веские доводы в пользу комагматичности двух этих типов пород (далее - гранодиоритов и дацитов):

1. Структура дацитов – порфировая, при фельзитовой, микрокристаллической или микрогранитовой структуре основной массы, что и свидетельствует о приповерхностном их образовании.
2. В порфировых вкрапленниках в них преобладает плагиоклаз (олигоклаз, иногда олигоклаз-андезин), затем роговая обманка, биотит и в несколько меньшей степени кварц бипирамидальной формы, характерной именно для приповерхностных пород. Этот минеральный состав вполне соответствует полнокристаллическим гранодиоритам. Можно указать, что параллельно с дацитами здесь иногда отмечаются так же порфировые альбитофиры (с альбитом и в основной массе, и во вкрапленниках) и изредка липарит-порфиры.
3. Временные отношения гранодиоритов и дацитов двузначны. С одной стороны, отмечено рассечение тела гранодиоритов дацитами с коркой закалывания (рис. 4) – тут дациты явно моложе. Обратная картина на фото с включением обломка дацита в гранодиорите (рис. 5). А на рис. 6 уже блок гранодиорита в дацитах. Все это указывает на одновозрастность обеих пород, т.е. на чередование фаз становления (внедрения) тех и других².
4. Описанные породы пространственно сочетаются именно по типу субвулканических массивов (см. рис. 1) - цепь выходов глубинных гранодиоритов окружена периферией вулканогипабиссальных дацитов

² Позднее М.Л.Гельман [1] обобщил подобные примеры, высказав соображение, что в магматических процессах понятие «одновременность» заметно более растянуто, чем при образовании слоистой оболочки. Очевидно, он имел в виду и описанные тут наблюдения на Орлинском субвулкане, будучи знаком с ними как начальник партии региональной геологии ЦКТЭ СВПГО, в которой и были поставлены данные исследования как помощь геологосъемочным отрядам.

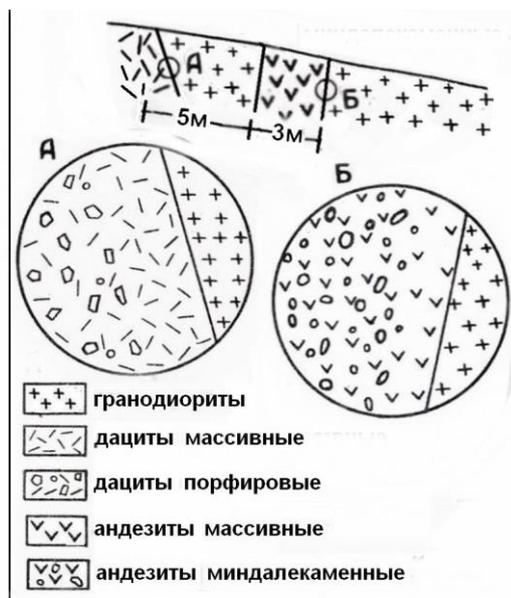


Рисунок 4 – Зарисовка борта промоины на Орлинском субвулкане.

Свидетельства относительной молодости дацитов и андезитов (последние вне темы статьи) – корки закаливания по их контактам с гранодиоритами, наблюдаемые прямо в обнажении и показанные в увеличенных кружках.

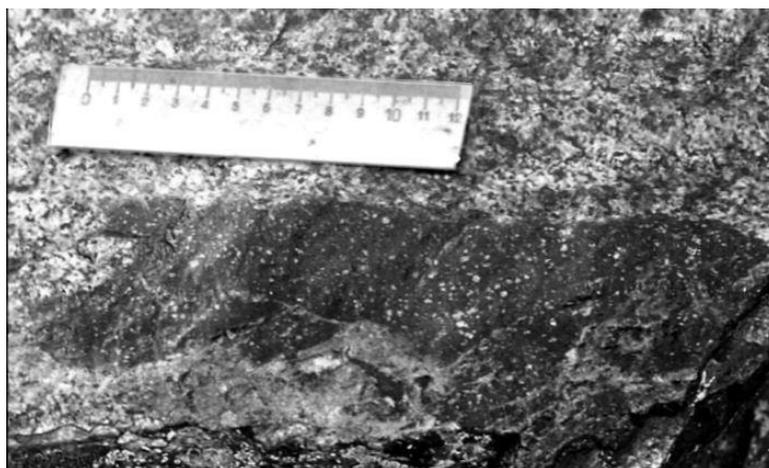


Рисунок 5 – Включение дацита в гранодиорите.

Гранодиорит – серый, крупнозернистый. Дацит – более темный, сливной, с белыми вкрапленниками плагиоклаза.

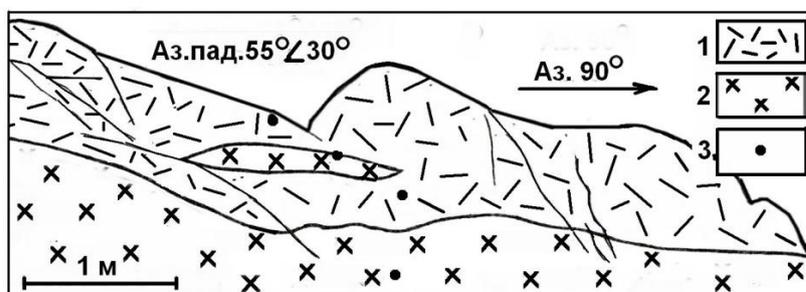


Рисунок 6 – Линзовидный блок гранодиоритов, «плавающий» в перекрывающих дацитах Орлинского субвулкана.

1 – дациты, 2 – гранодиориты, 3 – места отбора образцов.

Имеется, правда, и некоторый противоречащий аспект - дациты и альбитофиры содержат кремнекислоты в среднем на 3% меньше, чем гранодиориты. Этот нюанс необходимо еще

прояснить, но в любом случае он не перевесит все положительные доводы в пользу существования цельной структуры – Орлинского субвулкана, названного так по Орлинскому гранодиоритовому массиву, обнажающемуся в южной части Закоронного выступа.

3. Выводы

На единство происхождения гранодиоритов и дацитов (по более ранней номенклатуре – кварцевых диорит-порфиров) указывает целый комплекс данных: сходство минерального состава, их конкретные (структурные) взаимоотношения друг с другом, их площадные отношения (картировочный признак) и прямые наблюдения контактов. Все это дает основание для постулирования комагматичности этих двух типов пород, и выделения четкой геологической структуры – Орлинского субвулкана.

4. Литература

[1] Gelman M. L. Time in the kingdom of Neptune and time in the kingdom of Pluto: the same or different categories? In the collection "Readings in memory of Academician K.V. Simakov". – Magadan: SVNTS FEB RAS, 2009. – P.51-52.

ДВА РАЗНЫХ ПОДХОДА К ИЗУЧЕНИЮ И КАРТИРОВАНИЮ ФУНДАМЕНТА ОМОЛОНСКОГО МАССИВА

Бер Левин

Иерусалим, 9330621, Израиль, Bernice str., h.12-a

TWO DIFFERENT APPROACHES TO STUDYING AND MAPPING THE OMOLON MASSIF BASEMENT

Ber Levin

h.12-a, Bernice str., Jerusalem, 9330621, Israel

Annotation. Two geological maps of the scales 1:50,000 and 1:200,000 shows the southeast ledges of the basement of the Omolon Massif (Russia, Magadan region) in a fundamentally different way. This provides an opportunity to compare the results of two different approaches to the study of profoundly metamorphized formations. The geostructural method on the map of 1:50,000 allocate 9 geological units, connected in series to each other in a single geological structure. And on the map 1:200,000 made by geohistorism method has 5 disconnected subdivisions and no structure is visible.

1. Введение

Фундамент Омолонского массива (РФ, Магаданская обл.) обнажается на дневной поверхности в ряде его выступов. Из них наиболее крупными и представительными являются два сближенных друг с другом юго-восточных выступа - Закоронный и Ауланджинский. Оба они были закартированы в масштабе 1:50000 в 80-90-х годах (далее - Геокарта-50), а затем, на рубеже веков – в масштабе 1:200000 (далее - Геокарта-200). В разбираемых выступах указанные карты настолько отличны друг от друга, что создается впечатление картирования в них совершенно разных образований, и такой разницей требует выявления его причин.

2. Различия комплексов фундамента по двум картам

Для начала необходимо ясно сформулировать, в чем заключаются отличия отображения одних и тех же образований на Геокарте-50 и Геокарте-200. Уже визуально эти отличия видны на прилагаемых ниже картах-схемах (рис. 1 и 2), но вначале лучше систематизировать их по пунктам, что бы сопоставлять карты уже целенаправленно.

1. В Ауланджинском выступе Геокартой-50 откартировано в общей сумме 9 геологических подразделений (считая с подсвитами), а Геокартой-200 – лишь 4. Закоронный выступ расчленен Геокартой-50 на 5 метаморфических единиц, а Геокартой-200 – только на две. Более чем двукратное уменьшение детальности картирования не связано с различием масштабов – размеры геологических тел, отраженных в Геокарте-50, вполне вписываются и в масштаб 1:200000.

2. По Геокарте-50 разрезы Закоронного и Ауланджинского выступов ясно коррелируют друг с другом. Некоторые латеральные различия этих выступов не мешают их сопоставлению в силу сохранения в них сходной вертикальной последовательности разрезов. А на Геокарте-200, наоборот, выступы противопоставлены друг другу – никакой связи между ними не фиксируется.

3. На Геокарте-50 отчетливо проявляется общая структура, связывающая воедино оба выступа – субмеридиональная синклиналиная зона с некоторым широтным аппендиксом. Геокарта-200, наоборот, являет собой «лоскутное одеяло», без какой-либо фиксируемой связи отдельных лоскутов друг с другом, причем их границы пересекают по живому единые породные комплексы. А в Закоронном выступе границы проведены вообще вкрест простираний пород (указанных там же!), да и сами подразделения, в нем выделяемые, стыкуются как шахматные клетки.

4. Две серии, выделенные в Геокарте-50 - и золотогорская, и приискательская, полностью охватывают оба выступа, слагая их общую структуру. Геокарта-200 урезала и ту, и другую до одного Ауланджинского выступа, а золотогорскую обкорнала даже и в нем, отрезав от нее там ее нижнюю половину.

5. Обе серии в Геокарте-50 состоят из нескольких стратиграфических единиц (подсвит, свит, толщ), и каждая серия является законченным циклом, что и составляет их характерную структурную особенность. Геокарта-200 не расчленяет золотогорскую серию вообще, а приискательскую делит на две метаформации одного стратиграфического уровня (так указывает ее легенда). То есть, тут внутренняя структура серий не выявляется.

6. Вещественный состав обеих серий в Геокарте-200 так же подвергся резкому изменению. В частности, из золотогорской серии здесь оказались полностью исключены гиперстеновые гнейсы, тогда как по Геокарте-50 они являются самой характерной и наиболее объемной ее составляющей. А в приискательской серии в том же Ауланджинском выступе по Геокарте-200, наоборот, вдруг интенсивно проявились породы с гиперстеном, затершие здесь, тем самым, ее резкое отличие от золотогорской серии.

При этом, по изложенному в п.п. 4-6, возникает вопрос о правомерности использования Геокартой-200 названий, закрепленных ранее в Геокарте-50 за образованиями с совершенно другим распространением, структурой и наполнением.

3. Непосредственное сопоставление двух карт

Теперь очередь дошла до визуального сравнения разбираемых карт по картам-схемам на рис. 1 и 2.

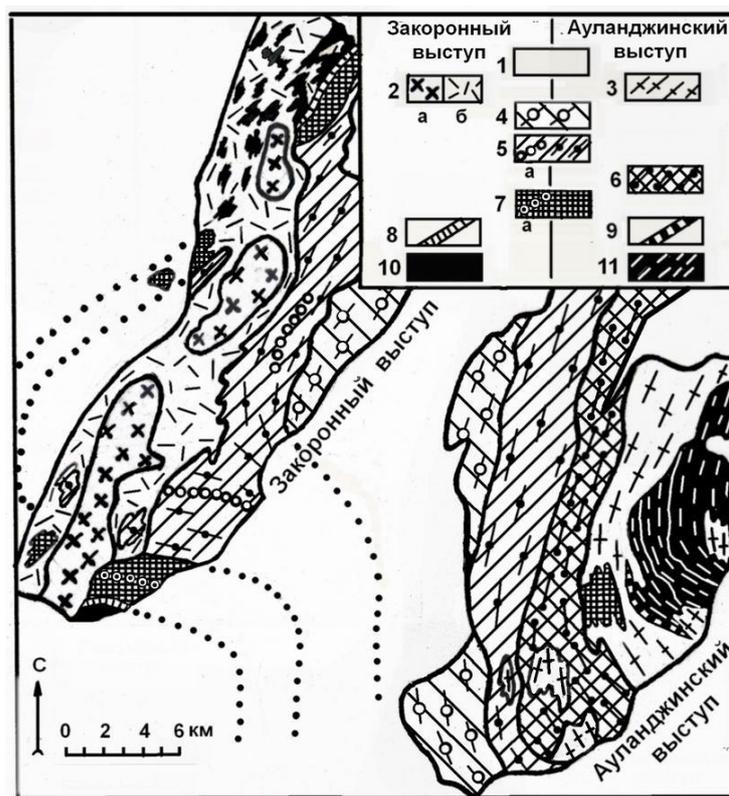


Рисунок 1 – Карта-схема строения юго-восточных выступов фундамента Омолонского массива по картам м-ба 1:50000.

1 - чехол массива (Rf и выше). Магматические образования, развитые по метаморфическим комплексам (2-3): 2 - Орлинский субвулкан гранодиоритового (а) и дацитового (б) состава; 3 - параавтохтонная интрузия биотитовых гранито-гнейсов. Приискательская серия фундамента (4-6): 4 - евгеньевская свита, 5 - дождинская свита (5-а - картируемые в ней пачки гранатовых гнейсов), 6 - гошинская свита. Золотогорская серия фундамента (7-11): 7 - важенковская свита (7-а - картируемая в ней пачка амфиболовых гнейсов), 8 - кальцифировая толща, 9 - гранат-пириболитовая толща, 10 - диопсидгнейсовая толща, 11- анюткинская свита (сплошные белые линии – границы трех ее подсвит). Точечные линии - интерполяция границ подразделений, скрытых чехлом массива.

Характеристика разрезов такова³.

Золотогорская серия:

Анюткинская свита (2300 м) разделена на три подсвиты. В ней преобладают гиперстеновые и двупироксеновые гнейсы, реже только с диопсидом; присутствуют двупироксеновые сланцы и глиноземистые породы (гранатовые, биотит-гранатовые, ± силлиманит и/или кордиерит); редки эклогитовые сланцы (Gr+Di+Hyp+Pl) и ультрамафиты. В нижней подсвите, сравнительно с другими, повышена роль двупироксеновых сланцев (до 25%), а в верхней - глиноземистых пород (до 10%).

Гранат-пириболитовая толща (до 300 м) – эклогитоподобные породы (Gr+Di+Pl±Hrb±Hyp), гранат-амфиболовые и гранат-гиперстеновые плагиогнейсы, гранатовые амфиболиты, а также безгранатовые породы, аналогичные залегающим ниже.

Важенковская свита в Ауланджинском выступе обнажается в виде отдельных блоков гранатовых гнейсов в теле параавтохтонной интрузии биотитовых гранито-гнейсов (ее стратотип в соседнем Закоронном выступе – 860 м)

Приискательская серия:

Гошинская свита (до 1500 м) – переслаивание амфиболитов, амфиболовых гнейсов и кварцитов в равных соотношениях, а также редкие гранат-биотитовые породы и еще более редкие эклогитовые амфиболиты (Gr+Pl+Hrb+Di±Hyp).

Дождинская свита (1000-2000 м) – амфиболовые гнейсы, местами с прослоями амфиболитов и гранат-биотитовых гнейсов.

Евгеньевская свита (750-2000 м) – биотитовые и гранат-биотитовые гнейсы, подчас с графитом, и редкие амфиболиты.

Разрез Закоронного выступа отличается большей массивностью горных пород и несколько повышенной карбонатностью – присутствуют прослои кальцифиров (в Ауланджинском выступе таковых нет), но в целом он коррелирует с ауланджинским разрезом. Анюткинской свите здесь соответствует диопсид-гнейсовая толща, содержащая и более редкие гиперстеновые гнейсы. С маломощной гранат-пириболитовой толщей параллелизуется тоже маломощная кальцифировая толща, а еще выше здесь идут уже напрямую свиты ауланджинского разреза за исключением выпадающей тут гошинской свиты.

Обе серии сходны своим циклическим строением – содержание темноцветных пород в каждой из них уменьшается снизу вверх с 25-30% до 2-5%, а глиноземистые породы (гранатовые, гранат-биотитовые, биотитовые), наоборот, резко возрастают вверх по разрезу каждой серии от 0-2% до 90-95 %.

³ Более детально с характеристикой метаморфического фундамента Омолонского массива можно ознакомиться по ссылке <http://berlev.info/?p=1378>. Там приведены все основания для его расчленения, принятого в Геокарте-50, включая фотографии, зарисовки и пр.

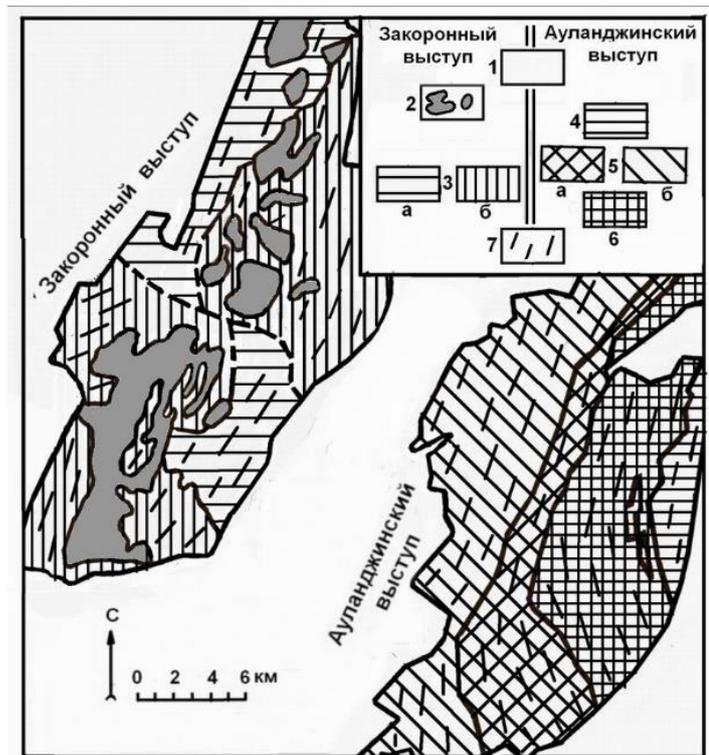


Рисунок 2 – Карта-схема тех же выступов, что на рис.1, но уже по карте м-ба 1:200000.

1 - чехол массива (Rf и выше). **Закоронный выступ (2-3):** 2 - площадные магматические проявления в пределах этого выступа преимущественно кислого состава, разной глубинности и разных возрастов (Pg, Pz, C), 3 - закоронинская серия (а - сланцево-эндербитовая метаформация, б - гнейсо-кальцифировая метаформация). **Ауланджинский выступ (4-6):** 4 - анманджинский ультраметаморфический подкомплекс, 5 - приискательская серия (а - амфиболит-гнейсовая метаформация, б - сланцево-гнейсовая метаформация), 6 - золотогорская серия, 7 - простирации сланцеватости или слоистой перемежаемости. Штриховые линии - границы комплексов, скрытые четвертичными отложениями долины р. Омолон.

Характеристика подразделений, выделяемых в Геокарте-200 (взята с легенды карты).

Закоронный выступ (по карте - Закороннинская структурно-формационная зона)

Сланцево-эндербитовая метаформация: амфибол-двупироксеновые, пироксен-скаполит-амфиболовые кристаллосланцы, эндербиты и амфиболиты.

Гнейсо-кальцифировая метаформация: биотит-гранатовые, гранатовые гнейсы, плагиогнейсы, кальцифиры

Ауланджинский выступ (по карте - Ауланджинская структурно формационная зона)

Анманджинский подкомплекс ультраметаморфический. Чарнокитоиды, биотитовые и биотит-гиперстеновые гнейсы.

Приискательская метаморфическая серия.

Амфиболит-гнейсовая метаформация: диопсидсодержащие амфиболиты, лейкократовые биотитовые, биотит-гранат-силлиманитовые, биотит-гранат-кордиеритовые гнейсы, гранатиты.

Сланцево-гнейсовая метаформация: гранат-биотитовые, гранат-биотит-гиперстеновые, биотитовые гнейсы и плагиогнейсы, амфибол-двупироксеновые, гранат-биотит-гиперстеновые кристаллосланцы.

Золотогорская метаморфическая серия. Амфибол-двупироксеновые кристаллосланцы, амфиболовые эклогиты, амфиболиты, гранат-биотитовые и биотитовые гнейсы

4. Различие в подходах к картированию

Перечисленные выше пункты не исчерпывают всех различий двух карт, и некоторые дополнительные их отличия можно увидеть уже в приведенных кратких характеристиках комплексов в разбираемых картах. Но и без этих дополнений можно сопоставить результативность двух диаметрально противоположных подходов, как к картированию, так и

вообще к геологическому изучению древнейших комплексов. Один из них, положенный в основу Геокарты-50, это – структуралистский подход, когда изначально подлежат выявлению и сопоставлению вещество и структура геологических образований, т.е. натура в ее современном состоянии. И уже затем, следующим этапом, выстраивается временная шкала – что произошло раньше, а что позже, базирующаяся конкретно на пространственных (структурных) взаимоотношениях материальных, ясно фиксируемых объектов. В практическом плане этот подход требует внимательных наблюдений и скрупулезной документации, что и делает его вполне доступным для внешней проверки как в лабораторных, так и в полевых условиях. Исходную основу другого метода (подчас обозначаемого как исторический подход), на котором и построена Геокарта-200, составляют представления о древних глубинных процессах, домысливаемых по некоторым сконструированным методикам, и далее уже под них выстраивается все геологическое наполнение. То есть, здесь определяющий фактор – субъективное мнение исследователя.

5. Выводы

Применение геоструктуралистского метода при изучении и картировании кристаллических комплексов фундаментов дает более качественные и объективные результаты, чем методики, основанные на домысливании процессов, протекавших в геологические времена.

ЮЖНО-ЯКУТСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 1989 г.: 30 ЛЕТ СПУСТЯ

Александр Макаров, Борис Козьмин

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

30 YEARS AFTER – SOUTH YAKUTIAN EARTHQUAKE 1989

Aleksandr Makarov, Boris Koz'min

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

Annotation. The South Yakutian earthquake remains one of the largest seismic events on the territory of the Republic Sakha (Yakutia) to date. It is comparable in scale and magnitude even to the recent events in Turkey. A summary analysis of old materials (Moho boundary information) and new data (geophysical fields, CRUST 1.0 velocity model), using the technology of visualization of the hypocenter field for the entire period of instrumental observations in relation to the South Yakutia epicenter field, was carried out.

1. Введение

На сегодняшний день Южно-Якутское землетрясение остается одним из крупнейших сейсмических событий, отмеченных на территории южных районов Республики Саха (Якутия). По макросейсмическим проявлениям и магнитуде ($M_s = 6.6$), сравнимым даже с недавними событиями в Турции. Был проведен обобщающий детальный анализ прежних материалов и новейших данных, с применением технологии визуализации гипоцентрального поля за весь период инструментальных наблюдений (1963–2021 гг.) по отношению к Южно-Якутскому эпицентральному сейсмотектоническому узлу.

2. Совместный анализ геолого-геофизических сведений

Южно-Якутское землетрясение произошло 20 апреля 1989 г. в 22 ч. 59 мин. 54.8 с по Гринвичу в междуречье рек Алдана и Олекмы. Оно было зафиксировано более 500 сейсмическими станциями Мира. Его максимальная интенсивность составила 7-8 баллов в (эпицентральной) плейстосейстовой зоне, где рядом располагалась стоянка геологов Сыллах. Очевидцы описывали этот эффект движением земли (в виде волн) под ногами, резкой тряской стен и крон деревьев, падением железной печки трубы и мощным гулом, который был зафиксирован в 133 пунктах в радиусе 755 км от эпицентра. Воздействие толчка от 3-х до 8 баллов проявилось в Южной Якутии, Забайкальском крае, Иркутской и Амурской областях, Бурятии и в пограничных районах КНР с Российской Федерацией на гигантской площади почти 1,5 млн. кв. км [1].

Ранее в пределах западной части Олекмо-Станового пояса было известно три эпицентральных поля: Олекминское, Тас-Миелинское и Ларбинское [2], расположенные за пределами Чульманской впадины, в самой же впадине отмечались единичные толчки, не превышающие $M=2$. Однако в 1989 г. произошло около 20 событий, превышающих максимальный порог магнитуды и 3000 афтершоков. После главного события было установлено 5 временных станций, для регистрации афтершокового процесса [1]. С тех пор сеть стационарных станций на территории Южной Якутии и прилегающих к ней областей расширилась, а число зарегистрированных событий на этой территории увеличилось в 6 раз и стали доступны новые данные и технологии.

На основе этих данных был проведен анализ проявления эпицентрального поля Южно-Якутского землетрясения и его взаимосвязи с геофизическими аномалиями. В результате можно отметить его приуроченность к градиентам магнитного (-2; +3) и гравитационного (-22; -12) полей [3] в комплексе дающих представление о существовании здесь крупной аномалии в

земной коре. Это также подтверждается определениями мощности земной коры по данным скоростей сейсмических волн. Для района Байкальского рифта (БРЗ) мощность коры составляет в среднем 40-45 км, а для Олёкмо-Становой ОСЗ 55-60 км [4]. Именно на контакт этих двух областей приходится аномалия в земной коре и локализован очаг главного землетрясения.

Однако по данным разрезов скоростной модели земной коры CRUST 1.0 [5] в меридиональном направлении наблюдается ступень опускания границ скоростных слоев с севера на юг (рис. 1В), как и в широтном плане – запада на восток (рис. 1Б).

Сводная карта сейсмичности за 60-летний период четко показывает преобладающий уровень сейсмичности Чаро-Олекминского блока по отношению к другим блокам, расположенным на юге республики. В тектоническом плане это может быть обосновано столкновением Амурской и Евразийской литосферных плит или влиянием развития Байкальской рифтовой зоны в восточном направлении.

В 2020 году, спустя 30 лет, наблюдалась плотное облако местных землетрясений, указывающих на реактивацию современных процессов в направлении Охотского моря.

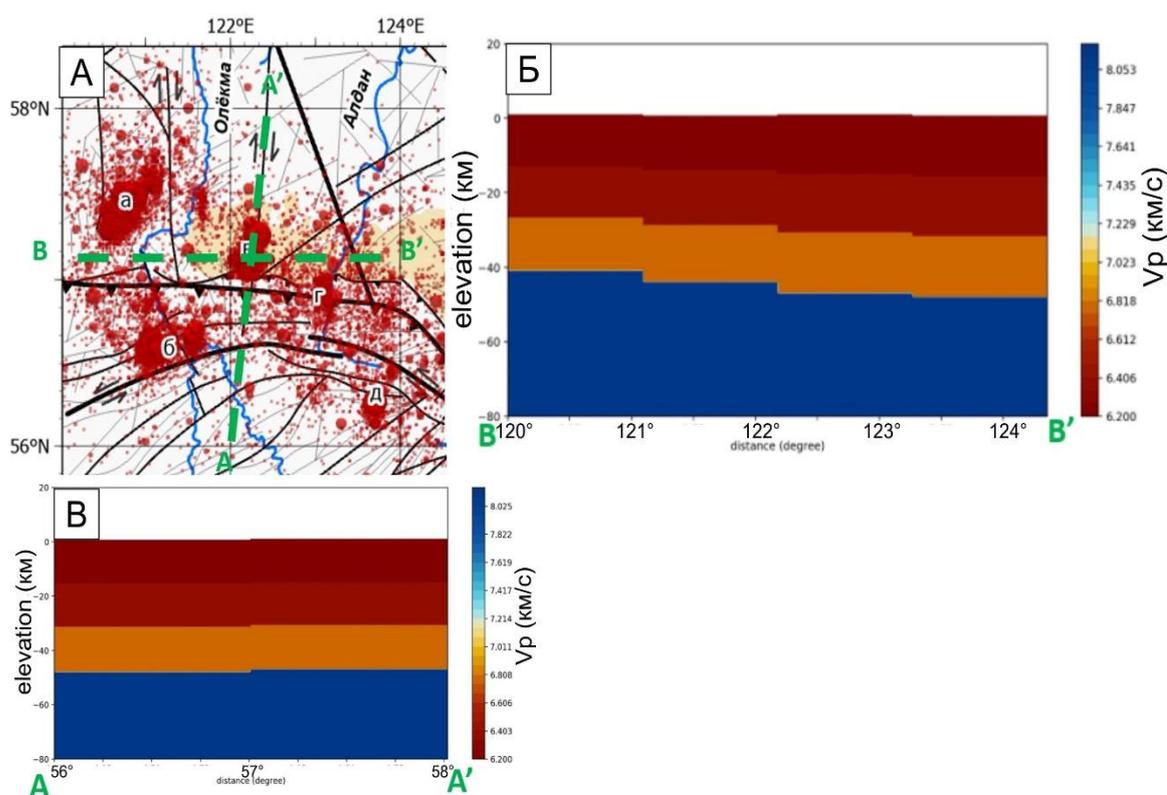


Рисунок 1 – А - Схема распределения эпицентров западного фланга Олекмо-Становой зоны в период 1963-2022 гг.; Б-В - Разрезы В-В', А-А' скоростной модели CRUST 1.0.– соответственно

Пространственное распределение толчков в гипоцентральной области главного толчка основанно на инструментальных наблюдениях (1963-2022 гг.) в интервале глубин 15-30 километров, где концентрируется наибольшее число афтершоков (рис.2).

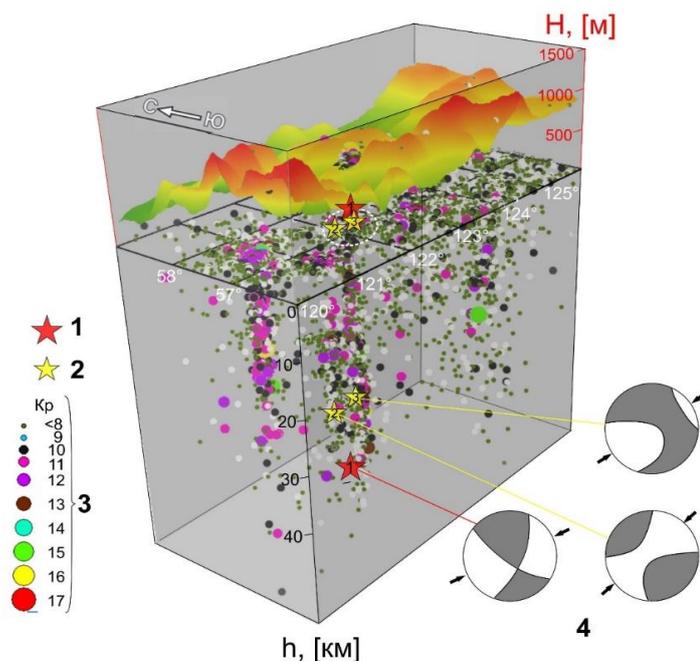


Рисунок 2 – 3D модель распределения гипоцентров в западной части Алдано-Станового геоблока (1 – Главный толчок Южно-Якутского землетрясения 20.04.1989 г., 2 – сильные афтершоки, 3 – градиация гипоцентров по энергетическому классу $Kp=8-17$, фокальные механизмы сильных событий по данным ISC, на рельеф вынесена проекция Южно-Якутского эпицентрального поля, к главному толчку приведен фокальный механизм).

3. Выводы

Эти факты, возможно, указывают на причину прерывания («остановку») развития Байкальского рифта в восточном направлении, которому препятствует присутствие крупной аномалии в пределах земной коры и верхней мантии.

4. Благодарности

Исследование выполнено по плану НИР ИГАБМ СО РАН (проект № FUEM-2019-0001).

5. Литература

- [1] Earthquakes in the USSR in 1989, Moscow, 1989, 399 pp.
- [2] Rep. ed. Shkodzinsky V.S. Historical Geology of Yakutia: Anniversary Collection - Yakutsk: Publishing House of the YaNTs SB RAS, 2007. - 244 p.
- [3] Kardash A. A set of digital materials on a sheet of the state map of the Russian Federation, scale 1:20000 (second edition). Moscow. Moscow branch of FSBI "VSEGEI", 2019
- [4] Suvorov V.D., Kornilova Z.A., Chudaeva I.Ya. Velocity Features of the Earth's Crust in the Zone of the South Yakutsk Earthquakes of 1990 According to Epicentral Observations// Volconology and seismology, 1993. vol. 4. pp.98-104
- [5] Laske, G., Masters, G., Ma, Z., Pasyanos, M., 2013. Update on CRUST1.0 - A 1-degree Global Model of Earth's Crust, in: Geophys. Res. Abstracts. European Geophysical Union. Vol. 15, pp. EGU2013-2658.

**О БРАХИОПОДАХ ЛЕВОБЕРЕЖЬЯ НИЗОВЬЕВ РЕКИ ЛЕНЫ
(ЧЕКУРОВСКИЙ РАЗРЕЗ)**

Виктор Макошин, Руслан Кутыгин

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

**ON A BRACHIOPODS OF THE LEFT BANK OF THE LOWER REACHES OF THE
LENA RIVER (CHEKUROVKA SECTION)**

Victor Makoshin, Ruslan Kutugin

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

Annotation. For the first time, for the left bank of the lower reaches of the Lena River, a sequence of Asselian-Sakmarian zonation of Verkhoianie has been established. *Jakutoproductus lenensis* beds, as well as of *Jakutoproductus insignis*, *Jakutoproductus terechovi* and *Jakutoproductus rugosus* zones are identified in the Khatystakh Formation of the Chekurovka section. A similar biostratigraphic zonation of Permian was identified previously in the Kubalakh section (right bank of the lower reaches of the Lena River). The identification of biostratigraphic units allowed for a direct correlation of the Chekurovka section with the Asselian-Sakmarian deposits of the Verkhoianie and Kolyma-Omolon Region containing common zonal index-species.

1. Введение

Ранее нами было разработано детальное биостратиграфическое деление нижней части перми правого берега низовьев р. Лены (Кубалахский разрез) по брахиоподам [1-3]. Для левобережья низовьев р. Лены такие работы ранее не проводились.

Среди ключевых разрезов пермских отложений левобережья низовьев р. Лены рассматриваются три обнажения – низовья рек Булкур и Хатыстах, а также разрез севернее села Чекуровка. В результате изучения этих разрезов, Т.М. Емельянцева с коллегами [4] пришли к выводу, что литолого-фациальные особенности пермских осадков от Чекуровского мыса (Чекуровская антиклиналь) до рек Хатыстах и Булкур (Булкурская антиклиналь) меняются очень слабо. Следует отметить, что исследователи тех лет не проводили свитное деление пермских отложений левобережья низовьев р. Лены, а делили пермские отложения на нижний и верхний отделы [4-5]. В.Н. Андрианов [6] предлагал для пермских отложений Чекуровского разреза использовать стратиграфическую схему А.С. Каширцева с коллегами [7, разработанную на Кубалахском разрезе для правого берега низовьев р. Лены, такого же мнения придерживался и Б.С. Абрамов [8]. И.В. Будников с коллегами [9] для левобережья низовьев р. Лены предложили использовать джаргалахскую и бурскую толщи, выделенные в скважинах северо-восточной части Сибирской платформы. Такое деление было принято на последнем Северо-Восточном межведомственном стратиграфическом совещании [10] и указанные толщи вошли в Унифицированную стратиграфическую схему пермских отложений Верхояно-Охотского субрегиона. Согласно последней схеме, использовавшейся составителями Легенды Нижнеленской серии листов второго издания среднемасштабной Государственной геологической карты [11], пермские отложения левобережья низовьев р. Лены делятся на хатыстахскую и булкурскую свиты, стратиграфическое соотношение которых близко к ранее применявшемуся здесь условному делению перми на два отдела. Признавая актуальность для пермской стратиграфии левобережья низовьев р. Лены именно этой схемы, мы должны признать необходимость тщательной ревизии стратиграфического объема хатыстахской и булкурской свит, а также положения границы между ними.

2. Основной раздел

В 2010 г. нами совместно с коллегами из СНИИГГиМС: И.В. Будниковым, Л.Г. Перегоедовым и С.К. Горяевым были изучены разрезы пермских отложений низовьев рек Булкур и Хатыстах, а также разрез севернее села Чекуровка (левобережье низовьев р. Лены). В результате проведенных полевых работ было установлено, что для биостратиграфического изучения нижней перми разрезы Булкур и Хатыстах малопригодны по причине обособленности небольших фрагментов обнажений ее базальной части от основных непрерывных разрезов. Наиболее перспективным для изучения и обоснования биостратиграфической схемы перми оказался Чекуровский разрез. Данный разрез отличается непрерывной литологической последовательностью слоев и наличием нескольких уровней с беспозвоночными, среди которых доминируют брахиоподы. В 2018 г. в результате повторного изучения Р.В. Кутыгиным Чекуровского разреза была сделана фотопанорама для всего разреза от протерозоя до низов юры, собраны новые палеонтологические коллекции и сделаны уточнения в литолого-стратиграфическом строении. В результате монографического изучения В.И. Макошиным раннепермских брахиопод, собранных в 2010 и 2018 годах, была установлена биостратиграфическая последовательность комплексов с брахиоподами в нижней части перми левобережья р. Лены.

Чекуровский разрез расположен на левом берегу р. Лены ниже села Чекуровка. Нижняя часть пермских отложений представлена хатыстахской свитой, которая охарактеризована моноклинально залегающими разномерными алевролитами с пачками и прослоями мелко- и среднезернистых песчаников. В разрезе установлено несколько уровней с брахиоподами рода *Jakutoproductus*.

Первый уровень выделен в нижней части хатыстахской свиты в мелкозернистом алевролите (верхняя часть слоя 30b). Здесь встречены единичные экземпляры брахиопод *Jakutoproductus* cf. *lenensis* Makoshin и *Rhynchopora* sp. Наибольший интерес вызывает вид *J. lenensis*, который был выделен в нижней части туорасисской свиты Кубалахского разреза в правобережье низовьев р. Лены [3]. Кроме Хараулахского хребта вид *J. lenensis* распространен в верхней части хорокытского горизонта Орулганского хребта (басс. р. Соболах-Маян) [12] и Западного Верхоянья (басс. р. Аллара-Хадарынья) [2]. На основании широкого географического распространения в Верхоянье вида *J. lenensis*, обладающего узким стратиграфическим интервалом было обосновано выделение одноименных слоев в верхней части зоны *Jakutoproductus verkhojanicus* хорокытского горизонта [2-3]. К слоям с *J. lenensis* относится рассмотренный интервал (слой 30b) Чекуровского разреза. При этом следует отметить, что в разрезе отсутствует нижняя часть хорокытского горизонта, которая наблюдается в Верхоянье ниже слоев с *J. lenensis*. Из этого можно сделать вывод, что в Чекуровском разрезе на кембрийско-пермское стратиграфическое несогласие приходится значительная часть зоны *verkhojanicus* ниже слоев с *J. lenensis*.

Второй уровень с брахиоподами приурочен к крупнозернистым алевролитам (кровля слоя 30a). Здесь наблюдается ракушняковый прослой с раковинами брахиопод, гастропод, двустворчатых моллюсков и наутилоидей. Среди найденных беспозвоночных доминируют брахиоподы, которые представлены многочисленными экземплярами *Jakutoproductus insignis* Abramov et Grigorjeva и единичные *Rhynchopora* sp. Вид *J. insignis* имеет большое значение для стратиграфии и корреляции нижнепермских отложений Северо-Востока России. По присутствию этого вида в основании огонерского горизонта Колымо-Омолонского региона В.Г. Ганелиным [13] установлена зона *insignis*, хорошо прослеживающаяся на Омолонском массиве и за его пределами. В Верхоянье по появлению вида *J. insignis* проводится граница хорокытского и эчийского горизонтов, а также выделена одноименная зона в нижней части эчийского горизонта [2; 14]. К зоне *insignis* в рассматриваемом разрезе относятся слои 30a, 29 и 28. Граница слоев 30b/30a сопоставляется нами с границей хорокытского и эчийского горизонтов.

Третий уровень с якутопродуктосами наблюдается в верхней части слоя 27b. В глинистых песчаниках и крупнозернистых алевролитах встречены раковины *Jakutoproductus terechovi*

Zavodowsky и *J. cf. terechovi* Zavodowsky. Вид *J. terechovi* является видом-индексом одноименной лоны средней части огонерского горизонта Колымо-Омолонского региона [15], а также одноименной зоны нижней части эчийского горизонта Верхоянья [2]. В Чекуровском разрезе к зоне *terechovi* относится слой 27b.

В кровле слоя 27a установлен следующий уровень с брахиоподами. В крупнозернистых алевролитах найден ракушняковый прослой с десятками раковин вида *Jakutoproductus rugosus* Ganelin и единичными раковинами *Neospirifer* sp., *Tomioopsis* sp. и *Anidanthus* sp. Вид *J. rugosus* является видом-индексом одноименной лоны верхней части огонерского горизонта Колымо-Омолонского региона [15], а также одноименной зоны эчийского горизонта Верхоянья [2].

Установленные комплексы брахиопод в нижней части пермского интервала Чекуровского идентичны ранее выделенным комплексам Кубалахского разреза. В обоих разрезах установлены зоны *Jakutoproductus verkhoianicus* (слои с *Jakutoproductus lenensis* в верхней части зоны), *Jakutoproductus insignis*, *Jakutoproductus terechovi* и *Jakutoproductus rugosus*. Однако мощность каждого биостратона в направлении от Кубалахского разреза к Чекуровскому сокращается в два раза, что следует учитывать при проведении седиментологических реконструкций и литолого-стратиграфических сопоставлений.

3. Выводы

На основе изучения коллекций раннепермских брахиопод, собранных авторами в Чекуровском разрезе, впервые для левобережья низовьев реки Лены установлена последовательность ассельско-сакмарских зональных подразделений Верхоянья. В хатыстахской свите Чекуровского разреза установлены слои с *Jakutoproductus lenensis*, выше которых в разрезе прослеживаются зоны *Jakutoproductus insignis*, *Jakutoproductus terechovi* и *Jakutoproductus rugosus*.

Установленное зональное деление идентично ранее выделенной биостратиграфической последовательности Кубалахского разреза правобережья низовьев реки Лены. При этом следует отметить уменьшение в два раза мощности биостратиграфических зон в Чекуровском разрезе и выпадении нижней части хорокытского горизонта (ниже слоев с *J. lenensis*), приходящемуся на стратиграфический перерыв между кембрийскими и пермскими отложениями.

Выделенные биостратиграфические подразделения позволяют провести прямую корреляцию Чекуровского разреза с ассельско-сакмарскими отложениями Верхоянья и Колымо-Омолонского региона на основании присутствия общих зональных видов-индексов.

4. Благодарности

Выражаем искреннюю благодарность И.В. Будникову, Л.Г. Перегоедову, С.К. Горяеву и А.Н. Килясову за участие в совместных полевых исследованиях. Изучение биостратиграфической последовательности брахиопод выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-77-10028, <https://rscf.ru/project/22-77-10028/>; литолого-стратиграфическое изучение разреза проводилось по госзаданию ИГАБМ СО РАН (FUEM-2019-0002).

5. Литература

- [1] Makoshin, V.I., Kutugin, R.V. Biostratigraphy and brachiopods of the Asselian–Sakmarian sediments of the Kubalakh section (lower reaches of the Lena River) // *Otech. Geol.*, 2014, no. 4, pp. 17–21 (in Russian).
- [2] Makoshin V.I., Kutugin R.V. Asselian–Sakmarian (Lower Permian) brachiopod zonation of the Verkhoian Region, Northeast Russia // *Stratigr. Geol. Correl.*, 2020, vol. 28, no. 7, pp. 716–744. – DOI: 10.1134/S0869593820040061.
- [3] Makoshin, V.I. New Species of *Jakutoproductus* from the Lower Permian of Verkhoian Region // *Paleontological Journal* 2016, vol. 50, no. 5, pp. 463–470. doi: 10.1134/S0031030116050087.
- [4] Emeliyantsev G.M., Kravtsova A.I., Puk P.S. Geology and prospects of oil and gas potential of the lower reaches of the Lena River. Leningrad, Gostoptehizdat, 1960, 146 p. (in Russian)

- [5] Bidzhiev R.A., Groshin S.I., Gorshkova E.R., Gogina N.I. State geological map of the USSR, scale 1:200,000. Nizhnelenskaya series. Sheet R-52-VII, VIII: Explanatory note. Moscow, Aerogeologiya, 1977, 80 p. (In Russian).
- [6] Andrianov V.N. Permian and some Carboniferous Ammonoids of Northeastern Asia. Novosibirsk, Nauka, 1985, 180 p. (in Russian).
- [7] Kashirtsev A.S., Kashirtsev V.A., Safronov A.F., Semenov V.P. Key section of the Carboniferous and Lower Permian sediments in the estuary of the Lena River // Proc. IX Sci. Conf. Eng.-Tech. Fac. Yakutsk, 1966, pp. 54–58. (In Russian).
- [8] Abramov, B.S. and Grigorjeva, A.D. Biostratigraphy and Brachiopods of the Permian of the Verkhoyansk Region. Moscow: Nauka, 1988, 204 pp. (in Russian).
- [9] Budnikov I.V., Budnikov V.I., Grausman V.V., Danilov V.I., Mikhaylova T.E. Lithostratigraphy of the Upper Paleozoic marginal troughs of the northeast of the Siberian platform // Stratigraphy and lithofacial analysis of the Upper Paleozoic of Siberia. Novosibirsk, SNIIGGiMS, 1991, pp. 5–14. (in Russian).
- [10] 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).
- [11] Andreev V.S., Kirichenko V.G., Shumov V.V., Panfilov A.N., Fedoseeva L.N., Selivanova V.V., Ivanenko G.V. Legend of the Nizhnelenskaya series of sheets of the State Geological Map of the Russian Federation at a scale of 1:200,000 (second edition). Moscow, Aerogeologiya, 2000, 134 p. (In Russian).
- [12] Kutugin R.V., Makoshin V.I., Budnikov I.V., Peregoedov L.G. Biostratigraphy of Asselian-Sakmarian deposits of the upper reaches Sobolokh-Mayan River of the Orulgan Range // Otech. Geol., 2018, no. 5, pp. 74–80 (in Russian). DOI: 10.24411/0869-7175-2018-10018.
- [13] Ganelin V.G., Biakov A.S., Karavaeva N.I. Some questions of the theory of stratigraphy and the stratigraphic scale of Permian in Northeast Asia // Ways for detailed elaboration of stratigraphic scales and paleogeographic reconstructions. Moscow, GEOS, 2001, pp. 194-209 (in Russian).
- [14] Makoshin, V.I., Kutugin, R.V. Correlation of the Asselian-Sakmarian deposits of Northern and Western Verkhoyanie by brachiopods // Arctic and Subarctic Natural Resources, 2019, vol. 24, no. 3, pp. 5–22 (in Russian). <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-3-1>.
- [15] Ganelin V.G. Taimyr-Kolyma subregion // The Main Features of Permian Stratigraphy in the USSR. Leningrad, Nedra, 1984, pp. 111–123 (in Russian).

ТЕРМАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ЛИТОСФЕРНОЙ МАНТИИ И ГЛУБИННЫЕ РАЗРЕЗЫ ПОД КИМБЕРЛИТОВЫМИ ТРУБКАМИ АЛАКИТ-МАРХИНСКОГО КИМБЕРЛИТОВОГО ПОЛЯ (СИБИРСКИЙ КРАТОН)

Максим Милаушкин, Владимир Мальковец, Анастасия Гибшер, Игорь Яковлев
ФГБУН «Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева»,
630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3

THERMAL STATE OF THE LITHOSPHERIC MANTLE AND DEEP SECTIONS BENEATH THE KIMBERLITE PIPES OF THE ALAKIT-MARKHA KIMBERLITE FIELD (SIBERIAN CRATON)

Maksim Milaushkin, Vladimir Malkovets, Anastasiya Gibsher, Igor Yakovlev
Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3, Akademika Koptyuga ave., Novosibirsk,
630090, Russia

Annotation. Clinopyroxene and garnet xenocrysts from the heavy mineral fraction of the Yubileynaya, Bobkova, TSNIGRI, Schukina pipes have been studied. With using single-clinopyroxene thermobarometry and the FITPLOT program the mantle paleogeotherm under the Yubileynaya kimberlite pipe was reconstructed. It corresponds to the 39.8 mW/m² surface heat flux, 230 km lithospheric thickness, and 110 thick “diamond window” for the Alakit-Markha field. According to the trace element composition of garnets, the predominance of rocks of two associations is established: depleted peridotites and deformed lherzolites metasomatized by silicate melts. Based on the calculations of equilibrium PT parameters using garnet monomineral geothermobarometry, the depths of the foundation of the depleted lithosphere (“Y edge”) have been calculated. Based on the depth distribution of peridotite garnets, sections of mantle columns beneath the kimberlite pipes were constructed. The predominant distribution of harzburgite-dunite garnets falls on the interval of the depths of 125-160 km, the thickness of the “diamond window” being ~34 km for the Bobkova pipe, ~73 km for TSNIGRI, ~23 km for Schukina. The diamond window thickness is likely to vary depending on the volume of rising fluid melts, and the degree of their effect on the lithosphere.

1. Введение

Мономинеральная клинопироксеновая геотермобарометрия широко используется в мантийной петрологии по причине относительной редкости мантийных ксенолитов, а также высокой степени вторичных изменений слагающих их минералов. Она применяется для реконструкции мантийных палеогеотерм, и позволяет оценить термальное состояние мантии в момент кимберлитового магматизма, мощность субконтинентальной литосферной мантии (СКЛМ) и ее строение под отдельными участками кратона. Термобарометрия по гранату и исследование его геохимических характеристик позволяет выяснить характер и степень метасоматических процессов в мантийных колоннах под отдельными кимберлитовыми телами.

В данной работе исследован химический состав клинопироксенов из концентрата тяжёлой фракции (КТФ) (199 зерен) трубки Юбилейная и микроэлементный состав гранатов из кимберлитовых трубок им. Бобкова (113 зерен), ЦНИГРИ (108 зерен), им. Щукина (170 зерен). Состав клинопироксенов определялся методом РСМА на приборе Jeol JXA 8100 в Центре коллективного пользования “Многоэлементных и изотопных исследований” ИГМ СО РАН (г. Новосибирск). Условия съемки: ускоряющее напряжение 15 кВ, сила тока 20 нА, диаметр пучка зонда 2—3 мкм. В качестве эталонов использовались аттестованные стандарты минералов и стекол.

Состав гранатов определялся методом LA-ICPMS с использованием квадрупольного масс-спектрометра XSERIES2 (Thermo Scientific), объединенного с устройством лазерного

пробоотбора с длиной волны 213 нм (New Wave Research, Nd:YAG твердотельный лазер) в Лаборатории экспериментальной геохимии и петрологии мантии Земли (Геолого-геофизический факультет Новосибирского государственного университета).

С помощью программы FITPLOT [1] была реконструирована мантийная палеогеотерма под трубкой Юбилейная. Для этого использовались P-T оценки для клинопироксена из КТФ, рассчитанные с помощью термобарометра, предложенного в работе [2]. По гранатам из КТФ с помощью термобарометра [3] и методологии по глубинному картированию, были охарактеризованы основные особенности мантии под трубками им. Бобкова, ЦНИГРИ, им. Щукина.

2. Результаты

На основе содержания $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ установлено, что 87,44% ксенокристаллов клинопироксена (174 зерна) соответствуют кратонным гранатовым перидотитам; 6,53% зерен содержат <0,5% Cr_2O_3 и попадают в поле эклогитов и пироксенитов; 6,03% в поле внекратонных шпинелевых перидотитов (Рисунок 1, а). Для расчета P-T параметров, с помощью термобарометра [2], использованы 63 зерна хром-диопсида, которые прошли проверку по протоколу [4]. В результате расчета из 63 зерен были исключены те, давления которых превышали 60 кбар, или были меньше 20 кбар, а также имели завышенные рассчитанные температуры (>1100 °C). Оставшиеся точки, в большинстве своём, варьируют в пределах 895-989 °C и имеют значения давлений от 40 кбар до 52 кбар, что соответствует глубинам ~125-162 км.

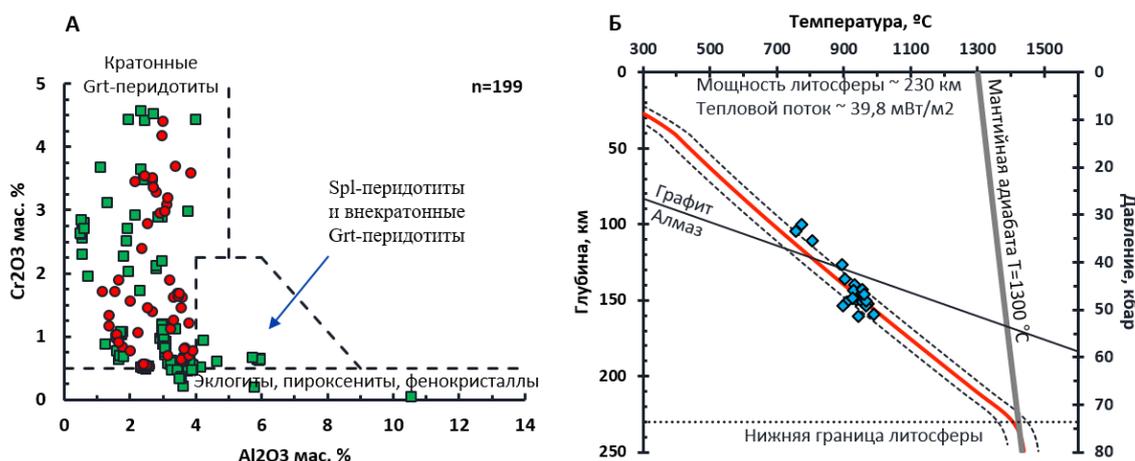


Рисунок 1 – А - Дискриминационная диаграмма $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ [2] и состав изученных клинопироксенов из трубки Юбилейная. Квадраты – не прошли отбор по фильтрам из протокола [4]; круги – зерна, использованные для реконструкции палеогеотермы. Б - Реконструированная геотерма под трубкой Юбилейная. Ромбики – P-T параметры клинопироксенов; пунктирные линии – погрешность реконструкции геотермы.

Построение линии геотермы по P-T параметрам производилось в программе FITPLOT [1]. В программу были введены значения мощности и теплогенерации верхней и нижней земной коры в исследуемом районе, 12 и 29 км; 1,12 и 0,4 мкВт/м³, соответственно [5, 6]. Значение теплогенерации в мантии принято равным 0, а значение температуры мантийной адиабаты на поверхности 1300 °C [1]. В результате было установлено значение поверхностного теплового потока равное 39,8 мВт/м². Мощность литосферы, определенная по пересечению геотермы с мантийной адиабатой, составила 230 км. По пересечению линии геотермы с границей перехода графит-алмаз и линией перехода литосфера-астеносфера определена мощность «алмазного окна» равная 110 км (Рисунок 1, б).

Для идентификации парагенезисов гранатов использована классификация $\text{CaO-Cr}_2\text{O}_3$ [3]. По содержанию $\text{CaO-Cr}_2\text{O}_3$ гранаты трубки Бобкова подразделяются на низко-Са-гарцбургиты (9,7%), Са-гарцбургиты (42,5%), лерцолиты (46,9%) и верлиты (0,9%) (Рисунок 2, а). По

распределению Y, Zr для трубки Бобкова характерны деплетированные гранаты (~42,48%, от общей выборки) с низкими содержаниями Y и Zr (Рисунок 2). К гранатам с признаками силикатного метасоматоза (высокие содержания Y, Zr) относится 27,43% гранатов (31 зерно), также присутствует 27,43% гранатов с признаками флогопитового метасоматоза (высокие содержания Zr, низкие содержания Y) и 2,65% (3 зерна) попадают в область фертильных гранатов. Группы гарцбургитов попадают преимущественно в область деплетированных парагенезисов и обладают S-образными спектрами распределения редкоземельных элементов (РЗЭ). Предполагается, что образование S-образных спектров РЗЭ в гранатах из гарцбургит-дунитов связано с метасоматическим воздействием карбонатитовых расплавов/флюидов, обогащенных LREE и обедненных HFSE, MREE и HREE [7].

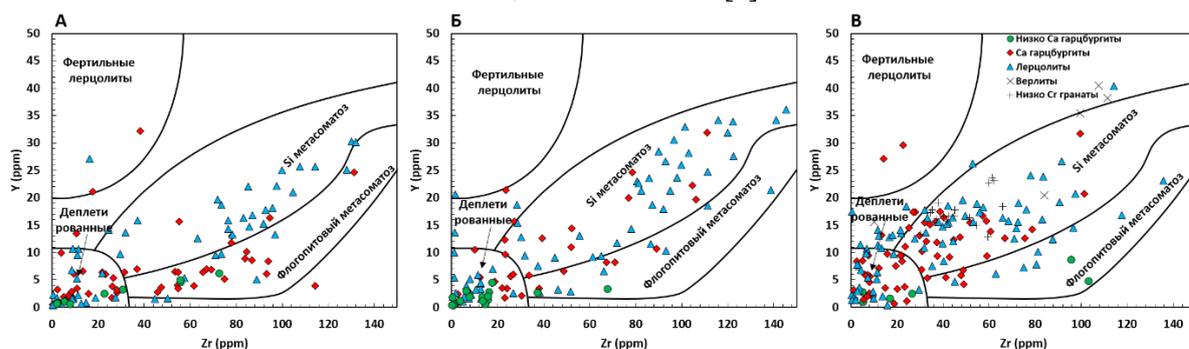


Рисунок 2 – Особенности редкоэлементного состава гранатов трубок Бобкова (А), ЦНИГРИ (Б), Щукина (В).

По содержанию $\text{CaO-Cr}_2\text{O}_3$ гранаты трубки ЦНИГРИ подразделяются на низко-Са-гарцбургиты (13,9% от 108 зерен), Са-гарцбургиты (28,7%), лерцолиты (56,5%) и низко-Сг гранаты (0,9%). Особенности редкоэлементного состава гранатов указывают на наличие деплетированных гарцбургитов и деформированных лерцолитов, метасоматизированных силикатными расплавами (Рисунок 2, 3). Среди гарцбургитовых гранатов трубки Щукина только половина попадает в поле деплетированных гранатов. Также выделяются низко-Сг гранаты, с повышенным содержанием Y. Их генезис связан с малоглубинными частями литосферной мантии [3], вне области стабильности алмаза. Рассчитанные РТ-параметры, выполненные по низко-Сг гранатам, также, как и для лерцолитов, не отражают объективных оценок давления и температуры равновесия минеральных ассоциаций [3].

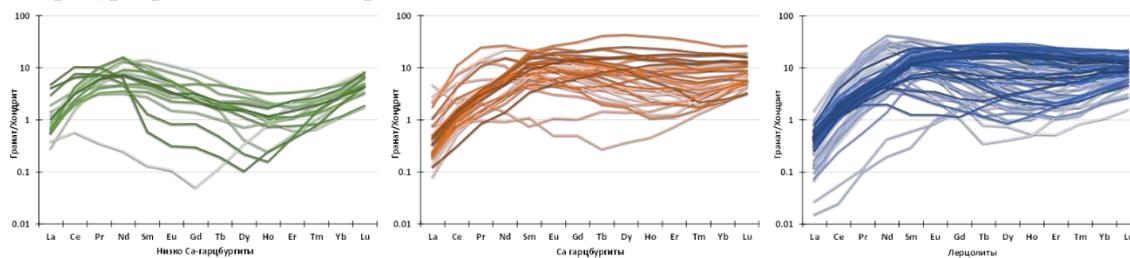


Рисунок 3 – Спектры распределения РЗЭ в перидотитовых гранатах из КТФ трубки ЦНИГРИ.

Для оценки Р-Т параметров в гранатах был использован термобарометр [3], основанный на коэффициенте распределения Ni между гранатом и оливином, сосуществующими в равновесии. На основе рассчитанных температур равновесия гранатов и содержания в них Y, была определена нижняя граница деплетированной литосферы – «Y-край». В гранатах из трубки Бобкова он составляет 967°C, ЦНИГРИ - 1041°C, Щукина – 855 °C. Для построения геотермы по гранатам перидотитового парагенезиса проведена проекция их температур на известную геотерму 35 мВт/м² (Рисунок 4).

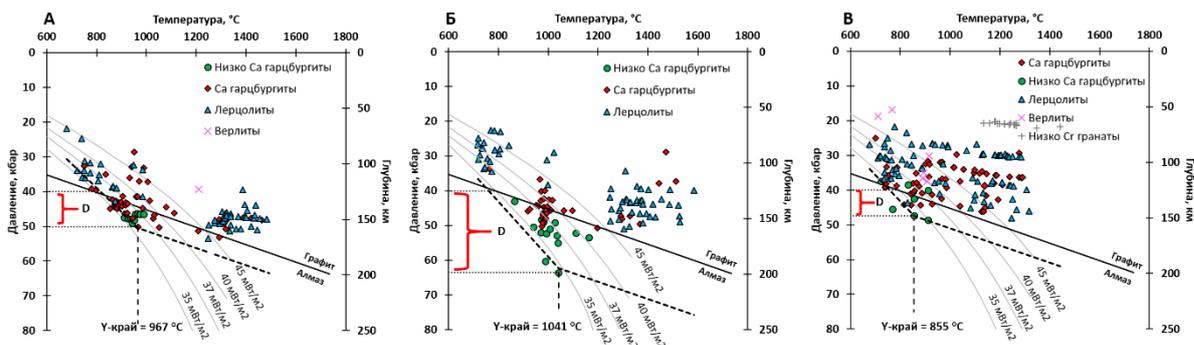


Рисунок 4 – P-T-разрезы литосферной мантии под трубками Бобкова (А), ЦНИГРИ (Б), Щукина (В) на основании данных Ni-в-гранате термометрии по [3] и Cr-в-гранате барометрии по [3]; геотермы по [9].

В результате для трубки Бобкова установлено преимущественное распространение гарцбургитовых гранатов в интервале глубин 125-159 км, а мощность алмазного окна ~34 км. Низко-Са гарцбургиты соответствуют полю стабильности алмаза (910-988°C и 46-49 кбар), в то время как часть Са-гарцбургитов находится вне его. Мощность «алмазного окна» под трубками ЦНИГРИ и Щукина составляет ~73 км и ~23 км, а глубина распространения гарцбургитовых гранатов 150-200 км и ~125-170 км, соответственно (Рисунок 5).

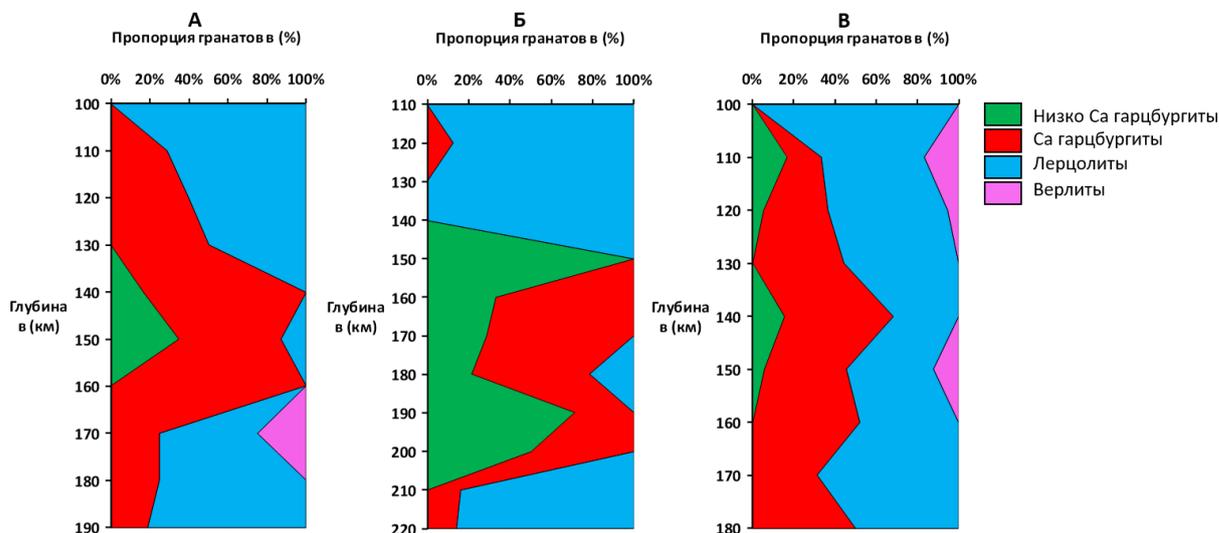


Рисунок 5 – Реконструкция глубинного разреза для кимберлитовых трубок Бобкова (А), ЦНИГРИ (Б), Щукина (В) по данным о распространности разных типов перidotитовых пород по [10].

3. Выводы

Исследованы ксенокристаллы клинопироксена и граната из КТФ трубок Юбилейная, им. Бобкова, ЦНИГРИ, им. Щукина. Реконструирована палеогеотерма для трубки Юбилейная, соответствующая тепловому потоку 39,8 мВт/м². Мощность литосферы на время проявления кимберлитового магматизма в D₃-С₁ составляла 230 км. Мощность «алмазного окна» под трубкой Юбилейная составляла 110 км. Рассчитанные P-T параметры клинопироксенов соответствуют диапазону глубин 125-160 км. Особенности редкоэлементного состава гранатов указывают на наличие деформированных лерцолитов, метасоматизированных силикатными расплавами. Области распространения гарцбургитов в мантийных колоннах под трубками Бобкова, ЦНИГРИ, Щукина несколько отличаются. Трубка Бобкова 125-159 км, ЦНИГРИ 150-200 км, Щукина 125-170 км. «Алмазное окно» может значительно варьировать под разными трубками. Вероятней всего, его мощность варьирует в зависимости от объема поднимающихся расплавов-флюидов, и степени их воздействия на литосферу.

4. Литература

- [1] 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.
- [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] 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.
- [4] 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.
- [5] Cherepanova Y. et al. Crustal structure of the Siberian craton and the West Siberian basin: An appraisal of existing seismic data //Tectonophysics. – 2013. – Т. 609. – С. 154-183.
- [6] McKenzie D., Jackson J., Priestley K. Thermal structure of oceanic and continental lithosphere //Earth and Planetary Science Letters. – 2005. – Т. 233. – №. 3-4. – С. 337-349.
- [7] Pearson D. G. et al. Re-Os, Sm-Nd, and Rb-Sr isotope evidence for thick Archaean lithospheric mantle beneath the Siberian craton modified by multistage metasomatism //Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1995. – Т. 59. – №. 5. – С. 959-977.
- [8] Ryan C. G., Griffin W. L., Pearson N. J. Garnet geotherms: Pressure-temperature data from Cr-pyroxene garnet xenocrysts in volcanic rocks //Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 1996. – Т. 101. – №. B3. – С. 5611-5625.
- [9] 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.
- [10] 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.

ТЕКТОНИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА СЕВЕРО-ВОСТОКА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ И ШЕЛЬФА МОРЯ ЛАПТЕВЫХ

Капитолина. Павлова, Александр Жарков

ФГБУН ФИЦ «ЯНЦ СО РАН» «Институт проблем нефти и газа СО РАН»,
677007, Россия, г. Якутск, ул. Автоторожная, 20

TECTONIC ZONING OF THE SEDIMENTARY COVER OF THE NORTHEAST SIBERIAN PLATFORM AND THE LAPTEV SEA SHELF

Kapitolina Pavlova, Aleksandr Zharkov

Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, 20, Avtodorozhnay str., Yakutsk, 677007, Russia

Annotation. The results of complex interpretation of geological and geophysical data and generalization of published materials are presented. Tectonic zoning of the sedimentary cover of the northeast Siberian Platform and the Laptev Sea shelf has been performed. The selected regional and sub-regional structures, as well as structures of the first order, are described. The geological and tectonic position of the studied Arctic region has been clarified.

1. Введение

В практике нефтегазовой геологоразведки широко распространенным и устоявшимся подходом к тектоническому районированию является метод, основанный на структурных планах важнейших тектонических единиц, обычно связанных с отражающими сейсмическими горизонтами, приуроченными к региональным стратиграфическим границам. Для территории Сибирской платформы главной поверхностью районирования является отражающий горизонт, отнесенный к кристаллическому фундаменту. В пределах шельфовой части развита складчатая зона (складчатое основание), представляемая на сейсмических профилях как область с неупорядоченной записью, в которой невозможно выделить какие-либо структуры. Поэтому в сейсмопрофилях выделяется так называемый акустический фундамент и залегающий на нем осадочный чехол, перспективный в плане нефтегазоносности.

За последние годы в пределах акватории шельфа моря Лаптевых проведен значительный объем сейсморазведочных исследований. Полученные данные позволяют поставить вопрос о пересмотре ныне существующего тектонического районирования рассматриваемой территории. Однако в условиях отсутствия глубокого бурения однозначного расчленения разреза осадочного чехла Лаптевоморского региона не представляется возможным, что порождает множество взглядов о его возрасте и истории развития.

В данной работе развивается представление о продолжении Сибирской платформы в акваторию моря Лаптевых, которого придерживались А.Ф. Сафронов и В.С. Ситников. На базе комплексной интерпретации геолого-геофизических данных и обобщения опубликованных материалов, выполнено тектоническое районирование осадочного чехла северо-востока Сибирской платформы и шельфа моря Лаптевых.

2. Основной раздел

В тектоническом отношении район исследований включает северо-восточную часть Сибирской платформы и молодую Лаптевоморскую плиту, окружен тремя складчатыми системами: Таймырской, Верхояно-Колымской и Новосибирско-Чукотской.

Разломная сеть на суше представлена Жданихинско-Суолемской, Терпейской, Арынской, Уджинской и другими региональными срывами, ограничивающими или разделяющими структурные элементы.

Хатангско-Ломоносовская сдвиговая разломная зона играет важную роль в тектонике Арктики. В результате правостороннего сдвига вдоль разломной зоны произошел отрыв хребта

Ломоносова от Баренцево-Карской континентальной окраины, т.е. сместился относительно Евразийской окраины в районе Лаптевоморского шельфа в процессе спрединга (раскрытия Евразийского бассейна) [1, 2].

Согласно принятой авторами модели геологического строения, осадочный чехол юго-западной части Лаптевоморского шельфа представлен породами рифейско-кайнозойского возраста, перекрывающими докембрийский кристаллический фундамент Сибирской платформы, а чехол Лаптевоморской молодой плиты – толщами апт-кайнозойского возраста на складчатом основании, сложенном дислоцированными в различной степени палеозойско-мезозойскими образованиями.

На северо-востоке Сибирской платформы по геофизическим данным выделен раннепротерозойский (карельский) фундамент Оленёкского геоблока, представленный зеленосланцево-метаморфизованными вулканогенно-терригенными углеродистыми отложениями. Основание блока находится на глубине от 3 до 4 км, в центральной части Лено-Анабарского прогиба – на глубине 5-5,5 км. Средняя плотность образований блока составляет $2,7 \text{ г/см}^3$. Поверхность кристаллического фундамента маркируется граничной скоростью 5,9-6,4 км/с и более.

Возраст консолидированного фундамента для блоков моря Лаптевых не ясен и остро дискуссионный. Центральная часть шельфа (Западно-Лаптевский блок) является областью глубокой рифтогенной переработки позднекеммерийского основания (акустический фундамент) в мел-кайнозойское время; восточная часть (Восточно-Лаптевский блок) – областью деструкции земной коры в палеозое-мезозое с позднекеммерийской складчатостью и наложенным мел-кайнозойским чехлом [3]. Последний блок характеризуется более высокой дислоцированностью фундамента по сравнению с соседним.

Тектоническое районирование выполнялось на основе анализа рельефа поверхности кристаллического и складчатого фундаментов, закартированных по сейсморазведочным данным с учетом результатов аэрогравимагниторазведки. Анализ потенциальных полей позволил уточнить границы основных тектонических элементов и положение дизъюнктивных нарушений, играющих существенную роль в формировании блоков основания и структуры осадочного чехла.

На схеме тектонического районирования отражены региональные (Сибирская платформа, Лаптевоморская и Восточно-Сибирско-Чукотская плита, Таймырская и Верхояно-Колымская складчатые системы) и субрегиональные (Енисей-Хатангская и Лаптевско-Вилюйская депрессии [4]) структуры, а также структуры I порядка (рисунок 1). Лаптевско-Вилюйская депрессия в пределах исследуемой территории представлена Анабаро-Хатангской седловиной, Оленекской синеклизой и северной частью Предверхоханского краевого прогиба.

Анабаро-Хатангская седловина является промежуточной структурой, разделяющей региональные отрицательные элементы - Енисей-Хатангский прогиб и Лено-Анабарскую впадину. В пределах исследуемой территории кристаллический фундамент не вскрыт скважинами. Отражающий горизонт Ф (поверхность архей-нижнепротерозойского основания) имеет условный характер и прослеживается прерывисто, фрагментарно или не прослеживается. Седловина отличается от прилегающих геоструктур региона стратиграфически полным разрезом осадочного чехла. При этом основную ее часть составляют палеозойские отложения при существенном сокращенном и размытом по периферии юрско-меловом комплексе. В разрезе установлены соленосные отложения. В акваториальной части на сеймопрофиле 4012506 тоже прослеживается соляная структура.

Хатангско-Лаптевский регион, по существу, образует открытую на шельф моря Лаптевых Оленекскую гемисинеклизу, подобную Вилюйской [4, 5, 6]. Прончищевско-Оленекская зона позднемезозойских внутриплатформенных складок, связанная с проявлением субширотных разломов со сдвиговой составляющей, делит Оленекскую синеклизу на две части: южную (на суше) и северную (на шельфе). Континентальная часть структуры представлена Лено-Анабарской впадиной [7], а в акваториальной – Южно-Лаптевской впадиной (рисунок 1).

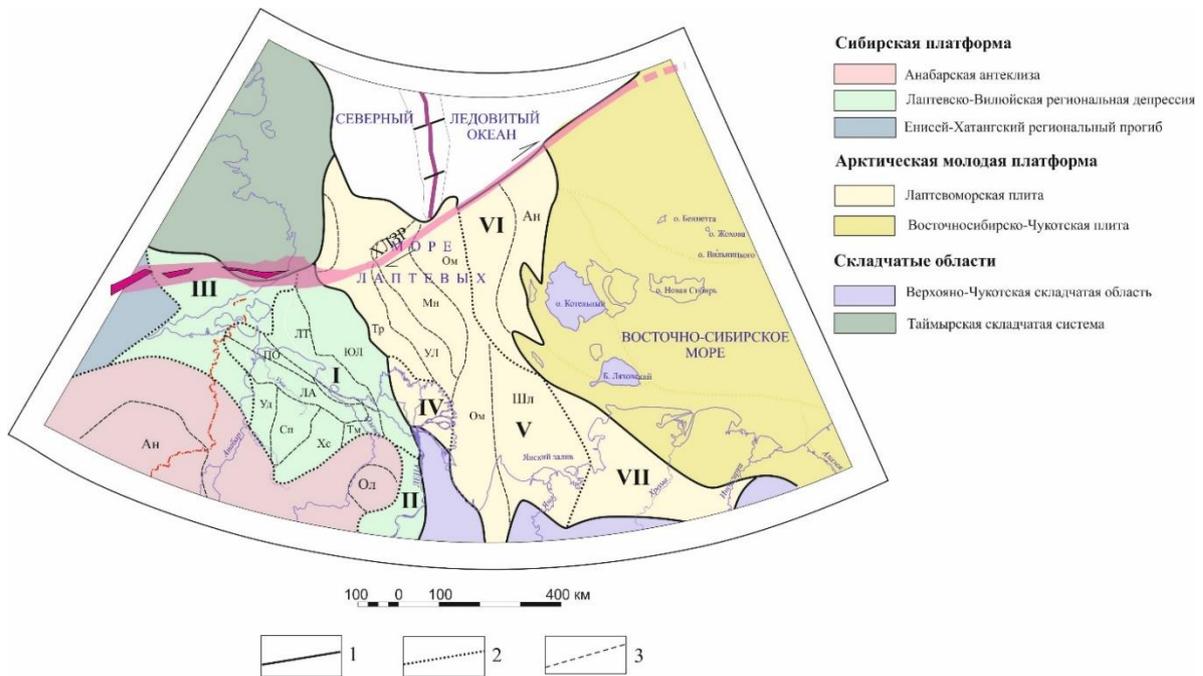


Рисунок 1 – Схема тектонического районирования осадочного чехла северо-востока Сибирской платформы и шельфа моря Лаптевых

Цветом выделены региональные структуры.

Границы тектонических элементов: 1 – региональных; 2 – субрегиональных; 3 – I порядка.

Структуры: Ан – Анабарское поднятие, Ол – Оленекское поднятие, I – Оленекская синеклиза (Лена-Анабарская впадина: Сп – Сапыйское поднятие, Уд – Уджинский прогиб, Хс – Хастахский прогиб, ЛА – Лено-Анабарский прогиб, Тм – Тюмятинский выступ; Прончищевско-Оленекская зона; Южно-Лаптевская впадина: ЛТ - Лено-Таймырская зона пограничных поднятий, Южно-Лаптевский прогиб), II – Предверхоанский прогиб, III – Анабаро-Хатангская седловина; Лаптевоморская плита: IV - Туматский выступ, V – Западная часть (Тр – Трофимовское поднятие, У-Л - Усть-Ленский рифт, Вл – Вал Минина, Ом – Омолойская зона прогибов/грабен, Шл - Шелонское поднятие, ЛН – Лаптевско-Нижнеянский бассейн); VI - Восточная часть (Ан – Анисинский прогиб).

Лено-Анабарская впадина интерпретируется как крупная внутриплатформенная депрессионная зона. Мезозойский чехол продолжает систему окраинных мезозойских бассейнов и характеризуется существенно меньшей толщиной юрско-меловых формаций и обилием в них угленосных толщ [7]. Палеозойский разрез также существенно изменчив: почти полностью отсутствуют ордовик-каменноугольные отложения, на юге преобладает карбонатно-терригенный рифей-кембрийский разрез, а на севере - терригенный пермотриасовый.

К югу от Жданихинско-Суолемского разлома выделяется Сапыйское поднятие, разделенное Уджинской и Хастахской впадинами, а севернее – одноименный прогиб. Эти структуры фундамента проявлены в геофизических полях наиболее отчетливо. В ядре Сапыйского поднятия раннепротерозойский кристаллический фундамент приподнят до отметок 4 км, в Хастахской впадине - более 5 км. Впадина отражена в магнитном и гравитационном полях отрицательными значениями. В мезозойском чехле эти структуры не выражены.

Северная часть Оленекской синеклизы охватывает акватории Хатангского и Оленекского заливов, а также юго-западную прибрежную полосу шельфа моря Лаптевых. На сейсмопрофилях область представляется типично платформенным чехлом Сибирской платформы с древним докембрийским фундаментом. Впадина представлена Лено-Таймырской зоной пограничных поднятий и Южно-Лаптевским прогибом.

Арктическая молодая платформа приурочена к северной окраине Евразии и включает акватории моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря, расположенные здесь острова, а также приморские низменности. Небольшие выступы складчатого основания в шельфовой части, наблюдаемые на о-ве Котельный и Ляховских островах, разделяют акваторию восточно-арктических морей на две плиты: Лаптевскую и Восточносибирско-Чукотскую.

Лаптевоморская плита (рифтовая система) по характеру складчатого основания делится на западную и восточную части, отличающиеся полнотой разреза чехла и особенностями его строения.

Западная часть простирается с юго-востока на северо-запад. Представлена единой областью со спокойным магнитным и гравитационным полями, что указывает на одинаковую природу фундамента [8]. Структура основания напрямую отражается в гравитационном поле: впадинам соответствуют минимумы, а поднятиям - максимумы. Апт-кайнозойский осадочный чехол залегает на складчатое основание позднемезозойского возраста, разрушенное рифтовым растяжением. В пределах западной части выделяются Трофимовское поднятие, Усть-Ленский рифт, вал Минина, Омолойская зона прогибов (грабен), Шелонское поднятие и Лаптево-Нижнеянский бассейн, которые в рельефе складчатого фундамента картируются вытянутыми в северо-западном и северном направлении зонами.

Восточная часть характеризуется относительно маломощным слабодислоцированным позднемел-кайнозойским осадочным чехлом с амплитудой структур до 1 км. В пределах структуры выделен Анисинский прогиб.

3. Выводы

В результате обобщения и комплексного анализа геолого-геофизических данных построена тектоническая схема районирования осадочного чехла северо-восточной части Сибирской платформы и шельфа моря Лаптевых по поверхности гетерогенного фундамента.

Уточнена геологическое строение Прончищевского вала, связанное не только с разломно-сдвиговой природой, но и с соляной тектоникой.

Выделены региональные и субрегиональные тектонические структуры, а также структуры I порядка; впервые оконтурены границы Оленекской синеклизы, в пределах которой уточнены контуры осложняющих ее структур.

4. Благодарности

Исследования выполнены в рамках Госзадания Министерства науки и высшего образования РФ № 122011100158-1 с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯИЦ СО РАН в рамках гранта №13.ЦКП.21.0016.

5. Литература

- [1] Piepjohn K., Lorenz H., Franke F. et al. Mesozoic Structural Evolution of the New Siberian Islands. Circum-Arctic Lithosphere Evolution // Pease V., Coakley B. (eds) // Geol. Soc. London. Special Publ. – 2018. – V. 460. – P. 239-262.
- [2] Lobkovsky L.I., Kononov M.V., Shipilov E.V. Geodynamic causes of the occurrence and termination of Cenozoic shear deformations in the Khatanga-Lomonosov fault zone (Arctic) // DAN. Earth sciences. – 2020. – Vol. 492. – No. 1. – P. 82-87.
- [3] State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1: 1 000 000 (third generation). Scale 1:1000000 (third generation). Laptevo-Sibiromorskaya series. Sheet S-51 – Oleneksky Hall., S-52 – Lena River delta. Explanatory note.
- [4] Staroseltsev V.S. Tectonic and oil and gas geological zoning of the southern coast and adjacent shelf of the Laptev Sea // Geology and mineral resources of Siberia. – 2012. – No.3(11). – P. 32-37.
- [5] Safronov A. F., Sivtsev A. I., Chalaya O. N. et al. Initial geological resources of the Laptev Sea shelf // Geology and Geophysics. – 2013. – Vol. 54. – No. 8. – P. 1275-1279.
- [6] Kontorovich V.A., Kalinina L.M., Kalinin A.Yu. Structural and tectonic characteristics and prospects of oil and gas potential of the Anabar-Khatanga saddle // Oil and gas geology. Theory and practice. – 2019. – Vol. 14. – No. 3. – P. 1-18.
- [7] Afanasenkov A.P., Obukhov A.N., Chikishev A.A., Shaidakov V.A., Bordyug A.V., Kalamkarov S.L. Tectonics of the northern framing of the Siberian platform based on the results of a comprehensive analysis of geological and geophysical data // Geology of oil and gas. – 2018. – 1. – P. 7-27.
- [8] Daragan L.A., Petrov O.V., Daragan-Sushchov Yu.I., Rukavishnikova D.D. A new look at the geological structure of the sedimentary cover of the Laptev Sea // Regional geology and Metallogeny. – 2010. – 41.

ОБОСНОВАНИЕ КЛАССИФИКАЦИИ ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ ОСЕЙ СИНФАЗНОСТИ СИГНАЛОВ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ МОДЕЛИ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Евгения Петрова

ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова»,
677000, Россия, г. Якутск, ул. Белинского, 58

SUBSTANTIATION OF CLASSIFICATION OF HYPERBOLIC AXES OF IN-PHASE GEORADOLLOCATION SIGNALS FOR TRAINING A CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK MODEL

Evgenia Petrova

North-Eastern Federal University, 58, Belinsky str., Yakutsk, 677000, Russia

Annotation. As a result of training a convolutional neural network to detect hyperbolic axes of common-mode signals, a small percentage of accuracy was obtained. To improve the detection accuracy, it was decided to divide the images of the training dataset for training into several classes. The division into classes was carried out depending on the visual definition of images of hyperbolic curves. This made it possible to increase the overall effectiveness of neural network training.

1. Введение

Во время создания программного приложения для исследований электрофизических свойств многолетнемерзлых горных пород [1] возникла необходимость локализации гиперболических осей синфазности сигналов, дифрагированных от локальных объектов и неоднородностей. Для автоматического детектирования гиперболических осей дифракции было решено использовать алгоритмы глубоких сверточных нейронных сетей, которые давно и с успехом используются во многих исследованиях методами георадиолокации. В результате тестирования обученной модели выяснилось, что разметки изображений гиперболических кривых для обучения сети в один класс недостаточно. Последнее объясняется тем, что рисунок дифрагированных гиперболических осей на изображениях георадиолокационных радарограмм имеет различный характер (размытость, отсутствие симметрии и/или части ветвей).

Для повышения эффективности обучения нейронной сети изображения набора данных были разделены на 4 класса. Разметка изображений по классам осуществлялась на основе визуального восприятия.

2. Постановка задачи

Схема программного приложения для исследований электрофизических свойств многолетнемерзлых горных пород после внедрения модуля детектирования гиперболических осей синфазности представлена на рисунке 1.

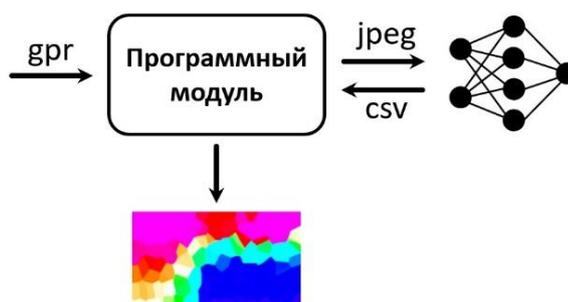


Рисунок 1 – Схема работы приложения.

Основные этапы работы программного приложения можно описать в виде следующих шагов:

1. детектирование изображений гиперболических дифракций на радарограмме с помощью обученной модели нейронной сети;
2. чтение файла csv, содержащего координаты локализованных областей;
3. предварительное определение формы обнаруженных кривых методами линейной интерполяции;
4. уточнение формы гиперболических кривых на основе аппроксимации с теоретическими гиперболами, созданными по допустимому диапазону скоростей;
5. определение диэлектрической проницаемости среды выше объектов дифракции;
6. формирование графического спектрального отображения электрофизических свойств подповерхностной среды.

Для эффективного обучения нейронной сети важное значение имеет подготовка качественного dataset – обучающего и проверочного набора изображений. С помощью дополнительно созданного приложения, были подготовлены 295 изображений радиолокационных радарограмм размером 640x640 пикселей, на которых прямоугольными областями были размечены гиперболические кривые G_n . Координаты G_n сохранялись в одноименных xml-файлах, созданных по требуемому формату для нейронных сетей детектирования изображений [2]. Все данные для обучения были размечены в один класс. Обученная модель была протестирована на валидационном наборе данных, не участвовавших в обучении. График кривой обучения продемонстрирован на рисунке 2. Процент детектирования показал сравнительно небольшую точность – 50% по стандартной метрике mAP (IoU=0.5) [3].

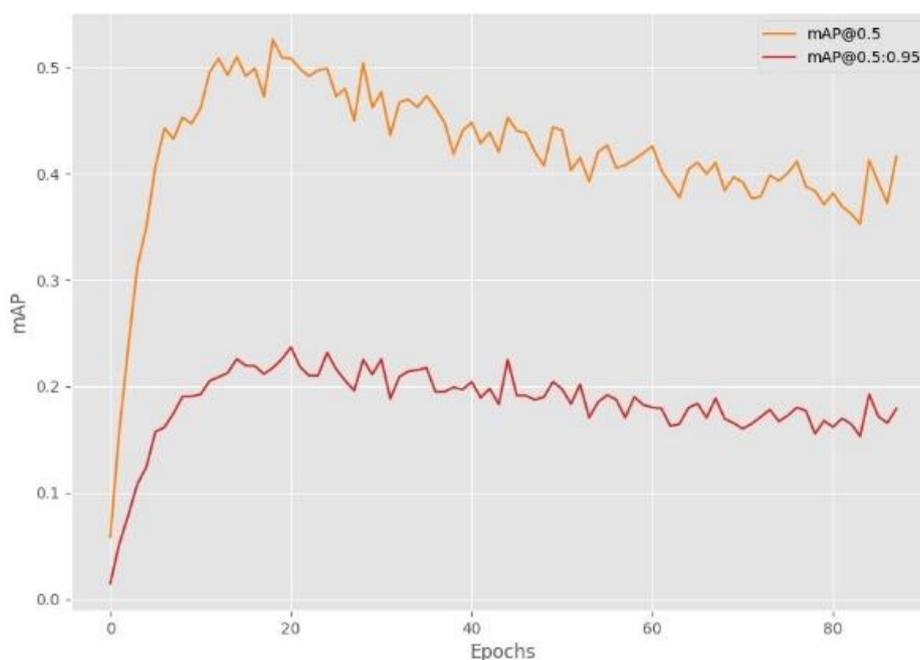


Рисунок 2 – Результаты обучения сети.

После проверки обученной модели был проведен анализ, который выявил, что были обнаружены именно те гиперболические кривые, которые преобладали в тренировочной выборке – умеренно визуализируемые, с полностью сохраненными ветвями (Рисунок 3).

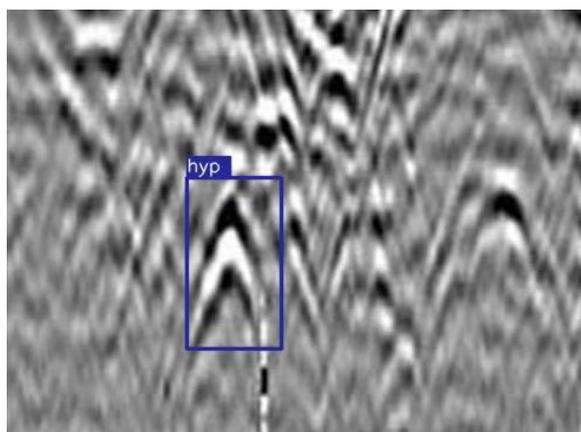


Рисунок 3 – Пример результата тестирования обученной модели.

В числе нелокализованных оказались образы гипербол, у которых были:

1. частично сохранные (недостаточно длинные) ветви;
2. хорошо визуализируемые, резко очерченные контуры;
3. плохо определяемые, размытые и бледные контуры.

Таким образом подготовка нового dataset велась с учетом предыдущих результатов и данные были размечены по визуальным признакам на 4 класса:

1. *hyp1* – хорошо визуализируемые кривые с сохранными ветвями;
2. *hyp2* – умеренно визуализируемые кривые (размытые, малоконтрастные) с сохранными ветвями;
3. *hyp3* – хорошо визуализируемые кривые с частично отсутствующими ветвями;
4. *hyp4* – умеренно визуализируемые кривые (размытые, малоконтрастные) с частично отсутствующими ветвями.

Гиперболические кривые, плохо визуализируемые (сильно размытые), а также у которых ветви визуально определялись менее чем на 75% и отсутствовали вершины – не отмечались в разметке.

В результате dataset содержал 4 класса изображений гиперболических кривых. Количественный подсчет подтвердил различие в соотношении изображений по классам. Было принято решение дополнить каждый класс изображениями, количество которых будет, во-первых, равным в процентном соотношении, во-вторых – оптимальным для обучения (Таблица 1).

Таблица 1 – Количество размеченных изображений по классам dataset

| Размеченные классы | Количество изображений | |
|--------------------|-----------------------------|------------------|
| | до дополнения набора данных | после дополнения |
| hyp1 | 140 | ~1000 |
| hyp2 | 191 | ~1000 |
| hyp3 | 362 | ~1000 |
| hyp4 | 1170 | 1170 |

Кривая графика обучения сети на валидационном наборе данных показала возрастание процента обнаружения по метрике mAP, который составил 60%. Тестирование модели показало хороший результат детектирования: теперь среди обнаруженных оказались практически все визуально определяемые образы гиперболических кривых (Рисунок 4 б).

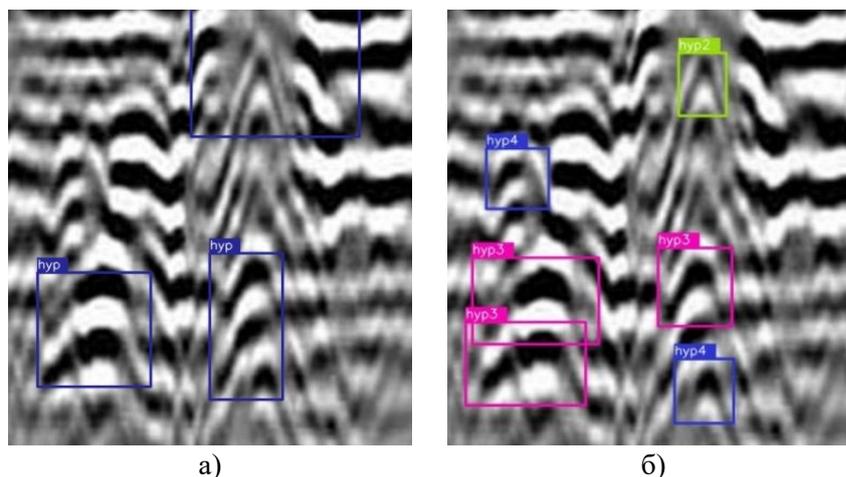


Рисунок 4 – Пример результата тестирования обученной модели: а) до разделения на отдельные классы; б) после разделения на классы.

3. Выводы

Полученные результаты исследования свидетельствуют о том, что разделение набора данных на 4 класса по визуальным признакам изображений гиперболических осей синфазности сигналов дало возможность создать более качественный материал для обучения нейронной сети.

Возрастание процента обнаружения дифрагированных кривых осей синфазности на изображениях радарограмм в конечном итоге позволит получить более точную картину электрофизических свойств подповерхностной среды. Также для повышения процента детектирования ведется работа по совершенствованию архитектуры сверточной нейронной сети и подбору/настройке ее параметров и гиперпараметров.

4. Благодарности

В работе были использованы данные георадиолокационных исследований многолетнемерзлых горных пород. Автор благодарит сотрудников лаборатории георадиолокации ИГДС СО РАН Прудецкого Н.Д. и Соколова К.О. за предоставленные материалы и рецензию доклада.

5. Литература

- [1] Petrova E.A., Sokolov K.O., Prudetsky N.D., Vedekhin K.E. Using convolutional neural networks to search for hyperbolic axes of in-phase georadolocation signals // Modern high technologies. – 2023. – No. 1. – P. 32-36.
- [2] Everingham M., Winn J. The PASCAL visual object classes challenge 2012 (VOC2012) development kit // Pattern Anal. Stat. Model. Comput. Learn., Tech. Rep. – 2012. – Т. 2007. URL: http://host.robots.ox.ac.uk/pascal/VOC/voc2012/devkit_doc.pdf.
- [3] Padilla R., Netto S. L., Da Silva E. A. B. A survey on performance metrics for object-detection algorithms // 2020 international conference on systems, signals and image processing (IWSSIP). – IEEE, 2020. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9145130>.

**НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ТЕРМОХРОНОЛОГИЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ
ПОЛОУСНОГО СИНКЛИНОРИЯ И НАГОНДЖИНСКОГО ТЕРРЕЙНА
(ВЕРХОЯНО-КОЛЫМСКАЯ СКЛАДЧАТАЯ ОБЛАСТЬ)**

Андрей Прокопьев¹, Дмитрий Васильев¹, Виктория Ершова^{2,3}, Даниэль Стокли⁴

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

2 ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», Институт Наук о Земле,
199034, Россия, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9

3 ФГБУН «Геологический институт РАН», 119017, Россия, г. Москва, Пыжёвский пер., 7

4 Департамент наук о Земле, Университет Техаса в Остине

**LOW-TEMPERATURE THERMOCHRONOLOGY OF THE CENTRAL PART OF
THE POLOUSNYI SYNCLINORIUM AND THE NAGONDZHA TERRANE
(VERKHoyANSK-KOLYMA OROGEN)**

Andrey Prokopyev¹, Dmitry Vasiliev¹, Victoria Ershova^{2,3}, Daniel Stockley⁴

1 Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677000, Russia

2 St. Petersburg University, Institute of Earth Sciences,

7/9, University Embankment, St. Petersburg, 199034, Russia

3 Geological Institute of RAS, 7, Pyzhevsky lane, Moscow, 119017, Russia

4 Department of Geosciences, University of Texas at Austin

Annotation. (U–Th)/He thermochronological ZHe ages of detrital zircons were obtained for Middle and Late Jurassic sandstones of the Polousnyi synclinorium and Early and Middle Jurassic rocks of the Nagondzha terrane (Verkhoyansk-Kolyma orogen). All ZHe ages are younger than the time of sedimentation, which indicates a post-sedimentary age reset. The ages obtained for all studied samples are close within the error and vary from 123 to 132 Ma. Six ZHe ages from one sandstone sample of the Polousnyi synclinorium show a clear age of 123.1 ± 4.4 Ma. The sample from the Nagondzha terrane has an average age of 132.5 ± 7.5 Ma. The time of exhumation of the rocks of the Nagondzha terrane from depths of about 5–6 km began at the Valanginian–Hauterivian boundary. Probably synchronously with this process, the intrusion of trachytes and trachydolerites occurred in the Rassokha block of the Omulevsky terrane and in the Arga-Tas terrane (136–137 Ma), as well as the “cooling” of the plutons of the Northern and Main batholith belts (⁴⁰Ar–³⁹Ar dating of mica, amphiboles, whole rocks). This event may be associated either with the final stages of the formation of the Verkhoyansk-Chersky orogen, or with extension during the beginning of the collapse of this orogen. The thrusting of the Nagondzha terrane formations into the Jurassic deposits of the Polousnyi synclinorium [7] occurred earlier, since these thrust structures are intruded by granitoids, the U–Pb crystallization age of which is Late Jurassic–Early Cretaceous. The beginning of the tectonic uplift of the Polousnyi synclinorium located to the north occurred somewhat later – at the end of the Barremian–beginning of the Aptian. It can be assumed that the formation of the Deputatskiy pluton (112 Ma) and the subsequent Sn mineralization of the deposit of the same name (~106 Ma) occurred at the final stages of this rise in the Albian.

1. Введение

Полоусный синклинорий протягивается в субширотном направлении на 500 км при ширине 50–100 км на севере Верхояно-Колымской складчатой области и сложен юрскими обломочными отложениями мощностью до 5000 м. На юге он отделяется надвигами от Нагонджинского и Омuleвского террейнов. На западе по надвигам он граничит с Кулар-Нерским террейном, а на

севере перекрыт позднекайнозойскими отложениями Приморской низменности. Нагонджинский террейн протягивается на 450 км узкой (до 100 км) полосой к северу и западу от Омудевского террейна и сложен неоднократно деформированными позднепалеозойскими и раннемезозойскими образованиями, которые слагают пакеты тектонических пластин и линз различной мощности [1, 2]. Были исследованы юрские отложения Полоусного синклинория и Нагонджинского террейна: определен их петрографический состав и проведены (U-Th)/He низкотемпературные термохронологические исследования.

2. Методики исследования

Термохронологические (U-Th)/He анализы обломочных цирконов были выполнены в четырех образцах юрских песчаников: три в пределах Полоусного синклинория (район месторождения Депутатское) и один в Нагонджинском террейне на границе с Полоусным синклинорием. Породы представляют собой плохо сортированные средне и крупнозернистые аркозовые арениты. Зерна кварца (25–40%) и полевого шпата (45–65%) слабо окатанные; обломки пород редки и представлены в основном сланцами.

Пробы измельчались, а тяжелая фракция выделялась по стандартной методике в ИГГД РАН. (U-Th)/He датирование детритовых цирконов (ZHe) было проведено в геохронологическом центре UTChron Департамента наук о Земле Техасского университета в Остине, США. Были выбраны зерна циркона диаметром не менее 70 мкм и они практически не содержали видимых включений. Из-за обломочного характера образцов и потенциальной дисперсии возрастов охлаждения (U-Th)/He для некоторых образцов было проанализировано до 6 отдельных зерен, в результате чего в общей сложности было проведено 23 анализа. Анализы проводились в соответствии с аналитическими процедурами, описанными в [3]. Все возрасты были скорректированы с учетом эффектов α -выброса [4] и с аналитической ошибкой $\sim 8\%$ (2σ).

3. Результаты и их интерпретация

1) (U-Th)/He термохронологические ZHe возрасты детритовых цирконов были получены для средне и позднеюрских песчаников Полоусного синклинория и ранне- и среднеюрских пород Нагонджинского террейна. Все ZHe возрасты моложе времени осадконакопления, что свидетельствует о постседиментационной переустановке возрастов. Полученные возрасты для всех изученных образцов близки в пределах ошибки и варьируют от 123 до 132 млн лет. Шесть ZHe возрастов из одного образца песчаника Полоусного синклинория демонстрируют четкий возраст $123,1 \pm 4,4$ млн лет. В образце из Нагонджинского террейна установлен средний возраст $132,5 \pm 7,5$ млн лет.

2) Время эксгумации пород Нагонджинского террейна с глубин порядка 5–6 км началось на рубеже валанжина–готерива. Вероятно, синхронно с этим процессом произошло внедрение трахитов и трахидолеритов в Рассохинском блоке Омудевского террейна и в Арга-Тасском террейне (136–137 млн лет [5]), а также «остывание» плутонов Северного и Главного батолитовых поясов (^{40}Ar – ^{39}Ar датирование слюд, амфиболов, пород [6]). Это событие может быть связано либо заключительными стадиями становления Верхояно-Колымского орогена, либо с растяжением в процессе начала коллапса этого складчатого сооружения. Шарьирование образований Нагонджинского террейна на юрские отложения Полоусного синклинория [7] произошло раньше, поскольку эти надвиговые структуры прорываются гранитоидами, U-Pb возраст кристаллизации которых поздняя юра–ранний мел [8].

3) Начало тектонического подъема расположенного севернее Полоусного синклинория произошло несколько позднее – в конце баррема–начале апта. Можно предположить, что формирование Депутатского плутона (112 млн лет) и последующего Sn оруденения одноименного месторождения (~ 106 млн лет) [9] произошло на заключительных стадиях этого подъема в альбское время.

4. Благодарности

Работы выполнены частично по плану НИР ИГАБМ СО РАН (проект FUEM-2019-0001), изотопно-геохимические исследования и интерпретация результатов проведены при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-17-00169).

5. Литература

- [1] Prokopiev, A.V. The Verkhoyansk-Chersky collisional orogen // *Geol. of Pacific Ocean*. – 2000. – V. 15. – P. 891-904.
- [2] Parfenov, L.M., Kuzmin, M.I., eds., *Tectonics, geodynamics and metallogeny of the Sakha Republic (Yakutia)*. – Moscow: International Academic Publishing Company “Nauka/Interperiodica”, 2001. – 571 p. (in Russian).
- [3] 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. – V. 295(1–2). P. 69-82.
- [4] Farley, K.A., Wolf, R., Silver, L. The effects of long alpha-stopping distances on (U-Th)/He ages // *Geochimica Cosmochimica Acta*. – 1996. – V. 60(21). – P. 4223-4229.
- [5] Sychev, S.N., Lebedeva, O.Yu., Khudoley, A.K., Sokolov, S.D., Rogov, A.V., Maklashin, V.S., Lvov, P.A. Valanginian subalkaline magmatism of the Rassokha and Arga-Tas terranes (northeast Russia) // *Doklady Earth Sciences*. – 2021. – V. 501. – No. 1. – P. 34-42. (in Russian).
- [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 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology and trace element geochemistry // *Geology*. – 2001. – V. 29. – No. 2. – P. 167-170.
- [7] Prokopiev, A.V., Oxman, V.S. Multi-phase tectonic structures in the collision zone of the Kolyma-Omolon microcontinent and the eastern margin of the North Asian craton, Northeastern Russia // *Stephan Mueller Spec. Publ. Ser. Vol. 4. “Geology, geophysics and tectonics of Northeastern Russia: a tribute to Leonid Parfenov”*/ Editor(s): D.B. Stone, K. Fujita, P.W. Layer, E.L. Miller, A.V. Prokopiev, and J. Toro. – Copernicus Publications (Copernicus GmbH), 2009. – P. 65-70.
- [8] 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-Science Reviews*. – 2020. – V. 208. – DOI:10.1016/j.earscirev.2020.103272.
- [9] Prokopiev, A.V., Borisenko, A.S., Gamyagin, G.N., Pavlova, G.G., Fridovsky, V.Yu., Kondrat’va, L.A., Anisimova, G.S., Trunilina, V.A., Ivanov, A.I., Travin, A.V., Koroleva, O.V., Vasiliev, D.A., Ponomarchuk, A.V. Age constraints and tectonic settings of metallogenic and magmatic events in the Verkhoyansk–Kolyma folded area // *Russian Geology and Geophysics*. – 2018. – V. 59. – P. 1237-1253.

ИСТОЧНИКИ ДЕВОНСКИХ ТЕРРИГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НОРА-СУХОТИНСКОГО ТЕРРЕЙНА: РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОХИМИЧЕСКИХ И ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ (Sm-Nd) ИССЛЕДОВАНИЙ

Юрий Смирнов¹, Сергей Дриль², Юлия Смирнова¹, Виктор Заика¹

1 ФГБУН «Институт геологии и природопользования ДВО РАН»,
675000, Россия, г. Благовещенск, пер. Релочный, 1

2 ФГБУН «Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН»,
664033, Россия, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1а

SOURCES OF DEVONIAN TERRIGENOUS ROCKS IN THE NORA-SUKHOTINO TERRANE: RESULTS OF GEOCHEMICAL AND ISOTOPIC-GEOCHEMICAL (Sm-Nd) STUDIES

Yuri Smirnov¹, Sergei Dril², Yuliya Smirnova¹, Victor Zaika¹

1 Institute of Geology and Natural Management FEB RAS,
Relochny Lane, 1, Blagoveshchensk, 675000, Russia

2 Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, 1a, Favorskogo str., Irkutsk, 664033, Russia

Annotation. This publication presents the results of geochemical and isotope-geochemical (Sm–Nd) studies of the Devonian terrigenous rocks Guran and Siltstone-Sandstone Formations of the Nora-Sukhotino terrane of the South Mongolia-Khingan orogenic belt in order to determine the main sources of clastic material for them. Analysis of chemical composition of rocks made it possible to establish that sources of clastic material were both felsic and intermediate rocks. It has been found that the Devonian terrigenous rocks Guran and Siltstone-Sandstone Formations of the Nora-Sukhotino terrane characterized by negative $\epsilon_{Nd(0)} = -8.5...-4.9$ and $\epsilon_{Nd(T)} = -4.4...-0.7$ values and Mesoproterozoic values of Nd model age of $T_{Nd(DM)} = 1.5-1.1$ Ga. These data together with geodynamic models of the formation of the South Mongolia-Khingan orogenic belt give grounds to suggest that the main sources for Devonian terrigenous rocks were igneous and volcanic rocks from the Mamyn massif with a contribution of island arc rocks from the South Mongolia–Khingan orogenic belt.

1. Введение

Северо-восточный фланг Южно-Монгольско-Хинганского орогенного пояса, расположенный на территории России, рассматривается в качестве Нора-Сухотинского террейна [1]. Согласно тектонической схеме [1] террейн показан в виде широкой полосы между Мамынским и Буреинскими массивами. В строении Нора-Сухотинского террейна принимают участие условно верхнепротерозойские вулканогенно-осадочные породы, а также силурийские, девонские, нижнекаменноугольные и нижнепермские терригенные и терригенно-карбонатные отложения [2]. Достаточно условно Нора-Сухотинский террейн можно разделить с северо-востока на юго-запад на Сюгдулкинский, Зея-Селемджинский и Приамурский фрагменты.

По существующим представлениям [2] девонские осадочные породы в Приамурском фрагменте Нора-Сухотинского террейна рассматриваются в составе большекаменушинской, буссеевской и гуранской свит, а также алевролито-песчаниковой толщи, а в Зея-Селемджинском фрагменте – в составе алевролито-песчаниковой толщи. В настоящей публикации приведены результаты геохимических и изотопно-геохимических (Sm-Nd) исследований песчаников гуранской свиты Приамурского фрагмента и алевролитов алевролито-песчаниковой толщи Зея-Селемджинского фрагмента. Главной целью исследований являлось выявление основных источников сноса кластического материала для девонских терригенных отложений Нора-Сухотинского террейна.

2. Краткая характеристика объектов исследований

Отложения алевролитово-песчанниковой толщи Зeya-Селемджинского фрагмента встречаются в бассейнах рек Зeya. Толща сложена полевошпат-кварцевыми и кварцевыми песчаниками, алевролитами, конгломератами, зеленокаменноизмененными базальтами, а также туфами основного и среднего состава и туффитами [2]. Мощность толщи до 1300 м. Взаимоотношения с ниже- и вышележащими отложениями не выявлены. Возраст толщи принят ранне-среднедевонским на основании корреляции осадочных пород алевролитово-песчанниковой толщи с подобными по составу фаунистически охарактеризованными отложениями бассейна р. Амур Нора-Сухотинского террейна [2]. Образцы алевролитов алевролитово-песчанниковой толщи нами были отобраны на правом берегу р. Зeya вблизи п. Сохатино.

На территории Приамурского фрагмента Нора-Сухотинского террейна были исследованы осадочные породы гуранской свиты. Отложения гуранской свиты, согласно [2], распространены в бассейнах рек Гуран, Большая Каменушка, Белая, Пакулиха и Буссевская. Свита мощностью 2000 м сложена преимущественно полевошпат-кварцевыми, реже полимиктовыми песчаниками, серицитовыми, глинистыми и углисто-глинистыми сланцами с прослоями гравелитов, конгломератов и вулканитов основного состава. Возраст свиты принят на основании остатков фауны, выявленных в песчаниках и сланцах в бассейнах рек Гуран и Большая Каменушка, а также растительных остатков, присутствующих в углисто-глинистых сланцах в бассейне р. Гуран, характерных для живетского яруса. Образцы осадочных пород гуранской свиты отобраны нами в бассейне р. Белая левого притока р. Амур рядом с п. Симоново.

3. Минералого-геохимические особенности девонских терригенных отложений Нора-Сухотинского террейна

Алевролиты алевролитово-песчанниковой толщи серого цвета с грубой алевритовой структурой и массивной текстурой. Обломочный материал окатанной либо слабоокатанной формы и представлен преимущественно кварцем (40–60%) и полевыми шпатами (20–40%). В меньшем количестве присутствует слюдястый материал (мусковит и биотит) – до 20%. Цемент базальный слюдясто-глинистого состава. Среди акцессорных минералов установлены циркон, сфен и апатит.

В нашей коллекции образцов из гуранской свиты присутствуют песчаники различной зернистости с массивной текстурой. Песчаники сложены слабоокатанными обломками кварца (35–50%) и полевого шпата (5–10%). В песчаниках в значительном количестве присутствуют обломки слюдястых и слюдясто-кварцевых сланцев (7–25%). Единичны обломки углеродистых сланцев и вулканических пород. Цемент серицит-кварцевого состава контактово-порового или базального типа. Среди акцессорных минералов встречаются циркон, гранат, апатит, магнетит и гидроксиды железа.

В алевролитах алевролитово-песчанниковой толщи отмечаются следующие вариации содержаний основных породообразующих компонентов: $\text{SiO}_2 = 58.89\text{--}68.50$ мас. %, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 13.01\text{--}17.01$ мас. %, $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ.}} = 4.81\text{--}6.89$ мас. %, $\text{CaO} = 2.06\text{--}4.09$ мас. %, $\text{Na}_2\text{O} = 1.24\text{--}4.67$ мас. %, $\text{K}_2\text{O} = 1.15\text{--}4.51$ мас. % и $\text{TiO}_2 = 0.62\text{--}0.86$ мас. %. В песчаниках гуранской свиты концентрации петрогенных компонентов изменяются в более широких диапазонах ($\text{SiO}_2 = 66.28\text{--}85.25$ мас. %, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 10.05\text{--}18.60$ мас. %, $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ.}} = 0.76\text{--}5.26$ мас. %, $\text{CaO} = 0.10\text{--}0.59$ мас. %, $\text{Na}_2\text{O} = 0.21\text{--}1.00$ мас. %, $\text{K}_2\text{O} = 1.35\text{--}2.96$ мас. %, $\text{TiO}_2 = 0.21\text{--}0.76$). В изученных породах гуранской свиты и алевролитово-песчанниковой толщи содержания K_2O выше Na_2O , а значения $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ варьируют от 1.25 до 13.45, за исключением одного образца алевролита алевролитово-песчанниковой толщи, в котором значение $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ составляет 0.25.

На классификационной диаграмме $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \log(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$ [3] фигуративные точки состава песчаников гуранской свиты расположены в полях сланцев, вакк, литаренитов и аркозов, в то время как алевролиты алевролитово-песчанниковой толщи лежат вдоль линии, разделяющей сланцы и вакки.

Для выявления состава пород в области сноса использовались диаграммы, основанные на содержании микроэлементов. На диаграммах Th – La – Sc [4], La/Sc – Th/Co [4] и Hf – La/Th [5] фигуративные точки состава алевролитов алевролитопесчаниковой толщи и песчаники гуранской свиты расположены в поле отложений, сформированных за счет размыва кислых магматических и вулканических пород. На диаграмме Rb – K [5] изученные девонские терригенные отложения Нора-Сухотинского террейна локализируются в поле пород, источниками которых являлись образования кислого и среднего состава.

4. Изотопно-геохимические (Sm-Nd) особенности девонских терригенных отложений Нора-Сухотинского террейна

Для песчаников гуранской свиты установлены отрицательные значения $\epsilon_{Nd(0)} = -4.9$ и $\epsilon_{Nd(T)} = -0.7$ при мезопротерозойских значениях Nd-модельного возраста ($T_{Nd(DM)} = 1.1$ млрд лет). В алевролите алевролитопесчаниковой толщи отмечаются более глубокие отрицательные значения $\epsilon_{Nd(0)} = -8.5$ и $\epsilon_{Nd(T)} = -4.4$ при $T_{Nd(DM)} = 1.5$ млрд лет.

5. Обсуждение результатов и выводы

Прежде всего, рассмотрим результаты исследований геохимического состава пород. Анализ концентраций микроэлементов в совокупности с вариациями содержаний основных породообразующих компонентов свидетельствуют о том, что основными поставщиками кластического материала для девонских осадочных пород гуранской свиты и алевролитопесчаниковой толщи Нора-Сухотинского террейна являлись образования кислого и среднего состава.

Согласно Sm-Nd изотопно-геохимическим исследованиям выявлено, что в терригенных отложениях гуранской свиты и алевролитопесчаниковой толщи Нора-Сухотинского террейна значения Nd-модельного возраста составляют 1.5–1.1 млрд лет. Следовательно, в области сноса при их накоплении присутствовали породы мезопротерозойского возраста и/или более молодые изверженные образования, исходные расплавы которых были сформированы за счет переработки континентальной коры мезопротерозойского возраста.

Исходя из существующей геодинамической модели формирования [6] в пределах Южно-Монгольско-Хинганского орогенного пояса в период ~508–335 млн лет существовала зона субдукции, направленная на северо-запад. Эти данные в совокупности со структурным положением изученных нами девонских терригенных пород, позволяют предполагать, что основными поставщиками кластического материала для них являлись образования Мамынского террейна, среди которых можно отметить эдиакарские кварцевые диориты, характеризующиеся отрицательными значениями $\epsilon_{Nd(0)} = -6.8 \dots -6.6$ и $\epsilon_{Nd(T)} = -1.3 \dots -1.2$ при $T_{Nd(DM)} = 1.5 \text{--} 1.4$ млрд лет [7], а также палеозойские массивы гранитоидов и поля кембрийских кислых вулканитов, для которых установлены $\epsilon_{Nd(0)} = -9.9 \dots -5.8$ и $\epsilon_{Nd(T)} = -3.6 \dots -0.2$ при $T_{Nd(DM)} = 1.6 \text{--} 1.1$ млрд лет [8]. В качестве дополнительных источников сноса стоит рассматривать раннепалеозойские островодужные образования Южно-Монгольско-Хинганского орогенного пояса, выявленные на территории Китая [9, 10], характеризующиеся слабо отрицательными и положительными значениями $\epsilon_{Nd(0)} = -3.8 \dots +0.8$ и $\epsilon_{Nd(T)} = +1.9 \dots +5.4$ при $T_{Nd(DM)} = 1.1 \text{--} 0.7$ млрд лет.

6. Благодарности

Исследования выполнены за счет гранта РФФИ № 21-77-10001, <https://rscf.ru/project/21-77-10001/>.

7. 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., Tomurtoogo, O. and Yan, H. Model of the formation of the orogenic belts of Central and Northeastern Asia // *Tikhookean. Geol.* – 2003. – 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] Herron, M.M. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data // *J. Sediment. Petrol.* – 1988. – Vol. 58. – No 5. – P. 820-829.
- [4] Cullers, R.L. Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA // *Chem. Geol.* – 2002. – Vol. 191. – Iss. 4. – P. 305-327.
- [5] Floyd, P.A. and Leveridge, B.E. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones // *J. Geol. Soc. London.* – 1987. – Vol. 144. – Iss. 4. – P. 531-542.
- [6] Feng, Z.Q., Jia, J., Liu, Y.J., Wen, Q.B., Li, W.M., Liu, B.Q, Xing, D.Q. and Zhang, L. Geochronology and geochemistry of the Carboniferous magmatism in the northern Great Xing'an Range, NE China: Constraints on the timing of amalgamation of Xing'an and Songnen blocks // *J. Asian Earth Sci.* – 2015. – Vol. 113. – P. 411-426.
- [7] Sorokin, A.A., Kotov, A.B., Kudryashov, N.M. and Kovach, V.P. First evidence of Ediacaran magmatism in the geological history of the Mamyn Terrane of the Central Asian fold belt // *Russ. J. Pac. Geol.* – 2015. – Vol. 9. – P. 399-410.
- [8] Sorokin, A.A., Kudryashov, N.M., Kotov, A.B. and Kovach, V.P. Age and tectonic setting of the early Paleozoic magmatism of the Mamyn Terrane, Central Asian Orogenic Belt, Russia // *J. Asian Earth Sci.* – 2017. – Vol. 144. – P. 22-39.
- [9] Feng, Z., Liu, Y., Li, Y., Li, W., Wen, Q., Liu, B., Zhou, J. and Zhao, Y. Ages, geochemistry and tectonic implications of the Cambrian igneous rocks in the northern Great Xing'an Range, NE China // *J. Asian Earth Sci.* – 2017. – Vol. 144. – P. 5-21.
- [10] Hu, X.L., Yao, S.Z., Tan, C.Y., Zeng, G.P., Ding, Z.J. and He, M.C. Early Paleozoic geodynamic evolution of the Eastern Central Asian Orogenic Belt: Insights from granitoids in the Xing'an and Songnen blocks // *Geosci. Front.* – 2020. – Vol. 11. – P. 1975-1992.

**U-Pb ВОЗРАСТ, ПЕТРОГЕНЕЗИС И ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА
ОБРАЗОВАНИЯ ГРАНИТОВ РАПАКИВИ И АССОЦИИРУЮЩИХ С НИМИ
ПОРОД ТАРБАГАННАХСКОГО МАССИВА АЛЛАХ-ЮНЬСКОЙ
ТЕКТОНИЧЕСКОЙ ЗОНЫ**

Валерий Фридовский¹, Антонина Верниковская^{2,3,1},
Николай Матушкин^{2,3}, Павел Кадильников^{2,3}, Максим Кудрин¹, Ярослав Тарасов¹
1 ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 39
2 ФГБУН «Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука»,
630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3/4
3 ФГАОУ ВО «Новосибирский государственный университет»,
630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

**U-Pb AGE, PETROGENESIS, AND GEODYNAMIC SETTING OF FORMATION OF
RAPAKIVI GRANITES AND ROCKS ASSOCIATED WITH THEM OF THE
TARBAGANNAKH MASSIF OF THE ALLAKH-YUN TECTONIC ZONE**

Valery Fridovsky¹, Antonina Vernikovskaya^{2,3,1},
Nikolay Matushkin^{2,3}, Pavel Kadilnikov^{2,3}, Maxim Kudrin¹, Yaroslav Tarasov¹
1 Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39, Lenin av., Yakutsk, 677980, Russia
2 Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics SB RAS,
3/4, Akademika Koptug ave., Novosibirsk, 630090, Russia
3 Novosibirsk State University, 2, Pirogova st., Novosibirsk, 630090, Russia

Annotation. New U-Pb data confirms the Aptian age (120 Ma) for the emplacement of the Tarbagannakh granitoids and quartz monzodiorites with rapakivi structure in the Allakh-Yun tectonic zone. The diversity in composition of the igneous rocks of the Tarbagannakh pluton, the geochemical features identified, as well as the Sm-Nd and Rb-Sr isotope characteristics, confirm their mixed magmatic source, which was upper crust with input from an enriched mantle component (EM II). These intrusions formed in an active continental margin setting following the breakup or otherwise failure of the oceanic plate slab in the Aptian age.

1. Введение

Аллах-Юньская тектоническая зона (АЮТЗ) находится на юге Верхоянского складчато-надвигового пояса. На геодинамическое и металлогеническое развитие зоны существенное влияние оказали аккреционные процессы в связи с субдукцией плиты палео-Пацифики под окраину Сибирского (Северо-Азиатского) кратона в позднеюрско-меловое время [1]. В пределах АЮТЗ распространены гранитоидные массивы, наиболее крупные среди которых – Тарбаганнахский (260 км²), Уэмляхский (900 км²) и Карский (140 км²). Гранитоиды и ассоциирующие с ними разнообразные магматические породы образуют пояс шириной до 50-100 км, вытянутый в субмеридиональном направлении на около 500 км [2]. Эти магматические тела сопряжены в пространстве с золотым оруденением Аллаха-Юньской металлогенической зоны (АЮМЗ). Раннемеловые тектонотермальные события, согласно геохронологическим данным для магматических и метасоматических пород этого региона, происходили в аптское время. Они подтверждаются U-Pb возрастом цирконов (SHRIMP-RG) из Тарбаганнахского массива – ~ 123 млн. лет [3], U-Pb оценками возраста цирконов (ID-TIMS) из даек лампрофиров Нежданнинского месторождения – ~ 121 млн. лет [4], ⁴⁰Ar/³⁹Ar данными для измененных пород золоторудных объектов АЮМЗ [5], варьирующими от ~124 млн. лет (по серициту из метасоматитов по габброидам) и ~ 120 млн. лет (по серициту из кварцевых жил) до ~115 млн. лет (по флогопиту из дайки керсанта). А также ⁴⁰Ar/³⁹Ar данными по биотиту из экзоконтакта

Тарбаганнахского массива – ~119 млн. лет [3]. Более молодые оценки, характеризующие события позднего мела, основываясь на U-Pb возрасте цирконов (ID-TIMS) из гранитоидов Курумского [5] – ~ 94 млн. лет, U-Pb возраст цирконов (SHRIMP II) из диоритов Гельдинской группы штоков – ~ 95 млн. лет, и из гранитоидов Супского массива – ~ 94 млн. лет [6]. Они близки с $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ данными для серицита из метасоматитов по вулканитам – ~ 100 млн. лет [5], серицита из грейзенов Курумского гранитоидного плутона – ~ 95 млн. лет [7], биотита из пород гранитоидных штоков северной части этого пояса – ~ 92-99 млн. лет [8], и Rb-Sr оценками по валу и минералам из гранитоидов, даек лампрофиров и метасоматитов района Нежданинского месторождения и Курумского плутона, находящихся в интервале 89.6-92.6 млн лет [4]. Настоящая работа направлена на изучение природы, возраста и геодинамической обстановки формирования гранитоидов и ассоциирующихся с ними магматических пород АЮТЗ, относимых к раннемеловому уэмяхскому магматическому комплексу [6]. Они базируются на новых U-Pb SHRIMP-II, Sm-Nd и Rb-Sr изотопных и геохимических (ICP-MS) данных для магматических пород уэмяхского комплекса, на примере изучения Тарбаганнахского массива.

2. Геология

Тарбаганнахский массив расположен на водоразделе рек Анча и Аллах-Юнь, слагает г. Шпиль-Тарбаганнах. Этот массив размещен в центральной части Аллах-Юньской тектонической зоны в блоке ограниченном региональными Аллах-Юньским и Минорским разломами. С последним пространственно сопряжены золоторудные объекты АЮМЗ. Тарбаганнахский массив сложен разнообразными средними и кислыми интрузивными породами (монцодиориты, переходные разновидности от монцонитов до кварцевых монцодиоритов, гранодиориты и граниты, прорываемые дайками субщелочных лейкократовых гранитов и трахиандезибазальтов). Вмещающие породы массива – каменноугольные и пермские терригенные отложения комплекса пассивной окраины Сибирского кратона. Они смяты в подобные складки, вплоть до изоклинальных, осевые поверхности которых простираются в ССВ направлении субсогласно с крупными сдвигами, взбросо-сдвигами и надвигами [1, 6]. На контакте с массивом вмещающие породы ороговикованы [9]. Гранитоиды Тарбаганнахского массива, как и другие интрузии уэмяхского комплекса не деформированы и не имеют значимых метаморфических преобразований.

Тарбаганнахский массив имеет эллипсоидную форму, вытянут в ССВ направлении субсогласно со структурами АЮТЗ. Между разностями магматических пород устанавливаются интрузивные контакты, структуры магматического течения, многочисленные включения одних пород в другие, апофизы [6, 9]. Породы характеризуются неоднородным строением, для них характерны такситовые текстуры, крупные порфириовидные выделения, структура рапакиви, пятнистость за счет разнообразных включений и обособлений. Структура рапакиви наиболее ярко проявлена в гранитах и гранодиоритах центральной части массива, менее развита в окаймляющих их монцодиоритах. Дайки трахиандезибазальтов ассоциируют с ранними породами среднего состава в периферийной части массива, тогда как дайки субщелочных лейкократовых гранитов прорывают, как средние, так и кислые интрузивные породы со структурами рапакиви, находящиеся в центральной части массива.

3. Методика

Силикатный анализ гранитоидов Тарбаганнахского плутона проведен в ИГАБМ СО РАН (г. Якутск). Описание методики силикатного анализа дано, например, в [10]. Определение содержаний трэйс элементов в породах выполнено с помощью ICP масс-спектрометров – квадрупольного NexION 300D (США) и масс-спектрометра высокого разрешения с двойной фокусировкой Element2 (Thermo Fisher Scientific, Германия) в ИГХ СО РАН (г. Иркутск), по методике, опубликованной в [11]. U-Pb датирование цирконов проведено на вторично-ионном микрозонде высокого разрешения SHRIMP-II, определения содержаний и изотопный состав Sm и Nd выполнены с применением метода изотопного разбавления на мультиколлекторном масс-спектрометре TRITON в Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург), описание методик дано, например, в [10].

4. Петрография и геохимия

Магматические породы Тарбаганнахского массива представлены светло-серыми, серыми и темно-серыми средне-крупнозернистыми биотит-амфиболовыми средними и кислыми интрузивными и гипабиссальными породами.

Монцодиориты, переходные разности от монцонитов до кварцевых монцодиоритов, кварцевые монцодиориты, темно-серые и серые, состоят из плагиоклаза (до 25-35 об.%), калиевого полевого шпата (до 20-30 об.%), роговой обманки (до 20 об.%), кварца (не более 10 об.%) и биотита (не более 5 об. %). Они содержат значительное количество вкрапленников, занимающих до 40 % объема породы. Вкрапленники длиной до 7-8 мм состоят из плагиоклаза и калиевого полевого шпата, в отдельных из которых, имеющих овальную форму, наблюдается структура рапакиви. В плагиоклазе отмечается мирмекитовая структура. В матриксе этих пород устанавливается присутствие темных зерен кварца, роговой обманки и биотита. В породах также встречаются неоднородности, представленные зонами темноцветных минералов и отдельными прожилками калиевого полевого шпата. Акцессорные и рудные минералы – циркон, апатит, ильменит, магнетит, пирит, а также титанит (размер до 2 мм) с конвертообразной формой зерен.

Гранодиориты и граниты, светло-серые, состоят из плагиоклаза (до 30 об.%), калиевого полевого шпата (до 30 об.%), кварца (до 30 об.%) и биотита (до 10 об.%). Роговая обманка в гранодиоритах находится до 10 об.%, а в гранитах присутствуют в виде единичных зерен. Эти породы содержат меньшее количество вкрапленников по сравнению со средними разностями, отдельные из которых достигают 15 мм в длину. Большинство из вкрапленников имеет овальную форму зерен, представленных калиевым полевым шпатом с каймой из плагиоклаза, которые образуют структуру рапакиви. Кварц, наряду с амфиболом и биотитом, находится в матриксе этих гранитоидов. Биотит также присутствует в виде включений во вкрапленниках полевого шпата. Акцессорные и рудные минералы – циркон, апатит, ильменит и магнетит. Вторичные изменения у интрузивных пород выражены слабо, они представлены альбитизацией, сосюритизацией, пелитизацией и хлоритизацией.

Трахиандезибаазальт из дайки состоит из плагиоклаза (до 30 об. %), калиевого полевого шпата (до 25 об.%), роговой обманки(до 35 об. %) и биотита (до 10 об.%). В небольшом количестве в основной массе породы присутствуют сильно резорбированные зерна желтовато-бурого клинопироксена. В виде порфировых вкрапленников (до 5 % объема породы) присутствуют крупные (до 10 мм) таблитчатые зерна плагиоклаза, имеющих зональное строение. Присутствуют единичные зерна кварца, окруженные реакционными каймами из зерен титанита и амфибола. Вторичные изменения – амфиболитизация, хлоритизация, биотитизация, пелитизация, альбитизация и сосюритизация. Акцессорные минералы – титанит, апатит, ортит, рутил, монацит, циркон. Рудные минералы – магнетит, ильменит, пирит, халькопирит и пирротин.

Лейкократовый субщелочной гранит – порода от мелкозернистой до среднезернистой структуры, состоит из кварца (до 30 об.%), калиевого полевого шпата (до 40 об.%), плагиоклаза (до 20 об.%) и биотита (не более 10 об.%). В порфировидных разностях вкрапленники (до 2 мм) представлены кварцем и калиевым полевым шпатом, содержащим пертитовые включения. Биотит образует короткотаблитчатые зерна (до 0.5 мм) и сростания по спайности с редкими реликтовыми сильно резорбированными зернами амфибола (до 0.5 мм). Вторичные изменения – пелитизация, серицитизация, хлоритизация, мусковитизация. Акцессорные и рудные минералы – циркон, турмалин, апатит, эпидот, рутил, ильменит, гематит, пирит.

Средние и кислые интрузивные породы Тарбаганнахского массива по содержанию щелочей характеризуются граничными между субщелочными и нормальными составами, с варьирующими значениями $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ (0.9-1.7). Породы этого массива относятся к металюминиевым-слабопералюминиевым разностям и соответствуют высококалиевой известково-щелочной серии. Они находятся в поле магнезиальных пород, подобно кордильерским гранитам [12], мезопротерозойским гранитами рапакиви из Нью-Мексико [13] и миоценовым гранитам рапакиви Калифорнии [14]. В исследуемых породах устанавливается

однотипный характер распределений РЗЭ ((La/Yb)_N = 20-27), близкий с миоценовыми гранитами рапакиви Калифорнии, соответствуя OIB типу. При этом в гранитах рапакиви из Калифорнии выявлены небольшие положительные, а в породах Тарбаганнахского массива небольшие отрицательные аномалии Eu (Eu/Eu* = 1.1-1.3). Кроме того, в породах исследуемого массива концентрации крупноионных элементов, таких как Rb, Ba и K, а также высокорядных, таких как Th, U, Ta, Nb, Ti и P, близки с таковыми в УСС.

Для исследуемых пород установлены граничные А-I-S-типа характеристики, подобно миоценовым гранитам рапакиви Калифорнии, отвечающих условиям “Отрыва слэба” (“Slab failure”) [15].

5. U-Pb и Sm-Nd изотопные исследования

U-Pb геохронологические исследования проводились для двух пород из центральной части Тарбаганнахского массива, имеющих в разной степени проявленную структуру рапакиви – кварцевого монцонита (ТБГ-8-21) и гранодиорита (ТБГ-2-21). Проба ТБГ-2-21 представлена 11 зёрнами и их обломками зонального строения от полупрозрачных до серых и мутных коричневых цветов. Конкордантный возраст для 7 аналитических точек из периферийных и центральных участков субидиоморфных и идиоморфных кристаллов и их обломков с тонкой зональностью составляет 120 млн лет (СКВО = 0.021, U=1428 – 3401 (среднее 2965), Th=295 – 1367 (среднее 786), Th/U=0.19 – 0.45). В отдельных частях зерен получены ненадежные оценки возрастов по отношению Pb²⁰⁶/U²³⁸ от 105 млн лет до 135 млн лет из-за высокой концентрации урана (U=2485 – 7557, Th=1539 – 5728, Th/U=0.48 – 1.17). В центральных частях зерен по отношению ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb получены оценки древних возрастов от 1912 млн лет до 1962 млн лет (U=38 – 843, Th=12 – 93, Th/U=0.03 – 0.36). В пробе ТБГ-8-21 цирконы представлены полупрозрачными до грязно-желтых и мутных, коричневыми идиоморфными, в основном, длиннопризматическими зёрнами с включениями и трещинами, и их обломками. Конкордантный возраст для 15 аналитических точек составляет 120 млн лет (СКВО = 0.37, U=562 – 2864 (среднее 1035 ppm), Th=284 – 4282 (среднее 791), Th/U=0.45 – 1.54.

Sm-Nd изотопные данные отражают оценки модельных значений возраста пород со структурой рапакиви Тарбаганнахского массива, по одно- и двустадийной моделям: для гранодиорита (ТБГ-2-21), находящиеся в узком интервале 1.17-1.18 млрд. лет, а для кварцевого монцонита (ТБГ-8-21) – 0.8-0.94 млрд. лет. Эти кислые и средние породы имеют небольшие отрицательные значения εNd_(T), соответственно, -2.9 и -0.1, и невысокие величины (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)₀, соответственно, 0.7066 и 0.7054. На диаграмме εNd_(T) – (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)₀ по [16] они попадают в поля обогащенного мантийного (EM II) источника, смешанного с континентальным коровым компонентом.

6. Выводы

Новые U-Pb оценки возраста цирконов (SHRIMP-II) средних и кислых интрузивных пород со структурой рапакиви Тарбаганнахского массива и ранее полученные по цирконам из даек лампрофиров Нежданинского месторождения [4] устанавливают аптский возраст образования пород, вероятно, единого уэляхского магматического комплекса АЮТЗ, отвечающий ~120 млн лет. Разнообразие составов магматических пород Тарбаганнахского массива, выявленные геохимические особенности, а также Sm-Nd и Rb-Sr изотопные характеристики подтверждают их смешанный магматический источник, преимущественно верхнекоровый с обогащенным мантийным материалом (EM II).

Это магматическое событие происходило в переходный период в развитии конвергентной границы на юго-востоке Сибирского (Северо-Азиатского) кратона [3, 17]. Установленные особенности состава пород Тарбаганнахского массива позволяют связать их образование с возможным отрывом или иным разрушением слэба океанической плиты при развитии активной континентальной окраины в апте.

7. Благодарности

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-27-00178). Изотопные исследования выполнены за счет государственного задания ИГАБМ СО РАН.

8. Литература

- [1] Bakharev A.G., Zaytsev A.I. The South-Verkhoyansky metamorphic belt and associated magmatic complexes. In *The Tectonics, geodynamics and metallogeny of the Sakha Republic (Yakutia)* / Eds. Parfenov L.M., Kuzmin M.I. – M.: MAIK «Nauka/Interperiodica», 2001, P. 269-274 (In Russian).
- [2] Chernyshev I.V., Chugaev A.V., Bortnikov N.S., Gamyandin G.N., Prokopiev A.V. Pb Isotopic composition and metal sources of Au And ag deposits of the South Verkhoyansk region (Yakutia, Russia) according to high-precision MC-ICP-MS data // *Geology of ore deposits.* – 2018. – Vol. 60. – № 5. – P. 398-417. – URL: <https://doi.org/10.1134/S1075701518050033>
- [3] Prokopiev A.V., Toro J., Hourigan J.K., Bakharev A.G., Miller E.L. 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. – P. 71-84. – URL: <https://doi.org/10.5194/smsps-4-71-2009>.
- [4] Chernyshev I.V., Bortnikov N.S., Goltsman Y.V., Gamyandin G.N., Chugaev A.V., Bairova E.D., Bakharev A.G., Kotov A.B., Sal'nikova E.B. Geochronology of igneous rocks at and near to the Nezhdaninka gold deposit, Yakutia, Russia: U-Pb, Rb-Sr, and Sm-Nd isotopic data // *Geology of ore deposits.* – 2012. – Vol. 54. – № 6. – P. 411-433. – URL: <https://doi.org/10.1134/S1075701512060049>
- [5] Prokopiev A.V., Toro J., Hourigan J.K., Bakharev A.G., Miller E.L. 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. – P. 71-84. – URL: <https://doi.org/10.5194/smsps-4-71-2009>.
- [6] Kropachev A.P. (ed.). State Geological Map of Russia. Scale 1:1,000,000. Verkhoyano-Kolyma Series. Sheets P-54 (Oymyakon). Explanatory note. Russian Geological Research Institute (VSEGEI). – SPb, 2013. – 400 p. (In Russian).
- [7] Goryachev N.A. *Geology of Mesozoic gold-quartz vein belts in Northeastern Asia.* – Magadan: SVKNII, 1998. – 210 p. (In Russian).
- [8] Layer P.W., Newberry R., Fujita K., Parfenov L., Trunilina V., Bakharev A. Tectonic setting of the plutonic belts of Yakutia, northeast Russia, based on ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology and trace element geochemistry // *Geology.* – 2001. – Vol. 29. – P. 167-170. – URL: [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029<0167:TSOTPB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0167:TSOTPB>2.0.CO;2).
- [9] Greenberg G.A., Bakharev A.G., Gamyandin G.N. *The granitoides of the South Verkhoyan.* – M.: «Nauka», 1970. – 216 p. (In Russian).
- [10] Fridovsky V.Yu., Vernikovskaya A.E., Yakovleva K.Yu., Rodionov N.V., Travin A.V., Matushkin N.Yu., Kadilnikov P.I. Geodynamic formation conditions and age of granitoids from small intrusions in the West of the Yana–Kolyma Gold Belt (Northeast Asia) // *Russian Geology and Geophysics.* – 2022. – Vol. 63. – № 4. – P. 483-502. – URL: <http://dx.doi.org/10.2113/RGG20214442>.
- [11] Smirnova E.V., Flem B., Anchutina E.A., Mysovskaya I.N., Lozhkin V.I., Petrov L.L. Determination of REE, Y, Nb, Zr, Hf, Ta, Th and U in geological reference materials LSHC-1 and Amf-1 by solution and laser ablation ICP-MS // *Geostand. Geoanalyt. Res.* – 2010. – Vol. 34. – № 1. – P. 49-65. – URL: <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2009.00009.x>.
- [12] Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J., Arculus R.J., Ellis D.J., Frost C.D. A geochemical classification for granitic rocks // *J. Petrol.* – 2001. – Vol. 42. – № 11. – P. 2033-2048. – URL: <https://doi.org/10.1093/petrology/42.11.2033>.
- [13] McLemore V.T., Ramo O.T., Kosunen P.J., Heizler M., Haapala I., McKee C. Geology and geochemistry of Proterozoic granitic and mafic rocks in the Redrock area, northern Burro Mountains, Grant County, New Mexico - A progress report // *New Mex. Geol. Soc. 51st Annual Fall Field Conference Guidebook.* – 2000. – P. 117-126. – URL: <https://doi.org/10.56577/FFC-51.117>.

- [14] Calzia J.P., Rämö O.T. Miocene rapakivi granites in the southern Death Valley region, California, USA // *Earth Sci. Rev.* – 2005. – Vol. 73. – № 1. – P. 221-243. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2005.07.006>.
- [15] Whalen J.B., Hildebrand R.S. Trace element discrimination of arc, slab failure, and A-type granitic rocks // *Lithos.* – 2019. – Vol. 348-349. – 19 p. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.105179>.
- [16] Zindler A., Hart S.R. Chemical Geodynamics // *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* – 1986. – Vol. 14. – P. 493-571. – URL: <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.14.050186.002425>.
- [17] Tikhomirov P.I., Pravikova N.V., Bychkova Y.V. The Chukotka segment of the Uda-Murgal and Okhotsk-Chukotka volcanic belts: age and tectonic environment // *Russian Geology and Geophysics.* – 2020. – Vol. 61. – № 4. – P. 378-395. – URL: <https://doi.org/10.15372/RGG2019149>.

ТЕКТОНО-ТЕРМАЛЬНЫЕ ЭТАПЫ ЭВОЛЮЦИИ КОРЫ ЯКУТСКОЙ АЛМАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ И ИХ СВЯЗЬ С ПРОЦЕССАМИ АККРЕЦИИ СИБИРСКОГО КРАТОНА

Владислав Шацкий^{1,2,3}, Алексей Рагозин^{1,2}

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

3 ФГБУН «Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН»,
664033, Россия, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1а

TECTONO-THERMAL STAGES OF THE CRUSTAL EVOLUTION OF THE YAKUTIAN DIAMONDIFEROUS PROVINCE AND THEIR RELATIONSHIP WITH THE ACCRETION PROCESSES OF THE SIBERIAN CRATON

Vladislav Shatsky^{1,2,3}, Aleksey Ragozin^{1,2}

1 Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS,

3, Akademika Koptuyuga ave., Novosibirsk, 630090, Russia

2 Novosibirsk State University, 2, Pirogova st., Novosibirsk, 630090, Russia

3 Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, 1a, Favorskogo str., Irkutsk, 664033, Russia

Annotation. Analysis of U-Pb age and Hf isotopic composition of zircons from crustal xenoliths in kimberlite pipes of the Yakutsk diamondiferous province indicates the Eoarchean and Paleoarchean ages of the formation of the crust of the Yakutian diamondiferous province. Eoarchean and Paleoarchean crust reworked in several tectonothermal events (3.2-2.9, 2.8-2.7 and 2.0-1.8 Ga). The tectono-thermal stage of 2.7 Ma is not recorded only in zircons from crustal xenoliths of the Alakit-Markha kimberlite field and is weakly manifested in zircons of the Daldyn kimberlite field. This is due to the strong reworking of the crust in these areas during the tectono-thermal stage, which has an age of 1.9 Ma. At the same time, the 1.9 Ma stage is not recorded in zircons from xenoliths of the Upper-Muna kimberlite field and is weakly manifested in zircons from xenoliths of the Nakyn kimberlite field. The data obtained indicate that there is no relationship between the degree of reworking of the crust beneath kimberlite fields and their spatial arrangement relative to the main collision zones of the Siberian craton. We believe that the tectonothermal events that occurred over significant area of the Siberian craton could result from the upwelling of superplumes at 2.9, 2.7 and 2 Ga.

1. Введение

В настоящее время преобладающей является точка зрения, согласно которой амальгамация Сибирского кратона произошла в палеопротерозое (1,9-1,8 млрд лет) [1-3]. С этим этапом отождествляется окончательное формирование нижней коры Сибирского кратона [4], обусловленное коллизией Далдынского, Маганского и Мархинского террейнов. Однако, полученные ранее данные по исследованию ксенолитов нижнекоровых пород из различных кимберлитовых трубок Якутской алмазодносной провинции [5] свидетельствуют о том, что этап 1,8-2,0 млрд лет не проявлен в цирконах из нижнекоровых ксенолитов Верхне-Мунского кимберлитового поля, которое расположено рядом с предполагаемой коллизионной зоной, отделяющей Далдынский и Мархинский террейны [1]. В то же время этот этап фиксируется в цирконах из ксенолита основного гранатового гранулита трубки Ботуобинская Накынского кимберлитового поля, расположенного в пространственном удалении от известных коллизионных зон. Эти данные ставят фундаментальный вопрос о связи процессов

модификации и становления нижней коры Анабарской тектонической провинции с этапами коллизии террейнов Сибирского кратона, а также о времени его формирования.

Проведенные нами определения U-Pb возраста и изотопного состава Hf в цирконах из ксенолитов коровых пород в кимберлитовых трубках четырех кимберлитовых полей [5-8] позволяет рассмотреть правомочность сделанных ранее выводов об эволюции континентальной коры Якутской алмазонасной провинции и связи выявленных тектоно-термальных этапов модификации коры с процессами амальгамации Сибирского кратона.

В настоящее время проведено определение U-Pb возраста и изотопного состава Hf цирконов из кимберлитовых трубок Далдынского, Алакит-Мархинского, Верхне-Мунского (Заполярная, Новинка) и Накынского кимберлитовых полей (Рисунок 1).

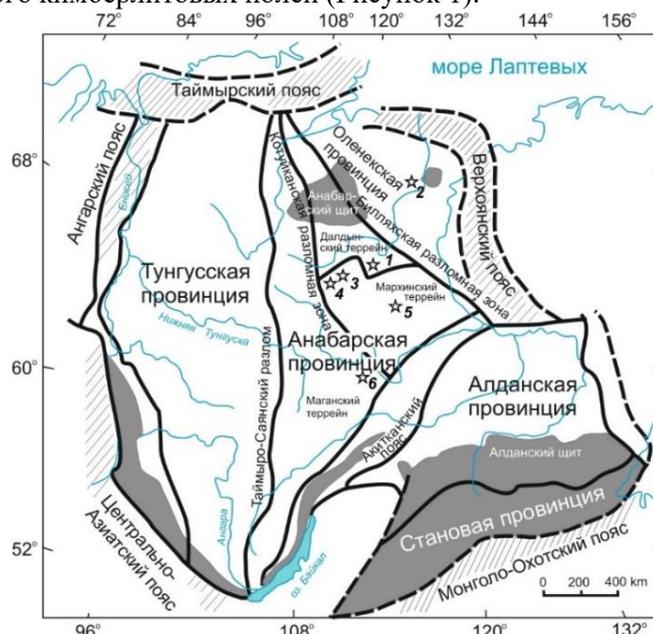


Рисунок 1 – Основные структурные элементы Сибирского кратона (по [1]). Серым цветом показаны выходы докембрийских пород, звезды – кимберлитовые поля: 1 – Верхне-Мунское кимберлитовое поле, 2 – Куойское кимберлитовое поле, 3 – Далдынское кимберлитовое поле, 4 – Алакит-Мархинское кимберлитовое поле, 5 – Накынское кимберлитовое поле, 6 – Малоботуобинское кимберлитовое поле.

2. Результаты определения U-Pb возраста и изотопного состава Hf цирконов из ксенолитов коровых пород.

2.1. Далдынское кимберлитовое поле

В кимберлитовых трубках Удачная, Зарница и Ленинградская среди ксенолитов пород коры преобладают гранатовые ($Grt+Cpx+Pl\pm Opx\pm Amp\pm Scp\pm Rt\pm Ap\pm Zrn\pm Ky\pm Ilm\pm Bt$) и двупироксеновые ($Cpx+Opx+ Pl\pm Amp\pm Rt\pm Ap\pm Zrn\pm Bt\pm Ilm$) гранулиты основного состава, плагиогнейсы ($Pl+Qtz\pm Opx\pm Kfs\pm Bt\pm Amp\pm Ilm$) и метадiorиты ($Pl+Amp+Bt+Ap+Qtz$). Оценки температур равновесия для гранатовых гранулитов укладываются в интервал 700-850°C, для двупироксеновых гранулитов 750-800 °C, для плагиогнейсов 700-750°C, для амфиболитов 600-690°C [6]. Полученные оценки давления для гранатовых гранулитов укладываются в интервал 9-13 кбар, для двупироксеновых гранулитов – 8,5-10 кбар.

На графиках распределения относительной вероятности цирконы из ксенолитов Далдынского поля демонстрируют несколько пиков из которых наиболее сильными являются пики 1879, 1977 и 2603 млн лет (Рисунок 2а).

2.2. Алакит-Мархинское поле

В Алакит-Мархинском кимберлитовом в трубках Юбилейная и Комсомольская, как и в трубках Далдынского поля преобладают мафические гранатовые ($Grt-Cpx-Pl\pm Opx\pm Hbl\pm Bt\pm Scp\pm Ilm\pm Rut\pm Ap$) и двупироксеновые гранулиты ($Cpx-Opx-Pl\pm Hbl\pm Rut\pm Ap$). В трубке Комсомольская, кроме того, встречаются ксенолиты гранат-биотитовых гнейсов ($Grt+Bt+Pl+Kfs+Qtz\pm Scp$). Мафические гранулиты из трубок Комсомольская и Юбилейная

имеют температуры равновесия в интервале 650-850°C и давления 7,5-9,5 кбар. На графиках распределения относительной вероятности выделяется один пик – 1900 млн лет (Рисунок 2б).

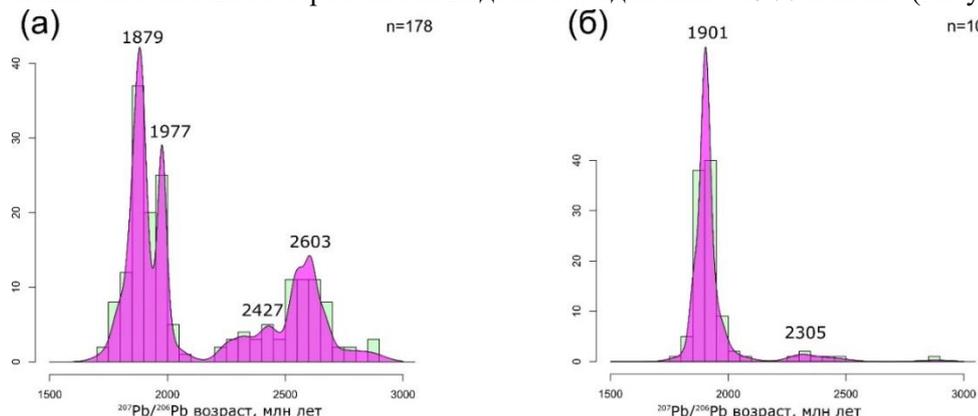


Рисунок 2 – Относительная вероятность распределения возрастов цирконов из коровых ксенолитов кимберлитовых трубок Далдынского (а) и Алакит-Мархинского поля (б).

2.3. Накынское поле

Среди коровых ксенолитов кимберлитовых трубок Ботуобинская и Нюрбинская преобладают мафические гранатые и безгранатые гранулиты ($Pl \pm Grt \pm Crx \pm Qtz \pm Opx \pm Amf \pm Bt \pm Scp$). Встречаются также гранулиты среднего состава и гранат-биотитовые гнейсы ($Grt + Pl + Kfs + Qz + Bt \pm Crx \pm Amp \pm Car$). Температуры равновесия мафических гранулитов 650-750°C, давления – 7,1-8,5 кбар. Близкие температуры равновесия получены для гранат-биотитовых гнейсов. На графике распределения относительной вероятности выделяется главный пик с возрастом 2750 млн лет и пик с возрастом 2085 млн лет (Рисунок 3а).

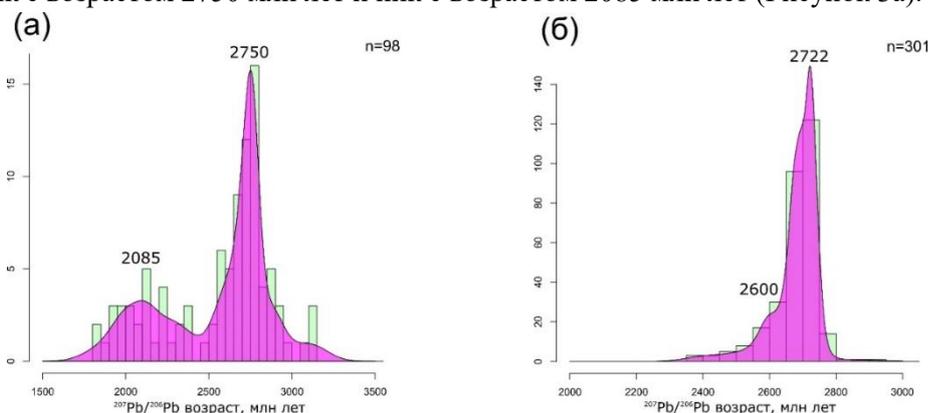


Рисунок 3 – Относительная вероятность распределения возрастов цирконов из коровых ксенолитов кимберлитовых трубок Накынского (а) и Верхне-Мунского поля (б).

2.4. Верхне-Мунское поле

Среди коровых ксенолитов в трубке Заполярная преобладают гранулиты среднего состава ($Pl \pm Qtz \pm Crx \pm Opx \pm Grt \pm Amf \pm Bt \pm Kfs \pm Scp \pm Zr \pm Rt \pm Mgt$) и гранат-биотитовые гнейсы ($Grt + Crx + Opx + Pl + Kfs + Qz + Amf + Bt$). Температуры равновесия гранулитов и гнейсов лежат в интервале 650-800°C, давления – 9-11 кбар.

В трубке Новинка среди коровых ксенолитов преобладают гранатые и безгранатые кристаллические сланцы $Pl + Crx + Sod + Opx + Ilm + Ap \pm Kfs \pm Amp \pm Grt \pm Scp \pm Bt$. Так же присутствуют гранат-пироксеновые гнейсы ($Pl + Crx + Opx + Kfs + Qz + Grt + Amp + Bt + Ilm + Ap$). Температуры равновесия – 700-800°C, давления – 8-10,1 кбар. На графике распределения относительной вероятности выделяется главный пик с возрастом 2720 млн лет и небольшой пик с возрастом 2600 млн лет (Рисунок 3б).

Все цирконы из коровых ксенолитов Накынского и Верхне-Мунского кимберлитовых полей имеют архейский Hf модельный возраст (T_{DM}^c 3,65-3,1 млрд лет). В то же время цирконы имеющие палеопротерозойские модельные возраста присутствуют в ксенолитах гранатого

гранулита из кимберлитовой трубки Удачная (2,41-2,36 млрд лет) и Зарница (2,43-2,45 млрд лет), из трубки Ленинградская 3,28-2,6 млрд лет, из трубки Комсомольская (3,77-2,23 млрд лет). В то же время цирконы с эоархейскими модельными Hf возрастaми присутствуют в коровых ксенолитах кимберлитовых трубок Нюрбинская (4,06- 3,6 млрд лет) и Зарница (4,17-3,65 млрд лет).

3. Обсуждение результатов

Данные по детритовым цирконам Анабарского щита свидетельствуют о образовании ювенильной коры в интервале 3300-2600 млн лет [9] (Рисунок 4). Большинство цирконов этого возрастного диапазона имеют суперхондритовые значения $\epsilon_{Hf}(t)$. Авторы полагают, что формирование коры Сибирского кратона началось в середине палеоархея. В возрастном интервале 2,5-2,7 млрд лет имеются детритовые цирконы с суперхондритовыми значениями $\epsilon_{Hf}(t)$, свидетельствующими о производстве ювенильной коры и с субхондритовыми (от -3 до -12) из переработанной коры. Цирконы с возрастaми 1,8-2 млрд лет, за исключением двух зерен, показывают субхондритовые значения $\epsilon_{Hf}(t)$. Полученные нами данные показывают, что подавляющее большинство цирконов из ксенолитов коровых пород имеют субхондритовые значения $\epsilon_{Hf}(t)$ (Рисунок 4).

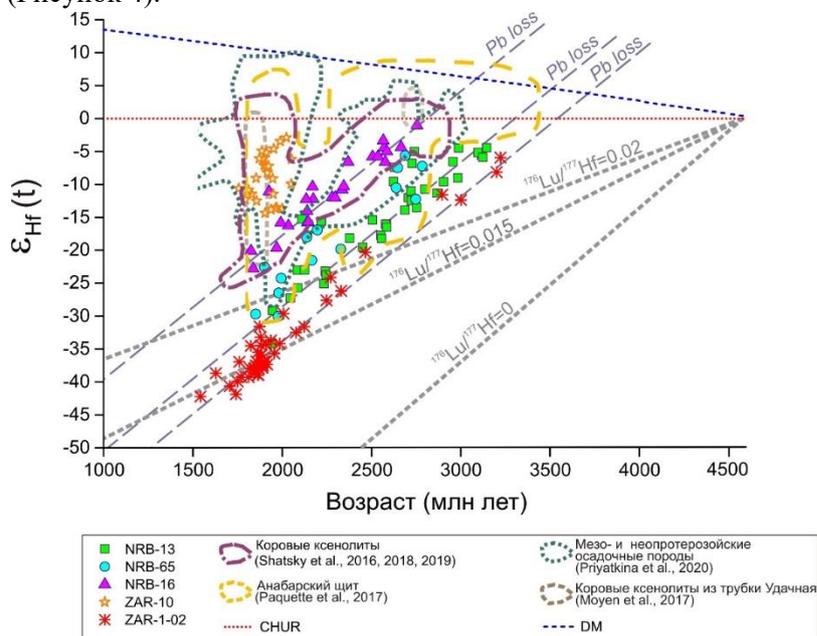


Рисунок 4 – Изотопный состав Hf: график зависимости $\epsilon_{Hf}(t)$ от $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возрастa цирконов.

Это относится и к цирконам, имеющим возрастa больше 3,2 млрд лет. Так циркон. из ксенолита мафического гранатового гранулита из кимберлитовой трубки Зарница, с U-Pb возрастом 3,2 млрд лет имеет величину $\epsilon_{Hf}(t)$ -5,9. Отрицательные значения $\epsilon_{Hf}(t)$ имеются и у цирконов с возрастaми больше 3,1 млрд лет из образца ксенолита биотитового гнейса кимберлитовой трубки Нюрбинская (Рисунок 4). Негативные значения $\epsilon_{Hf}(t)$ имеют и палеоархейские цирконы (3,6-3,2 млрд лет) из пород далдынской серии Анабарского щита [10].

Таким образом, у нас имеются свидетельства переработки палеоархейской коры. Полученные значения T_{DM}^c и $T_{CHUR}^c > 3,6$ млрд лет для цирконов из ксенолитов мафического гранулита трубки Зарница (Zar 1-02) и ксенолитов гранат-биотитовых гнейсов из трубки Нюрбинская (Nrb-13, Nrb-65) свидетельствуют о переработке эоархейской коры (Рисунок 4) [8]. Переработка эоархейской коры в палеоархее сопровождалась образованием ювенильной коры, о чем свидетельствуют данные изучения детритовых цирконов Анабарского щита [9]. Образование ювенильной коры в интервалах 3,1-3,3 млрд лет и 2,7-2,5 млрд лет фиксируется в детритовых цирконах Анабарского щита, в то же время такие свидетельства отсутствуют у цирконов из ксенолитов нижнекоровых пород (Рисунок 4). Тектоно-термальный этап 2,7 млрд лет не фиксируется у цирконов из ксенолитов Алаakit-Мархинского кимберлитового поля и

слабо проявлен у цирконов Далдынского кимберлитового поля (Рисунок 2). Это объясняется сильной переработкой коры в ходе тектоно-термального этапа имеющего возраст 1,9 млрд лет. В то же время этап 1,9 млрд лет не фиксируется в цирконах из ксенолитов Верхне-Мунского кимберлитового поля и слабо проявлен в цирконах из ксенолитов Накынского кимберлитового поля (Рисунок 3).

Палеоротерозойские модельные возраста получены только для ксенолита мафического гранулит кимберлитовой трубки Удачная, Зарница и гранат-биотитовых сланцах трубки Комсомольская. Как упоминалось выше, согласно существующим представлениям амальгамация Сибирского кратона произошла в палеопротерозое (1,9-1,8 млрд лет) [1,3]. Кимберлитовые трубки Алакит-Мархинского кимберлитового поля расположены ближе всего к Котуйканской коллизионной зоне, возраст которой согласно Розену и др. [1] составляет 1,8-2 млрд лет. В то же время, по мнению [3] U-Pb возраст цирконов из монцитов Котуйканской зоны и возраст гранулитового метаморфизма (2,76-2,68) в Далдынском террейне указывают на неоархейский возраст Котуйканской коллизионной зоны. Наиболее сильно проявленный в цирконах из ксенолитов Алакит-Мархинского кимберлитового поля тектоно-магматический этап 1,9 млрд лет, позволяет связать проявление этого тектоно-термального этапа с этапом коллизии Маганского и Далдынского террейнов.

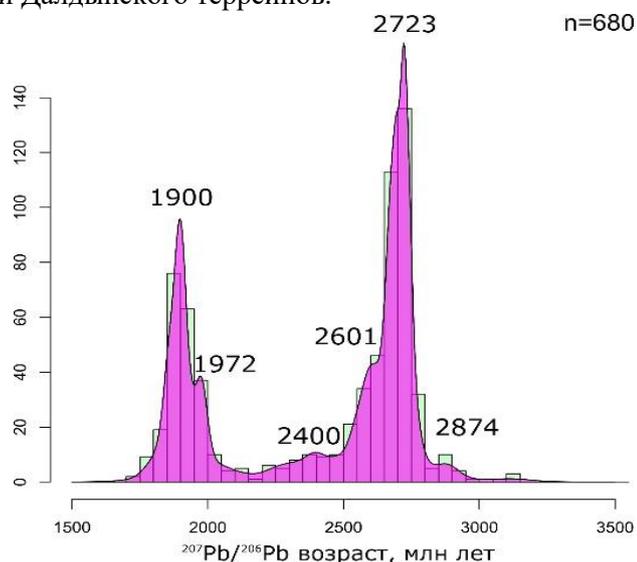


Рисунок 5 – Относительная вероятность распределения возрастов цирконов из коровых ксенолитов Якутской алмазоносной провинции.

По мнению О.М. Розена [1] выделенная граница между Далдынским и Мархинским террейнами может представлять собой зону коллизии с возрастом древнее Котуйканской коллизионной зоны. Ближе всего к этой предполагаемой зоне расположено Верхне-Мунское кимберлитовое поле. Однако в цирконах из коровых ксенолитов в кимберлитовых трубках этого поля наиболее сильно проявлен пик 2,7 млрд лет и отсутствуют возраста моложе 2,4 млрд лет. Ранее нами высказывались сомнения в правомочности выделения Мархинского террейна [5,6]. Появившиеся новые данные датирования цирконов из керна глубоких скважин Сибирского кратона, пройденных в пределах Мархинского террейна, свидетельствуют о четырех этапах становления фундамента 3,16–3,17; 2,83; 2,71–2,72 и 1,90 млрд лет [11], что подтверждает сделанный нами вывод о необходимости уточнения предложенной ранее тектонической схемы Сибирского кратона. Эти этапы аналогичны выделенным нами тектоно-термальным этапам в нижней и средней коре Якутской алмазоносной провинции (3,2-2,9; 2,8-2,7; 2,0-1,8 млрд лет).

При обсуждении вопроса о связи тектоно-термальных этапов с процессами формирования Сибирского кратона особого внимания заслуживают данные, полученные по цирконам из ксенолитов Накынского кимберлитового поля. Это поле расположено вдали от всех выделенных зон коллизии. Тем не менее, у цирконов из ксенолитов трубки Нюрбинская фиксируется тектоно-термальный этап 1,9 млрд лет [8] (Рисунок 4). Полученные данные

свидетельствуют об отсутствии зависимости между степенью переработки коры под кимберлитовыми полями и их пространственным расположении относительно главных коллизионных зон Сибирского кратона.

Наиболее сильно проявленные, на суммарном графике распределения относительной вероятности, пики 2,7 и 1,9 млрд лет (Рисунок 5) аналогичны по возрасту пикам возрастов больших изверженных провинций [12], связанных с подъемом суперплюмов. Это позволяет высказать предположение, что установленные в коре Якутской кимберлитовой провинции тектоно-термальные этапы (2.9, 2.7 и 2-1.8 млрд лет) связаны с подъемом суперплюмов.

4. Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-27-00195).

5. Литература

- [1] Rosen, O.M., Manakov, A.V., Zinchuk N.N. Siberian Craton: Origin, Diamond Potential. – Moscow: Scientific World, 2006. – P. 210.
- [2] Gladkochub, D., Pisarevsky, S., Donskaya, T., Natapov, L., Mazukabzov, A., Stanevich, A. and Sklyarov, E. Siberian Craton and its evolution in terms of Rodinia hypothesis // Episodes. – 2006. – Vol. 29 (3). – P. 169-174.
- [3] Donskaya T.V., 2020. Assembly of the Siberian Craton: Constraints from Paleoproterozoic Granitoids // Precambrian Research. – 2020. – Vol. 348. – P. 105869
- [4] Koreshkova, M., Downes, H. The age of the lower crust of the central part of the Columbia supercontinent: a review of zircon data // Gondwana Research. – 2021. – Vol. 96. – P. 37-55.
- [5] Shatsky, V.S., Malkovets, V.G., Belousova, E.A., Tretiakova, I.G., Griffin, W.L., Ragozin, A.L., Wang, Q., Gibsher, A.A. and O'Reilly S.Y. Multi-stage modification of Paleoproterozoic crust beneath the Anabar tectonic province (Siberian craton) // Precambrian Research. – 2018. – Vol. 305. – P. 125-144.
- [6] Shatsky, V.S., Malkovets, V.G., Belousova, E.A., Tretiakova, I.G., Griffin, W.L., Ragozin, A.L., Gibsher, A.A., and O'Reilly S.Y. Tectonothermal evolution of the continental crust beneath the Yakutian diamondiferous province (Siberian craton): U–Pb and Hf isotopic evidence on zircons from crustal xenoliths of kimberlite pipes // Precambrian Research. – 2016. – Vol. 282. – P. 1-20.
- [7] Shatsky, V.S., Wang, Q., Skuzovatov, S.Yu. and Ragozin, A.L. The crust-mantle evolution of the Anabar tectonic province in the Siberian Craton: coupled or decoupled? // Precambrian Research. – 2019. – Vol. 332. – P. 105388.
- [8] Shatsky, V.S., Ragozin, A.L., Wang, Q. and Wu, M. Evidence of Eoarchean crust beneath the Yakutian kimberlite province in the Siberian craton // Precambrian Research. – 2022. – Vol 369. – P. 106512.
- [9] Paquette, J.L., Ionov, Dmitri A., Agashev, A.M., Gannoun, A. and Nikolenko, E.I. Age, provenance and Precambrian evolution of the Anabar shield from U-Pb and Lu-Hf isotope data on detrital zircons, and the history of the northern and central Siberian craton // Precambrian Research. – 2017. – Vol. 301. – P. 134-144.
- [10] Gusev, N.I., Sergeeva, L.Yu., Larionov, A.N. and Skublov, S.G. Relics of the Eoarchean Continental Crust of the Anabar Shield, Siberian Craton // Petrology. – 2020. – Vol. 28 (2). – P. 115-138.
- [11] Larichev, A.I., Vidik, S.V., Sergeev, S.A. and Osadchii, I.V. Petrographic characteristics and age of the rocks of the Aldan-Anabar block of the basement of the Siberian platform according to the study of cores from deep drillings // Regional geology and metallogeny. – 2022. – №92. – P. 28-40.
- [12] Condie, K. A planet in transition: the onset of plate tectonics on Earth between 3 and 2 Ga? // Geoscience Frontiers. – 2018. – Vol. 9. – P. 51-60.

ГЛОБАЛЬНАЯ ПЕТРОЛОГИЯ ПО ДАННЫМ О ГОРЯЧЕЙ ГЕТЕРОГЕННОЙ АККРЕЦИИ ЗЕМЛИ

Владимир Шкодзинский

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

GLOBAL PETROLOGY ACCORDING TO THE DATA ON HOT HETEROGENEOUS ACCRETION OF THE EARTH

Vladimir Shkodzinskiy

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

Annotation. According to the data on hot heterogeneous accretion of the Earth, the iron nucleus were formed as result of influence magnetic forces. Global petrologic processes were formed as result of fractionation global magmatic ocean during accretion and crystallization of the silicate mantle.

1. Введение

Для решения разнообразных теоретических и практических вопросов геологии очень важно иметь правильные представления о генезисе Земли и закономерностях ее геологической эволюции. Однако до настоящего времени эта проблема не имела убедительного решения. Это обусловлено сложностью и слабой изученностью геологических процессов. В соответствии с принципом актуализма, предполагающего сходство ранних и современных геологических обстановок, обычно принимается, что наша планета сформировалась путем холодной гомогенной аккреции, то есть в результате объединения относительно холодных силикатных и железных частиц протопланетного диска. В дальнейшем разделение их по плотности в земных недрах привело к образованию ядра, мантии и земной коры [1]. Магмы формируются путем отделения выплавов в слабо подплавленных породах под влиянием радиогенного тепловыделения.

Однако к настоящему времени получено большое количество доказательств ошибочности этой гипотезы и формирования Земли путем горячей гетерогенной аккреции. Как известно, падающие метеориты плавятся и частично испаряются под влиянием импактного тепловыделения. Расчеты показали, что это тепловыделение должно было разогреть вещество Земли на 34 000 ° [2]. Это подтверждается существованием трендов магматического фракционирования в мантийных ксенолитах из кимберлитов (линия MgO рис. 1) и в ортогнейсах земной коры, полным соответствием степени уменьшения изотопного возраста и температуры кристаллизации их различных пород последовательности образования при фракционировании (линии A, R и T на рис. 1), проекцией наиболее ранних геотермических градиентов в раннедокембрийских кристаллических комплексах в область очень высокой температуры (около 1000 ° C) на земной поверхности [3] и множеством других данных. Резкая химическая неравновесность мантийных пород с металлическим железом в отношении содержания хорошо растворимых в нем сидерофильных элементов [2], в двадцать тысяч раз большая фугитивность кислорода в мантийных породах, чем необходимо для устойчивости металлического железа, указывают [4, 5], что железные и силикатные частицы никогда не были перемешаны в земных недрах. Следовательно, они объединялись в разное время и аккреция была гетерогенной. В миллиарды раз большая мощность магнитных сил по сравнению с гравитационными указывает, что земное ядро возникло раньше силикатной мантии путем быстрого объединения железных частиц, намагниченных магнитным полем Солнца.

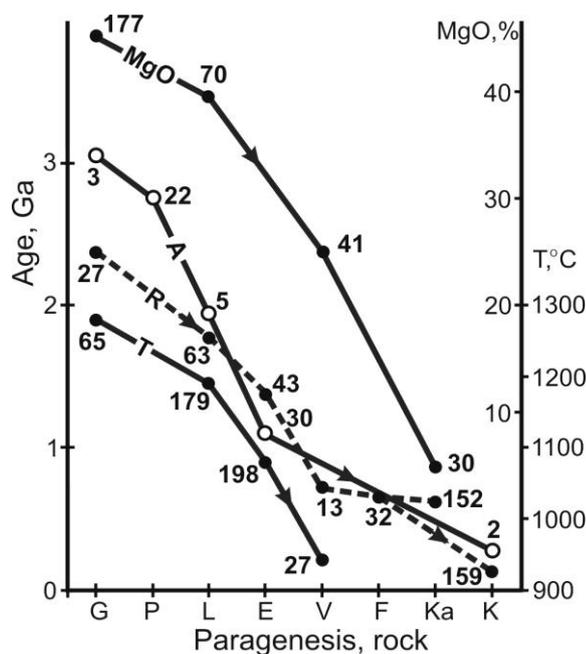


Рисунок 1 – Средние изотопные возрасты различных мантийных пород из ксенолитов в кимберлитах (линия R), включений в алмазах (линия A), средняя температура образования при 5 ГПа (линия T) и среднее содержание MgO в породах (линия MgO). Составы включений в алмазах и ксенолитах: G – гарцбургитовый, P – перидотитовый нерасчлененный, L – лерцолитовый, E – эклогитовый, V – верлитовый и вебстеритовый, F – флогопитсодержащие породы, Ka – карбонатиты, K – кимберлиты. Числа у точек – количество использованных определений [3].

2. Происхождение геосфер

Полученные доказательства горячей гетерогенной аккреции Земли приводят к принципиально новому решению генетических проблем петрологии и объясняют все имеющиеся эмпирические данные. Гравитационное поле быстро сформировавшегося железного ядра притягивало силикатные частицы. Их выпадение привело к образованию мантии. Более позднее образование объясняет резкую химическую неравновесность ее вещества с металлическим железом. Огромное импактное тепловыделение при аккреции обусловило возникновение глобального магматического океана [3]. Его придонная часть кристаллизовалась и фракционировалась под влиянием роста давления нагрузки образуемых аккрецией верхних частей. Ультраосновные кумулаты формировали вещество мантии, а остаточные расплавы увеличивали объем магматического океана. Пониженная сила тяжести на еще небольшой Земле и небольшая глубина раннего магматического океана обусловили низкое давление (менее 0,3 ГПа) при его придонном фракционировании и образование в связи с этим большого объема низкобарических остаточных расплавов от толеитового до кислого состава.

Вследствие пониженного удельного веса кислые расплавы по мере образования всплывали и после затвердевания сформировали раннедокембрийские кристаллические комплексы и кислую кору. Выщелачивание затвердевших верхних частей магматического океана под влиянием его кислотных эманаций (HCl, HF и др.) и отделение углекислоты привели к раннему образованию кварцитов, высокоглиноземистых гнейсов и карбонатных пород. Вследствие жидкого состояния магматического океана на его поверхности отсутствовали значительные перепады высот. Это объясняет нехарактерность для раннедокембрийских кристаллических комплексов конгломератов и гравелитов. Затвердевшие кислые расплавы вследствие увеличения плотности периодически тонули вместе с накопившимися на них осадками, а на их место всплывали подстилавшие еще жидкие магмы, часто более основного состава. Это объясняет широко распространение в раннедокембрийских кристаллических комплексах чередования ортогнейсов и кристаллических сланцев различной основности с различными парагнейсами. Одинаковые гистограммы распределения температуры в гиперстенowych и в безгиперстенowych гнейсах (рис. 2) указывают, что образование этих пород обусловлено различным содержанием воды в

исходных магмах, не свидетельствует о большей высокотемпературности гиперстенсодержащих гнейсов и принадлежности их к особой гранулитовой фации метморфизма. Это подтверждается широко распространенным переслаиванием гиперстеновых и безгиперстеновых гнейсов в одних и тех же обнажениях.

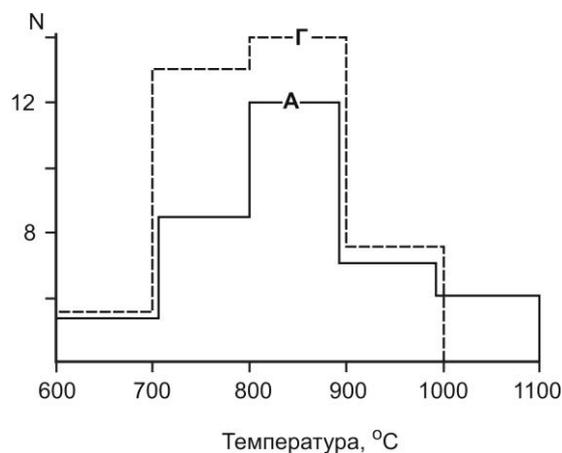


Рисунок 2 – Близость гистограмм распределения температуры кристаллизации гиперстенсодержащих (Г) и безгиперстеновых гнейсов (А) р. Алдан Алданского щита [3].

Большая декомпрессия при всплывании кислых придонных магм океана обусловила протекание в них процессов плавления, возникновение их перегретости в малоглубинных условиях и большую длительность затвердевания. Поэтому верхняя часть кислого слоя значительное время находилась в расплавленном состоянии и литосфера проходила панмагматическую стадию эволюции. Это объясняет практически полное отсутствие в земной коре и в мантии пород с изотопным возрастом более 3,8 – 4,0 млрд. лет, тогда как Земля и Солнце начали формироваться около 4,6 миллиардов лет назад. Вследствие более позднего остывания максимальный возраст мантийных ксенолитов из кимберлитов (около 2,4 млрд. лет, рис. 1) значительно меньше, чем раннедокембрийских комплексов. Высокотемпературные гнейсы слагают кристаллическое основание континентов. Магматическое происхождение объясняет выдержанность их минеральных парагенезисов и температуры кристаллизации на всей Земле и отсутствие их постепенных переходов в другие по условиям образования комплексы [6]. Примерно с 3,8 миллиарда лет назад на них начинали формироваться низкотемпературные зеленокаменные пояса, метаморфизованные под влиянием еще горячего основания и не имеющие постепенных переходов в гнейсовые комплексы. Они иллюстрируют существование зеленокаменной стадии эволюции кристаллического фундамента древних платформ.

3. Генезис магм

Обычно предполагается, что магмы образуются в результате отделения выплавок в подплавленных глубинных породах. Степень плавления принимается небольшой (менее 15 %), так как при большой степени состав выплавок не соответствует составу природных магм. Однако при небольшой степени подплавления вязкость пород составляет 10^{21} - 10^{22} пуаз. При такой огромной вязкости за всю историю Земли выплавки способны всплыть всего на доли миллиметра, что не приведет к магнаобразованию [3]. Это подтверждается автохтонностью анатектического жильного материала в огромных полях мигматитов на древних щитах даже при содержании его в 40 %.

При горячей аккреции Земли главной причиной магнаобразования является импактное плавление падавшего вещества при аккреции и последующее фракционирование возникшего магматического океана. При аккреции мантии образовавшиеся на дне раннего магматического океана импактные углубления заполнялись преимущественно основными его придонными расплавами. Их компрессионное затвердевание привело к формированию тел эклогитов.

Последующее декомпрессионное переплавление их при всплывании обусловило быстрое формирование огромных объемов магм траппов (рис. 3). Присутствие ксенолитов земного ядра в наиболее ранних импактных углублениях объясняет присутствие крупных (до десятков тонн) тел никелистого железа в некоторых траппах.

Вязкость магматических расплавов в миллиарды раз меньше, чем слабо подплавленных пород. Примерно во столько же раз была выше скорость отделения остаточных расплавов в кристаллизовавшихся магмах. Вследствие существования слоистости в магматическом океане отсутствовала единая обширная тепловая конвекция, поэтому он длительно остывал и кристаллизовался сверху вниз. Всплывание расплавов из верхнего кислого слоя магматического океана обусловило образование огромного количества раннедокембрийских гранитоидов на древних щитах (рис. 3).

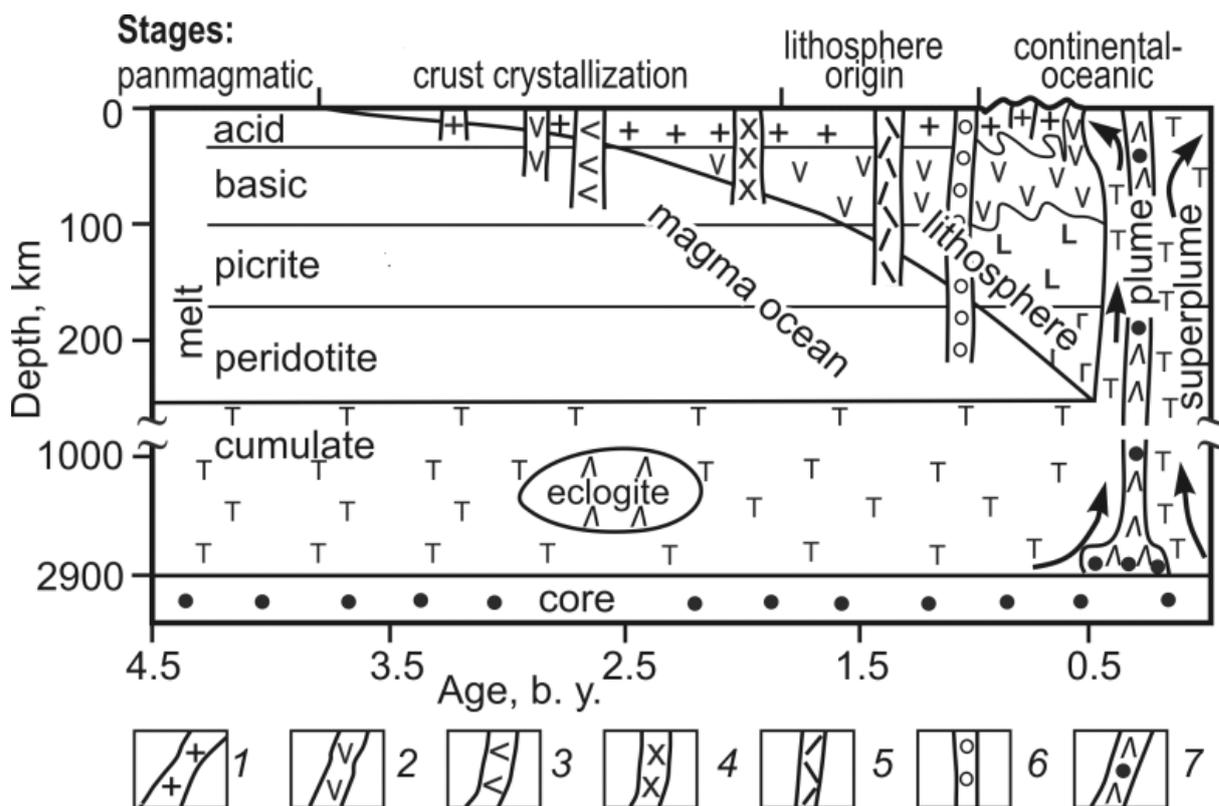


Рисунок 3 – Эволюция геодинамических обстановок и магматизма (1 – 7) в истории Земли. Образование магм: 1 – кислых, 2 – средних, 3 – основных, 4 – анортозитсодержащих, 5 – карбонатитсодержащих, 6 – кимберлитовых, 7 – траппов с ксенолитами земного ядра.

Накопление расплавофильных компонентов в остаточных расплавах привело к повышенному их содержанию в наиболее поздних рапакиви. Вследствие постепенного опускания фронта кристаллизации магматического океана вслед за гранитоидами формировались средние и основные магматические породы. Процессы относительно малоглубинного фракционирования обусловили повышенное формирование в них автономных анортозитов. В дальнейшем кристаллизовались и фракционировали нижние пикритовый и перидотитовый слои магматического океана. Их остаточные расплавы образовали широко распространенные на древних платформах карбонатиты и кимберлиты. Формирование в самом нижнем наиболее поздно затвердевавшем перидотитовом слое магматического океана обусловило более молодой изотонный возраст кимберлитов (в среднем 236 млн. лет) по сравнению с карбонатитами (688 млн. лет) и другими магматическими породами (рис. 1). Большой объем пикритового слоя и поэтому огромные масштабы накопления расплавофильных компонентов в его остаточных расплавах привели к уникально высоким концентрациям в карбонатитах редкоземельных и других элементов и к очень высокой рудоносности этих пород. Увеличение концентрации

свободного углерода в остаточных кимберлитовых расплавах привело к кристаллизации в них алмазов. Накопление многовалентных элементов (кремния, алюминия и других) в остаточных расплавах при фракционировании обусловило резкое увеличение их вязкости и смену кристаллизации октаэдров на рост ромбододекаэдров и кубов.

Декомпрессионное и фрикционное переплавление дифференциатов магматического океана в океанических областях и в зонах тектонических деформаций приводят к образованию океанических, субдукционных и коллизионных магм.

4. Заключение

Таким образом, учет полученных многочисленных доказательств горячей гетерогенной аккреции Земли приводит к принципиально новому решению глобальных генетических проблем петрологии и объясняет огромное количество имеющихся эмпирических данных. Учет полученных результатов открывает широкие перспективы для прогресса в различных областях геологической науки.

5. Литература

- [1] Schmidt O.Yu. Origin of the Earth and planets. – М.: Ed. USSR Academy of Sciences, 1962. – 132 p.
- [2] Ringwood A.E. Origin of the Earth Moon. – М.: Nedra, 1982. – 294 p.
- [3] Shkodzinsky V.S. Genesis of the lithosphere and diamonds // Model of hot heterogeneous accretion of the Earth. – Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2015. – 687 p.
- [4] Harris P.G., Tozer D.C. Fractionation of iron in the Solar system // Nature. – 1967. – V. 215. – N 5109. – P. 1449–1451.
- [5] O’Neil H.S. Oxygen fugacity and siderophile elements in the mantle: implications for the origin of the Earth // Meteoritics. – 1990. – V. 25. – N 4. – P. 395.
- [6] Salop L.N. Geological development of the Earth in the Precambrian. – L.: Nedra, 1982. – 334 p.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ АЛМАЗОВ В КИМБЕРЛИТОВЫХ МАГМАХ

Владимир Шкодзинский

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

GENESIS OF DIAMONDS IN KIMBERLITE MAGMAS

Vladimir Shkodzinskiy

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

Annotation. According to the data on hot heterogeneous accretion of the Earth, the kimberlite magmas were formed from residual melts of bottom peridotite layer of magma ocean. Diamonds were crystallized as result of increase of concentration carb in melt during fractionation. Increase concentration of Si, Al were caused crystallization of rombododecahedrons and cubes.

1. Введение

Полученные в последние десятилетия многочисленные доказательства горячей гетерогенной аккреции Земли [1, 2] приводят к принципиально новому решению генетических проблем петрологии и происхождения кимберлитов и алмазов. Они объясняют все имеющиеся эмпирические данные.

2. Генезис кимберлитовых магм

По этим результатам кимберлитовые магмы возникли из остаточных расплавов придонного перидотитового слоя магматического океана в результате его высокобарического (более 2,5 ГПа) фракционирования после завершения аккреции. Глубинное положение этого слоя и поэтому позднее остывание обусловило наиболее молодой возраст кимберлитов на древних платформах – в среднем 236 миллионов лет, тогда как возраст карбонатитов, формировавшихся в выше расположенном пикритовом слое, равен в среднем 688 млн. лет. Всеземное распространение глобального магматического океана объясняет присутствие кимберлитов на всех изученных древних платформах. Высокое содержание в кимберлитах, накапливавшихся в остаточных расплавах легких редких земель (до тысячи хондритовых норм) свидетельствует, что остаточные расплавы приобрели кимберлитовый состав после кристаллизации перидотитового слоя более, чем на 99,9 %. Поэтому содержание этих расплавов в придонном слое магматического океана было очень небольшим (десятые доли процента). Это объясняет, казалось бы, удивительный очень небольшой объем кимберлитовых тел (обычно меньше кубического километра) даже в самых крупных их скоплениях. Раздвижение континентальной литосферы, содержавшей дифференциаты магматического океана, при образовании океанических областей объясняет отсутствие в них кимберлитов.

Рассчитанные количественные модели природных магм [2] выявили существование в них малоизвестного и обычно не учитывающегося явления – декомпрессионного затвердевания наиболее низкотемпературных магм после вскипания на малоглубинной стадии подъема. Вследствие остаточно-магматического происхождения кимберлитовые магмы были относительно низкотемпературными и содержали значительное количество (десятки процентов) летучих компонентов. Это приводило к их вскипанию при подъеме и к затвердеванию расплава (путем остеклования и кристаллизации). Химически активное стекло замещалось низкотемпературными минералами, что объясняет их высокое содержание в кимберлитах. Глубина вскипания и затвердевания уменьшалась с уменьшением содержания труднорастворимой в расплаве углекислоты. Быстрое декомпрессионное затвердевание обусловило консервацию высокого давления выделившихся газов и при дальнейшем подъеме взрывную дезинтеграцию верхних частей кимберлитовых колонн и вмещающих пород под

влиянием избыточного давления захороненной газовой фазы. Мощность взрывов в тысячи раз превосходила атомные взрывы за счет значительного объема взрывающегося вещества [2]. Это объясняет формирование кимберлитовыми магмами протяженных трубок взрыва и разнообразных брекчий, отсутствие кимберлитовых лав даже в самых крупных кимберлитовых полях и гравитационной отсадки в трубках высокоплотных алмаза, граната и мантийных ксенолитов.

3. Происхождение алмазов

Диссоциация углеродсодержащих соединений привела к присутствию в расплаве небольшого количества свободного углерода. Незначительное его содержание объясняет небольшое количество алмазов (обычно меньше грамма на тонну) даже в самых богатых кимберлитах. В случае иногда предполагаемого привноса в мантию углерода погружавшимися в зонах субдукции океаническими осадками или метасоматическими процессами количество алмаза в кимберлитах было бы в сотни – тысячи раз большим. Вследствие почти неограниченной растворимости воды в расплаве при высоком давлении в высокотемпературной мантии не может существовать и перемещаться богатая водой флюидная фаза. Это согласуется с преимущественно углеводородным составом флюидных включений, обнаруженных в алмазах. Изредка встречающиеся богатые водой включения являются поздними. Алмазы начали кристаллизоваться более 3 миллиардов лет назад вследствие увеличения концентрации свободного углерода, поскольку он почти не входил в состав кристаллизовавшихся породообразующих минералов, а содержание расплава при кристаллизации магм уменьшалось. В мантийных плюмах, вследствие увеличения количества расплава при процессах декомпрессионного плавления при подъеме, концентрация углерода снижалась. Это объясняет обычно отсутствие алмазов в трапах, несмотря на огромное давление на ранней стадии эволюции их вещества. При замедлении подъема в глубинных условиях часть их магм остывала и кристаллизовалась и в них начинали формироваться алмазы. Но длительность этих процессов алмазообразования (видимо, тысячи лет) была несопоставимо меньше, чем миллиарды лет в магматическом океане. Это объясняет незначительную массу аксессуарных алмазов (сотые – десятые доли миллиграмма), иногда встречающихся в щелочных базитах. Вследствие перидотитового состава ранних расплавов вязкость их была очень небольшой – первые пуазы. Это обусловило большую скорость диффузии в них химических компонентов. Поэтому атомы углерода успевали достигать торцов слоев роста на гранях ранних кристаллов алмаза и присоединялись к ним, поскольку здесь обнажалось наибольшее суммарное количество свободных ковалентных связей (в торце слоя плюс на грани кристалла). Вследствие этого путем послойного тангенциального роста формировались идеальные острыебренные октаэдры. Отсутствие еще радиального роста обусловило редкость скульптур и зеркальную гладкость граней ранних октаэдров. Такое происхождение октаэдров подтверждается существованием обратной корреляции доли их среди алмазов с количеством в кимберлитах кремнекислоты (рис. 1), накапливавшейся при фракционировании, приводившей к резкому возрастанию вязкости остаточных расплавов и к прекращению кристаллизации октаэдров. Судя по возрасту перидотитовых ксенолитов в кимберлитах и включений в алмазах, октаэдры кристаллизовались в среднем от примерно 3,5 до 1,5 миллиардов лет назад. Еще высокая температура раннего магматического океана обусловила медленное остывание его глубинных частей, длительное образование алмазов-гигантов и их преимущественно октаэдрическую морфологию.

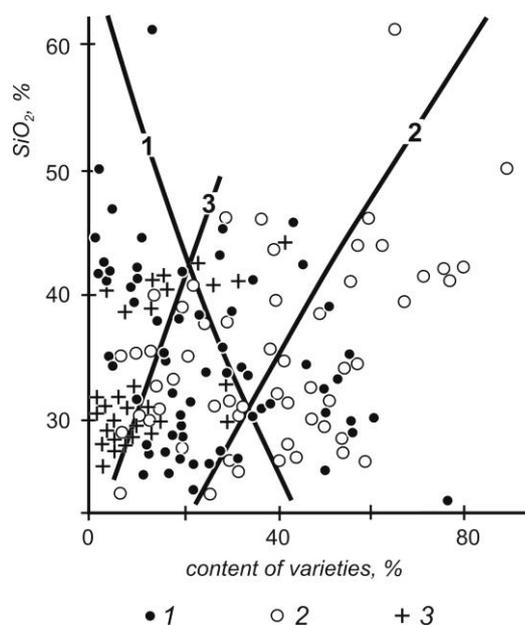


Рисунок 1 – Обратная корреляция содержания кремнекислоты в кимберлитах с долей октаэдров среди алмазов (линия 1) и прямая корреляция с долей ромбододекаэдров (2) и кубов (3) [2].

Возрастание концентрации кремния, алюминия, титана и других многовалентных элементов при магматическом фракционировании приводило к увеличению вязкости остаточных расплавов в тысячи раз. Примерно во столько же раз уменьшалась скорость диффузии углерода и увеличивалась степень пересыщения им расплава. Последнее обусловило образование новых центров кристаллизации и появление новых слоев роста. Постепенное уменьшение площади образующихся слоев роста вследствие падения скорости диффузии привело к возникновению выпуклых граней и округлых кристаллов путем антискелетного роста. Такой генезис подтверждается существованием прямой корреляции доли округлых кристаллов алмаза с содержанием кремнекислоты в кимберлитах (рис. 2).

Содержание углекислоты в среднем уменьшается с ростом количества кремнекислоты в магмах. Бедные углекислотой магмы декомпрессионно затвердевали и взрывались на значительно меньшей глубине, чем богатые. Вследствие повышенной вязкости их расплавов выделявшиеся при вскипании летучие компоненты почти не объединялись и оставались относительно равномерно распределенными в затвердевавшем веществе в виде многочисленных микропузырьков. При приповерхностных взрывах это приводило к очень тонкому дроблению, распылению и к рассеиванию затвердевшего вещества и содержащихся в нем алмазов на очень большой площади. Данное явление объясняет огромную протяженность (около 500 км) и незначительную мощность (менее 0,5 м) слоя карнийских туффзитов с преимущественно округлыми алмазами и додекаэдроидами в приустьевой части р. Лены [5]. Мелкие силикатные частицы быстро выветривались и частично выносились. Это приводило к образованию россыпей с крупными округлыми алмазами, широко распространенных в Африке и на других континентах. В богатых углекислотой менее вязких кимберлитовых магмах дробление их декомпрессионно затвердевших разностей происходило в трубках на значительной глубине под перекрывающими породами. Поэтому оно было более грубым, что объясняет значительную крупность обломков в кимберлитовых трубках. При приповерхностных взрывах, алмазосодержащие породы сильно распылялись и коренные источники алмазов не возникали или были очень небольшими.

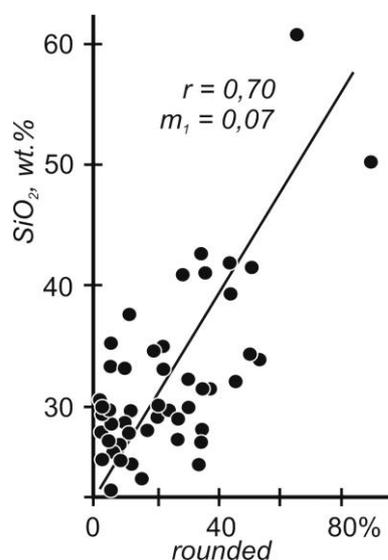


Рисунок 2 – Соотношение содержаний кремнекислоты и доли округлых алмазов в кимберлитах по данным [3, 4]. r и m_1 – коэффициент корреляции и его ошибка.

Поздние кимберлитовые остаточные расплавы сформировались при степени кристаллизации перидотитового слоя более чем на 99,9 %. При такой высокой степени кристаллизации содержание летучих компонентов в расплавах достигало десятков процентов. Поэтому они иногда формировали небольшое количество самостоятельной флюидной фазы. Вследствие в тысячи раз более низкой вязкости флюида скорость диффузии углерода в нем была несоизмеримо выше, чем в расплаве. Это обусловило быстрое зарождение множества кристаллов алмаза во флюидных выделениях, их небольшой размер и объясняет присутствие мелкозернистых алмазных агрегатов (борта, карбонадо, балласов) в кимберлитах. Преимущественно октаэдрическая форма кристаллов алмаза в агрегатах подтверждает их рост в маловязком флюиде. Позднее образование агрегатов согласуется с иногда встречающимся их нарастанием на кристаллы алмаза. Наличие пустот в агрегатах, прямая корреляция доли агрегатов с содержанием воды и углекислоты в кимберлитах и с величиной потерь при прокаливании (рис. 3), а также самое высокое содержание примесей подтверждают рассматриваемый механизм образования алмазных агрегатов.

В якутских кимберлитах содержится в среднем на 9 % меньше кремнекислоты, чем в кимберлитах других регионов. Эта разница определила главные различия их алмазов. Небольшое содержание кремнекислоты обусловило низкую вязкость кимберлитовых расплавов в Западной Якутии, что является причиной высокой доли октаэдров среди алмазов. В наиболее продуктивных трубках Мир и Интернациональная она составляет соответственно 61,6 % и 52,5 %. В трубках Африки эта доля равна в среднем 20,2 %, Канады – 40,1 %, Австралии – 6 %, в россыпях Вишерского Урала – 8 % [4]. Характерное для бедных кремнекислотой перидотитов повышенное первичное содержание углерода является причиной примерно в два раза большего среднего содержания алмазов в продуктивных трубках Якутии. Повышенное начальное содержание углерода обусловило образование большого количества зародышей кристаллов алмаза. Это привело к меньшему размеру возникших алмазов и объясняет примерно в 4 раза меньшую среднюю массу алмазов-гигантов якутских трубок по сравнению с африканскими.

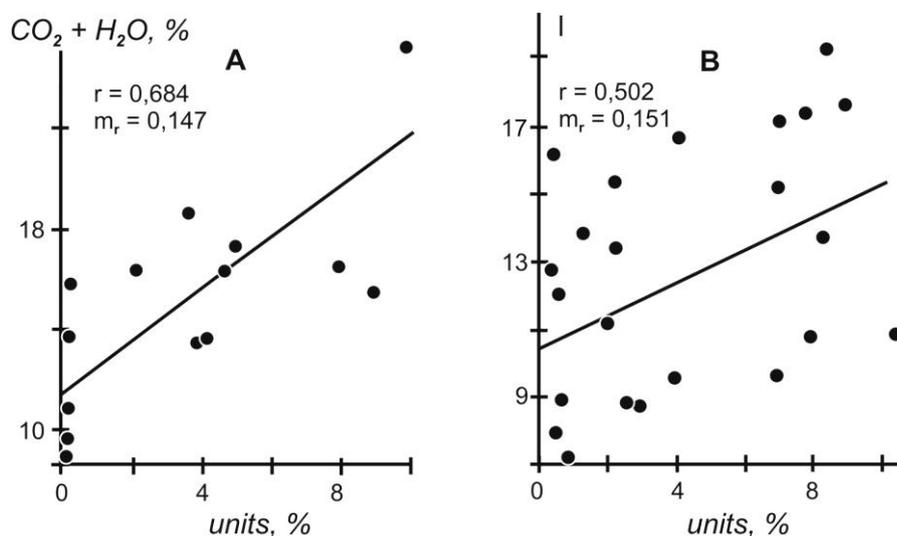


Рисунок 3 – Зависимость доли агрегатов среди алмазов от содержания воды и углекислоты (А) и потерь при прокаливании, I, (В) в кимберлитах [3, 4].

4. Заключение

Таким образом, учет данных о горячей гетерогенной аккреции Земли позволяет объяснить многочисленные особенности морфологии кристаллов алмазов в кимберлитах и их эволюцию. Октаэдрические кристаллы образовались путем послойного тангенциального роста на самой ранней стадии фракционирования придонных перидотитовых частей магматического океана вследствие их очень низкой вязкости. Увеличение вязкости остаточного расплава по мере фракционирования обусловило смену послойного роста радиальным и формирование сначала переходных по морфологии кристаллов, затем ромбододекаэдрических и кубических. В возникших в последних остаточных расплавах флюидных выделениях образовались мелкозернистые алмазные агрегаты. Округлые алмазы являются результатом антискелетного роста под влиянием уменьшения скорости диффузии углерода при возрастании вязкости расплавов. Полученные генетические выводы хорошо согласуются с эмпирическими данными и объясняют их. Главными двигателями ранних глобальных эндогенных геологических процессов являются кристаллизация и фракционирование магматического океана, а не гравитационная дифференциация преимущественно твердофазной мантии. Это обусловлено в триллионы раз меньшей вязкостью магматического океана.

5. Литература

- [1] Schmidt O.Yu. Origin of the Earth and planets. – М.: Ed. USSR Academy of Sciences, 1962. – 132 p.
- [2] Shkodzinsky V.S. Genesis of the lithosphere and diamonds. Model of hot heterogeneous accretion of the Earth. – Saarbrucken: Palmarium Academic Publishing, 2015. – 687 p.
- [3] Zinchuk N.N., Koptil V.I. Typomorphism of diamonds of the Siberian platform. – М.: Nedra, 2003. – 603 p.
- [4] Argunov K.P. Diamonds of Yakutia. – Novosibirsk: Ed. SB RAS, 2005. – 402 p.
- [5] Grakhanov S.A., Proskurin V.F., Petrov V.V., Sobolev N.V. Diamond-bearing tuffaceous-sedimentary rocks of the Triassic of the Arctic zone of the Siberian Platform // Geology and Geophysics. – 2022. – № 1. – P. 556-578. – URL: DOI 10.35372/GiG2021195.

УДК 502.171(06)+330.15(06)

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СТРАТЕГИИ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ В УСЛОВИЯХ ПРОМЫШЛЕННОГО ОСВОЕНИЯ РЕГИОНОВ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Алёна Абишева, Кирилл Милушкин, Сабир Мустафин
ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», 450076, Россия, Республика
Башкортостан, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32

ENGINEERING AND GEOLOGICAL ASPECTS OF THE STRATEGY OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN THE CONDITIONS OF INDUSTRIAL DEVELOPMENT OF THE REGIONS OF THE ARCTIC ZONE OF THE RUSSIAN FEDERATION

Alena Abisheva, Kirill Milushkin, Sabir Mustafin
Ufa University of Science and Technology,
32, Zaki Validi str., Ufa, Republic of Bashkortostan, 450076, Russia

Annotation. Engineering-geological aspects of the development of industrial regions of the Arctic zone of the Russian Federation (AZRF) are considered. Regional features of the intensity and scale of the manifestation of dangerous exogenous geological processes in the heterogeneous geological environment of permafrost rocks (PFR) of the cryolithozone are characterized. Cryogenic (thermokarst, solifluction, heaving, frost cracking, subsidence), gravitational (landslides, landslides, screes), karst (sulphate and carbonate types) dangerous exogenous geological processes destructive for engineering structures are considered. Examples of emergency situations caused by dangerous exogenous geological processes caused by the degradation of permafrost and man-made impact on the geological environment are given.

1. Введение

Многолетнемёрзлые породы (ММП) криолитозоны Земли занимают площадь порядка 36 млн км², что составляет около 24 % поверхности суши; криолитозона покрывает около 70 % территории Российской Федерации (РФ), 50 % – Канады, 60 % – шт. Аляски (США) и др.

Криолитозона развита на всей территории континентальной части Арктики. На рисунке 1 показано расположение точек наблюдения глобальной сети мониторинга температуры мерзлоты, включая объекты РФ, в рамках проекта Thermal State of Permafrost в Северном полушарии [1].

Арктическая зона РФ (АЗРФ) занимает площадь более 9 млн. км², из которых около 6,7 млн. км² приходится на водное пространство, что составляет 45% площади Северного Ледовитого океана. Площадь арктического сектора континентального шельфа составляет 6,1 млн. км² (41% всей акватории РФ); подо льдом скрыто 5,1 млн. км².

Карта развития криогенных процессов является основой инженерно-геокриологического районирования территории АЗРФ (рисунок 2).

Эффективность освоения минерально-сырьевых ресурсов Арктической зоны РФ (АЗРФ) определяется специфическими инженерно-геологическими условиями криолитозоны, динамично меняющейся в условиях глобального потепления и растущей техногенной нагрузки. В АЗРФ сосредоточен природно-ресурсный потенциал, стоимость которого оценивается в несколько десятков триллионов долларов США, а также научно-производственный и

технологический потенциал, способные в долгосрочной перспективе обеспечить устойчивое социально-экономическое и инновационное развитие РФ в целом.

В АЗРФ проживает 2,5 млн. человек или более 50% всего населения арктических стран. В АЗРФ создаётся 12% ВВП и производится порядка 30% экспорта РФ. По данным Роснедр, в АЗРФ в 2020 г. добывалось 95–100% титана, циркония, редкоземельных металлов, фосфоритовой руды от объема добычи Российской Федерации. Объем добычи природного газа составил 538 млрд м³ (>85% от добычи РФ).

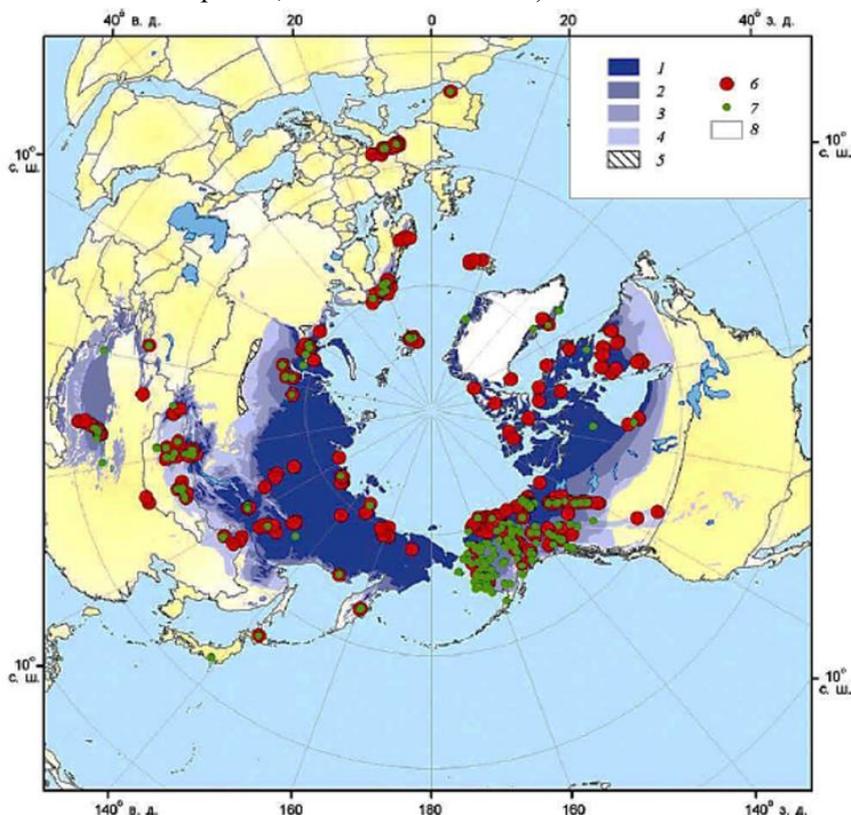


Рисунок 1 –
Расположение точек наблюдения, включенных в глобальную сеть мониторинга температуры мерзлоты в рамках проекта Thermal State of Permafrost в Северном полушарии [1]

Мерзлота:
сплошная (1),
прерывистая (2),
островная (3),
редкоостровная (4),
реликтовая (5).
Скважины:
глубокая (6),
мелкая (7),
лёд (8) [1].

2. Природа, масштабы и геолого-экологические риски опасных экзогенных геологических процессов трансформации геологической среды в условиях криолитозоны Арктики.

Проблемой являются масштабные нарушения недр и экосистемы в целом, связанные с развитием добычи, транспорта и переработки минерального сырья (карьеры, рудники, отвалы, хвостохранилища, нефтепромыслы, магистральные трубопроводы и др.), формирующие техногенный ландшафт регионов недропользования АЗРФ. Изучение состава, строения, свойств и особенностей агрегатного состояния ММП, динамики развития криолитозоны является актуальным. Развитие подземных льдов может составлять до 90 % объёма толщ ММП.

Анализ инженерно-геологических аспектов устойчивого промышленного освоения регионов Арктической зоны РФ проведён с использованием актуальной информации ГИС-Атласа «Недра России» - базового национального геолого-картографического ресурса [3].

Экзогенные геологические процессы на территории Чукотского автономного округа (ЧАО) в основном представлены криогенными комплексами, распространёнными повсеместно. Широко развивается морозобойное растрескивание и формирование полигонально-жильных структур.

Термокарстовые озера развиты на всех элементах рельефа. Термокарсту сопутствуют овраги и оползни, поражающие полотно автодорог, выводящие из эксплуатации земли населенных пунктов, создающие угрозу устойчивости зданий и инженерных сооружений. Многолетнее, сезонное пучения развитые в низменностях и долинах рек негативно воздействуют на линейные инженерные сооружения. Солифлюкция развитая на склонах крутизной от 2-3 до 20 градусов создаёт риски для линейных сооружений и объектов с неглубоким заложением

фундаментов; термоэрозия проявляется в виде оврагов, канав, промоин, рытвин и деструктивно влияет на здания и сооружения ЧАО [4].



Рисунок 2 – Карта мерзлотных процессов в почвах АЗРФ [2].

На территории Республики Саха (Якутия) (РС(Я)) развиваются обвально-осыпные процессы, карст, термокарст, процесс подтопления и криогенное пучение. Обвально-осыпные процессы распространены в горных районах, районах сопок, на обнаженных крутых склонах, верховых откосах федеральных автодорог «Лена» и «Колыма». Термокарст, развит в виде ям, провалов, котловин и создаёт риски для объектов магистрального водоснабжения и автомобильных магистралей. Проявляющийся в весенний период в связи с интенсивным снеготаянием процесс подтопления развит в населенных пунктах, в долинах крупных рек (Лена, Алдан, Индигирка и т.д.).

На территории г. Якутска термокарст проявляется в виде просадок земной поверхности при протаивании ММП и подземного льда. Предлагается комплекс профилактических защитных мероприятий по снижению рисков проявления опасных экзогенных инженерно-геологических криогенных и гравитационных процессов. 20 января 2010 года в результате механического разрушения трубы отвода от нефтепровода "Восточная Сибирь - Тихий океан" (ВСТО) ковшом экскаватора на 1351-ом километре ВСТО между Талаканом и Олекминском в грунт вытекло от 300 до 500 м³ нефти на площади 20 тысяч м². Ущерб окружающей среде оказался ниже ожидаемого из-за низкой температуры (-40 °С) вязкая нефть, не проникла в мерзлую почву и не растеклась [5].

В северной арктической части территории Красноярского края, развиты деструктивные для промышленных, гражданских объектов экзогенные геологические типичные для криолитозоны процессы: термокарст, солифлюкция, криогенное пучение, курумообразование и др. В горных и предгорных районах, развит процесс криогенного выветривания, на склонах – курумообразование (мощность курумов от 1,5 до 6 м, скорость перемещения грубообломочного материала - 3-4 см/год).

Термокарст развит на участках развития ММП и приурочен к днищам долин, к плоским междуречьям, пластовым интрузиям трапов и образует термокарстовые озера и воронки.

29 мая 2020 года на ТЭЦ-3, принадлежащей дочерней компании ПАО «ГМК „Норильский никель“», в результате термокарстовой просадки фундамента произошло разрушение резервуара и разлив более 21 тыс. т дизельного топлива; ущерб окружающей среде оценён в 148 млрд руб. [6].

Спектр опасных экзогенных инженерно-геологических процессов, проявленных на территории Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) весьма широк и представлен: комплексом криогенных процессов (термокарст, термоэрозия и термоабразия, криогенное пучение, криогенное растрескивание, солифлюкция), подтоплением территории (включая техногенное), овражной эрозией, суффозией, эоловыми процессами. Интенсивность и масштабы проявления криогенных процессов на территории ЯНАО определяют: температура ММП в верхней части разреза и мощность сезонно-талого слоя. Согласно данным Института Криосферы Земли за последние 40 лет граница между южной и северной лесотундрой в Западной Сибири смещается на север со скоростью примерно 1 км/год. По результатам наблюдений на геокриологическом полигоне Марре-Сале (западный Ямал) прогнозируется снижение несущей способности свайных оснований, заложенных на глубину 6 м, на 20-25%, т.к. на этой глубине среднегодовая температура ММП повысилась более чем на 2°C. Области максимального снижения несущей способности захватывают основные традиционные центры газовой промышленности: полоса по линии Салехард – Надым – Пангоды – Новый Уренгой и далее на Норильск; полоса по линии Белоярский – Казым – Тарко-Сале. Эти сооружения, построенные в последней трети XX в., находятся в аварийном или предаварийном состоянии. Недопустимые деформации у 50% зданий и сооружений в криолитозоне ЯНАО [7].

На территории Ненецкого автономного округа (НАО) развиты: криогенные (пораженность ими составляет 30-50% территории), гравитационные (обвалы, осыпи, оползни) и эрозионные процессы, а также дефляция, эоловая аккумуляция и подтопление. Техногенная трансформация геологической среды криолитозоны обусловлена масштабными и продолжительными процессами освоения углеводородного сырья Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. В техногенно-нарушенных условиях природная активизация криогенных процессов усиливается за счёт влияния антропогенных факторов, которые нередко, обусловлены нарушениями или несоблюдением технологических схем строительства и эксплуатации инженерных сооружений. Примерами таких районов служат разведываемые и эксплуатируемые месторождения углеводородов Харьягинское, им. Титова и им. Требса, Василковское ГКМ и др. В пределах трассы нефтепровода «месторождение им. А. Титова – месторождение им. Р. Требса» проявляются дефляция, нивация, русловые и склоновые процессы, формируются талики с заглублением кровли ММП. По результатам наблюдений за осадками и деформациями свайного основания трубопровода экспортной нефти и нефтепровода в зоне развития термокарста на площади Харьягинского месторождения зафиксировано, что вертикальное перемещение деформационных марок на некоторых опорах превышает допустимое значение (100 мм) от первого цикла. Опоры трубопровода имеют критическую величину просадки.

Распространены криогенные процессы; карст (г. Ухта), подтопление территории [8].

На территории Республики Коми криолитозона подвержена деградации, развиты: пучение, термокарст, солифлюкция и термоэрозия. Результаты наблюдений на Воркутинском опорном федеральном мерзлотно-гидрогеологическом полигоне свидетельствуют о сохранении тенденции повышения температуры криолитозоны в сравнении со среднемноголетними показателями. Величины термокарстового проседания земной поверхности достигают 1-3 см; прогнозируется сохранение этого процесса в условиях глобального потепления климата. Термокарст проявляется в проседании отсыпки газопровода Бованенково-Ухта, и как следствие образовании зон подтопления на его участке в 18 км. от г. Воркута; в городе проявлены осадка фундамента, и деформация наземной части зданий в виде трещин. Воздействия оползневой процесса ведут к разрушению склоноукрепительных бетонных конструкций под ж/д мостом через реку Сейда [9].

На территории Архангельской области активно развиваются, карст гравитационно-эрозионные процессы и овражная эрозия. В меньшей степени развиты карстово-суффозионные и эоловые

процессы. Незначительно развиты криогенные процессы на островах Белого моря и его побережье. В тундровой зоне на оголённых вершинах и склонах холмов развиваются эоловые процессы; дефляционные формы представлены воронками, ложбинами, овражками, котловинами, долинами. Карстовый процесс представлен сульфатным и карбонатным типами, развит в толщах пермских и каменноугольных пород, развитых полосой протяжённостью 600 км, шириной 100-200 км. Сульфатный подземный тип карста развит на меньшей площади, но более интенсивно и разнообразно. Гравитационно-эрозионные процессы (оползни, обвалы, осыпи и др.) развиты на крутых склонах бортов речных долин, оврагов, балок, карстовых логов и обусловлены действиями силы тяжести, выветривания, переувлажнения пород, подмыва, Овражная эрозия формирует овражные долины длиной до 450 м и шириной до 100 м [4].

Ведущими экзогенными геологическими процессами для территории Республики Карелия являются оползневые и осыпные процессы, оврагообразование, эоловые процессы и подтопление. С гравитационно-эрозионной и гравитационно-абразионной деятельностью связаны оползневые и осыпные процессы. Эоловые процессы получили развитие на северо-восточных берегах Онежского и Ладожского озёр, где распространены рыхлые песчаные отложения и преобладают ветры западного, юго-западного и южного направлений [8].

На территории Мурманской области развиваются подтопление, овражная эрозия, гравитационные процессы (оползни, осыпи, обвалы). Плоскостная эрозия развита вдоль откосов железных и автодорог на недостаточно укреплённых насыпных песчано-гравийных откосах вдоль федеральной трассы Р-21 Кола. Гравитационные процессы снежные лавины, осыпи на склонах безлесых возвышенностей сопутствуют абразии и эрозии. Наиболее активны обвалы и осыпи в зонах нарушения природной устойчивости склонов, инженерной деятельностью человека (дорога Кола Р-21, участки бывших и действующих карьеров добычи руд).

Далее приводятся результаты изысканий на объекте, расположенном на п-ове Гыдан (ЯНАО), в пределах территории, пока ещё слабо изученной комплексом инженерно-геологических методов.

В физико-географическом отношении район расположен на крайнем севере Западно-Сибирской равнины в подзоне арктической тундры внутри границ морской бореальной трансгрессии. Криолитозона сливающегося типа распространена повсеместно. В геологическом строении района изысканий до исследуемой глубины 30,0 м развиты верхнеплейстоценовые морские и лагунно-морские казанцевские отложения (mI_{QIII_1}) и флювиогляциальные, ледниково-озерные отложения (f,lg_{QIII_2}); встречаются современные аллювиальные (a_{QIV}) и озерно-болотные (lb_{QIV}) отложения.

Мощность многолетнемерзлых пород (ММП) изменяется от десятков до 150-200 м. Подрусловые талики встречены на крупных реках.

По результатам бурения и лабораторных исследований физических свойств грунтов, определенных лабораторными методами, с учетом данных о геологическом строении и литологических особенностях в разрезе выделены и охарактеризованы 45 инженерно-геологических элементов.

На участке изысканий распространены засоленные грунты в основном, расположенные в нижней части разреза; участками засоленных грунтов выходят на поверхность. Мощность отложений 1 - 38 м; степень засоления от слабой до средней; тип хлоридно-натриевый.

Степень агрессивного воздействия сульфатов в грунтах на бетонные конструкции для бетона марки по водопроницаемости W/4 - W/20 - неагрессивная. Степень агрессивного воздействия грунта на арматуру железобетонных конструкций – неагрессивная, степень агрессивного воздействия грунтов на металлические конструкции ниже уровня подземных вод – слабоагрессивная, выше уровня подземных вод - слабоагрессивная.

Коррозионная агрессивность грунтов по отношению к углеродистой и низколегированной стали по результатам лабораторных испытаний (по удельному электрическому сопротивлению и плотности катодного тока) средняя для глинистых грунтов и низкая для песчаных грунтов. По результатам полевых геофизических исследований коррозионная агрессивность грунтов по

отношению к углеродистой и низколегированной стали низкая.

К специфическим грунтам на исследуемой территории относятся органические, органоминеральные и засоленные грунты.

В гидрогеологическом отношении инженерные сооружения находятся во взаимодействии с водами первого гидрогеологического комплекса – надмерзлотными водами сезонноталого слоя (далее - СТС) и несквозных таликов, поверхностных водотоков.

Надмерзлотные воды на период изысканий не встречены, они возникают в теплый период года (июнь) и существуют до полного промерзания слоя сезонного оттаивания (декабрь).

На период изысканий встречены грунтовые воды подрусовых несквозных таликов. Водовмещающими являются пески водонасыщенные, водоупором служат нижезалегающие (0,0-1,5 м) многолетнемерзлые грунты. Грунтовые воды безнапорные, разгружаются в существующую гидросеть и гидравлически связаны с поверхностными водами.

Опасными геологическими процессами, осложняющими инженерно-геологическую обстановку района изысканий, являются: подтопление, морозное пучение грунтов в зоне сезонного промерзания-оттаивания, термоэрозия и термокарст, солифлюкция.

Инженерно-геологические условия оцениваются как сложные. На территории изысканий мощность некоторых литологических слоев резко изменяется, развито линзовидное залегание. Широко распространены специфические грунты и развиты опасные инженерно-геологические процессы.

Для снижения инженерно-геологических рисков строительства на территории проведённых изысканий в пределах п-ва Гыдан рекомендуется провести следующие мероприятия:

многолетнемерзлые грунты в качестве основания сооружений при строительстве и эксплуатации рекомендуется использовать по принципу I – с сохранением ММГ;

сохранение мохово-растительного слоя;

регулирование стока поверхностных вод с помощью вертикальной планировки территории, устройства системы поверхностного водоотвода, предотвращение инфильтрации воды в грунт и эрозионных процессов;

работы на склонах выполнять в зимний период. Выполнение работ в теплое время года допускается только после работ по стабилизации склона и обязательного проведения теплотехнического прогноза и расчетов общей и местной устойчивости склонов;

для стабилизации склонов наряду с инженерными сооружениями следует применять мероприятия по снижению температуры мерзлых грунтов и уменьшению глубины сезонного оттаивания, должен быть организован беспрепятственный сток поверхностных вод, исключено застаивание вод на бессточных участках, и попадание на склон вод с присклоновой территории. в процессе строительства, эксплуатации и ликвидации сооружений на склонах и присклоновой территории выполняется мониторинг устойчивости склонов и сооружений по проекту контроля поверхностных и глубинных перемещений грунта.

3. Выводы

Климатические условия территории обусловлены неравномерным поступлением в течение года солнечной радиации, атмосферной циркуляции и близостью холодного моря. Всё вышеизложенное позволяет рекомендовать для АЗРФ создание единой территориальной государственной системы геотехнического мониторинга за трансформацией состояния криолитозоны в условиях тенденций глобального потепления и растущих техногенных нагрузок. Разнообразие региональных инженерно-геологических условий геологической среды как источников рисков её техногенной трансформации, требует формирования и развития региональной сети инженерно-геологического мониторинга опасных экзогенных геологических процессов.

Инженерно-геологический мониторинг состояния криолитозоны АЗРФ как для традиционных территорий масштабного и длительного функционирования недропользования (Красноярский край, Мурманская область), так и регионов нового освоения выявляет климатические тренды, их количественные параметры, существенным образом осложняющие производственные

процессы добычи и транспорта минерального сырья, деструктивно влияющие на точечные, площадные, линейные ответственные инженерные промышленные объекты, жилые сооружения. Следует сформировать и целенаправленно развивать стратегию сотрудничества государства и природопользователей для обмена данными, совместного научного сопровождения разработок по изучению состояния криолитозоны АЗРФ, проектированию, строительству и эксплуатации ответственных инженерных сооружений на многолетнемерзлых грунтах [13].

4. Литература

- [1] Anisimov O. A., Anokhin Yu. A., Lavrov S. A., Malkova G. V. Methods for assessing the consequences of climate change for physical and biological systems. *Continent. permafrost.* – М.: Rosgidromet, 2012. – P. 301.
- [2] State report "On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2020". – М.: MPR RF, 2021. – P. 275-302.
- [3] Updated GIS packages of operational geological information (GIS-Atlas "Nedra of Russia". – St. Petersburg: VSEGEI, 2022.
- [4] Information on the state and prospects for the use of the mineral resource base of the Chukotka Autonomous Okrug as of 01/01/2021. Brief information on the state of exogenous geological processes. "Gidropetsgeologia". – 2021. – 6 p.
- [5] Information on the state and prospects for the use of the mineral resource base of the Republic of Sakha (Yakutia) as of 01/01/2021. Information about the state of exogenous geological processes. "Gidropetsgeologiya". – 2021 – 11 p.
- [6] Information on the state and prospects for the use of the mineral resource base of the Krasnoyarsk Territory as of 01/01/2021. Brief information about the state of exogenous geological processes. "Gidropetsgeologiya". – 2021 – 13 p.
- [7] Information on the state and prospects for the use of the mineral resource base of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug as of 01/01/2021. Brief information on the state of exogenous geological processes. "Gidropetsgeologiya". – 2021 – 12 p.
- [8] Information on the state and prospects for the use of the mineral resource base of the Nenets Autonomous Okrug as of 01.01.2021. Information about exogenous geological processes. "Gidropetsgeologia". – 2021 – 6 p.
- [9] Information on the state and prospects for the use of the mineral resource base of the Komi Republic as of 01/01/2021. Brief information about the state of exogenous geological processes. "Gidropetsgeologiya". – 2021 – 9 p.
- [10] Information on the state and prospects for the use of the mineral resource base of the Arkhangelsk region as of 01/01/2021. Brief information about the state of exogenous geological processes. "Gidropetsgeologiya". – 2021 – 8 p.
- [11] Information on the state and prospects for the use of the mineral resource base of the Republic of Karelia as of 01/01/2021. Brief information about the state of exogenous geological processes. "Gidropetsgeologiya". – 2021 – 12 p.
- [12] Information on the state and prospects for the use of the mineral resource base of the Murmansk region as of 01/01/2021. Brief information about the state of exogenous geological processes. "Gidropetsgeologiya". – 2021 – 12 p.
- [13] Mustafin S.K., Abisheva A.V., Milushkin K.S. Features of engineering-geological conditions of the geological environment of the territory of operation of oil and gas complexes in the Arctic // Oil and gas terminal. – Tyumen: Tyumen Industrial University, 2021. – P. 89-94.

ГОРИМОСТЬ ЛЕСОВ В ЯКУТИИ ЗА ПЕРИОД 1958-2022 ГГ

Михаил Васильев^{1,2}, Максим Тимофеев¹, Дьулус Сергин¹

1 ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова»,
677000, Россия, г. Якутск, ул. Белинского, 58

2 ФГБУН ФИЦ «ЯНЦ» «Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН», 677027, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 31,

FOREST FIRE IN YAKUTIA FOR THE PERIOD 1958-2022

Mikhail Vasiliev^{1,2}, Maxim Timofeev¹, Dulus Sergin¹

1 North-Eastern Federal University, 58, Belinsky str., Yakutsk, 677000, Russia
2 Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of SB RAS,
31, Lenin ave., Yakutsk, 677027, Russia

Annotation. The paper considers the general dynamics of forest fires in Yakutia for the period 1958-2022. The data of the «Yakutsk Aviation Forest Protection Base» and MODIS/Terra & Aqua were used. It is noted that in the second decade of the 21st century, the «Yakutsk Aviation Forest Protection Base» began to use Earth remote sensing data to detect forest fires. A number of factors of increasing forest fires after 2017 are described. Fourier spectral analysis, in view of various methods for determining forest fires, did not reveal reliable quasi-periodic oscillation in the burnt area.

1. Введение

Лесная экосистема в Якутии ежегодно страдает от пожаров по причинам природного и антропогенного фактора [1, 2], что в целом носит негативный характер. Деградация лесов ведет к радикальному изменению экосистемы пострадавшего региона. Происходит изменение активного, подверженного сезонному таянию и замерзанию, слоя почвы и нередко подстилающих пород и ее водного режима, локального круговорота углерода, видового разнообразия биоценоза и пр. В атмосферу выбрасывается огромное количество аэрозольных частиц, углекислого газа, окислов серы, азота и др.

Выявление причин возникновения и анализ динамики лесных пожаров необходимы для предотвращения экологических последствий. Выражено это в загрязнении атмосферы продуктами горения и их негативном влиянии на здоровье населения. Очаги горения лесного массива сопровождаются смогом (дым), который опасен не только для людей и животных, но и приводит к различным атмосферным эффектам. Загрязнение атмосферы частицами дымового аэрозоля, приводит к изменению прозрачности атмосферы, а также охлаждению или нагреву воздуха [3, 4].

В настоящей работе горимость лесов характеризуется показателями количества лесных пожаров и выгоревшей площади по данным ГБУ РС (Я) «Якутская база авиационной охраны лесов» («Авиалесоохрана»), а также количеством «пожарных» пикселей (термоточки – hotspots) по данным спектрорадиометра MODIS/Terra, Aqua [5].

2. Результаты исследований

Естественно, что в лесах пожароопасная обстановка возникает при жаркой и сухой погоде, но метеорологические условия не всегда являются достаточными для возгорания. Для возникновения лесного пожара необходимы такие условия как горючий материал (сухая масса растений в каких-либо ярусах лесной экосистемы) и источник огня (возгорания). Экологические факторы играют немаловажную роль, например, санитарное состояние и возраст древостоя, а также видовой состав. Лесной пожар, его вероятность возникновения и интенсивность зависят, кроме прочего, от орографии территории. Рельеф и его характеристики (крутизна склонов и ориентация) имеют большое значение в возникновении лесных пожаров,

так как крутизна склонов и экспозиция влияют на уровень увлажнения лесной подстилки и в целом на видовой состав. Кроме того, огонь может распространяться вверх по склону.

Для разных районов характерна пространственная динамика пожарной опасности (риск возникновения и распространения пожара) в лесах, которая зависит от таких факторов как структура и характер растительного покрова, количество источников загорания, густота дорожной и гидрологической сети и т.д. Фенологическое состояние растительности, посещаемость леса людьми и грозная активность являются факторами, которые медленно, но закономерно изменяются в течение пожароопасного сезона. В пределах одного периода сезона для небольшого района все факторы, кроме погоды, кажутся постоянными, поэтому динамика пожарной опасности определяется в основном динамикой погоды. Однако в разных районах и в разные периоды пожароопасного сезона связь между пожарной опасностью в лесах и погодой имеет различия, поскольку различаются комплексы остальных факторов (например, может преобладать грозная активность над антропогенным фактором).

Оценка степени пожароопасности лесов, зависящая от метеоусловий может быть определена с помощью индексов горимости, которые являются показателем пожарной опасности в лесу. Для оценки горимости леса в России чаще всего применяют индекс Нестерова, а за рубежом индекс засушливости KBDI (Keetch-Byram Drought Index). Индекс Нестерова применяется для вычисления комплексного показателя G пожарной опасности в лесу с помощью таких метеорологических параметров как: температура воздуха и точка росы ($^{\circ}\text{C}$) на 12 ч по местному времени; количество выпавших осадков (мм) за период с 12 ч предыдущего дня (осадки до 2,5 мм в сутки в расчет не принимаются). Недостатком индекса Нестерова является его резкое падение до нуля в сутки с суммой жидких осадков 2,5 или 3 мм (не принимается во внимание наличие горючих материалов, влажность напочвенного покрова, лесной подстилки и т.д.), поэтому не прекращаются попытки усовершенствовать комплексный показатель опасности возгорания. Применение местных шкал имеет большое практическое значение. Идея местных шкал наиболее глубоко была развита Курбатским Н.П. [6]. С детальным анализом зарубежных оценок пожарной опасности лесов можно ознакомиться в работе [7]. Авторы работы [8] считают, что эффективность пожарной оценки лесов можно значительно повысить за счет косвенного учета всех факторов (а не только одного погодного) через составление региональных шкал, имеющих сопоставимые классы пожарной опасности, которые связаны с абсолютным критерием пожарной опасности на территории района.

Кроме влияния естественного и антропогенного фактора на возникновение очагов горения лесного массива, учеными рассматривается связь горимости лесов при взаимодействии с солнечной активностью (СА) [1. 2].

Исходя из результатов работы [2], (Рисунок 1 и 2) можно говорить о том, что основные всплески горимости лесов в Якутии проявляются на ветви подъема и спада 11-летних циклов СА, как например, в Центральной Якутии [1], так и эпоху экстремумов СА. Стоит отметить факт того, что наблюдаемое смещение положительных экстремумов среднегодовых и среднесезонных (лето, осень) значений приземной температуры воздуха относительно максимума СА, может являться способствующим фактором благоприятных условий для возникновения лесных пожаров в Якутии [9].

На рисунках 1 и 2 значения чисел Вольфа (<http://www.astro.oma.be/en/>) умножено на 8, а общая выгоревшая площадь земель лесного фонда (покрытая лесом, не покрытая лесом) переведена из гектаров в км^2 . Рисунки 1 и 2 не представлены единым графиком в виду различия размерностей. Однако можно отследить общую динамику горимости лесов по данным «Авиалесоохрана» и спектрорадиометра MODIS/Terra, Aqua [5].

Согласно Приказу Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации (Минприроды России) об утверждении «Правил тушения лесных пожаров» от 08.07.2014 г. № 313 (с изменениями от 08.10.2015 г. № 426 и 16.02.2017 г. № 64) районы применения наземных сил и средств пожаротушения устанавливаются в лесах, расположенных на территориях с развитой дорожной сетью, на которые прибытие наземных сил и средств пожаротушения возможно в течение 3 часов с момента обнаружения лесного пожара вне зависимости от

погодных условий. Фактически лесные пожары не подлежат обязательному тушению в районах с не развитой дорожной сетью, в частности, если нет угрозы населенным пунктам и линейным объектам. В зоне контроля лесных пожаров, в отношении которой принято решение о прекращении, приостановке работ по тушению лесных пожаров, устанавливается наблюдение авиационными и (или) космическими средствами. Данные об основных характеристиках таких пожаров (площади, форме, ежедневной динамике развития) подлежат обязательному учету (регистрации). Стоит отметить, что данные дистанционного зондирования Земли (спутниковый мониторинг) «Авиалесоохрана» начала применять при обнаружении лесных пожаров в первой половине второго десятилетия XXI века.

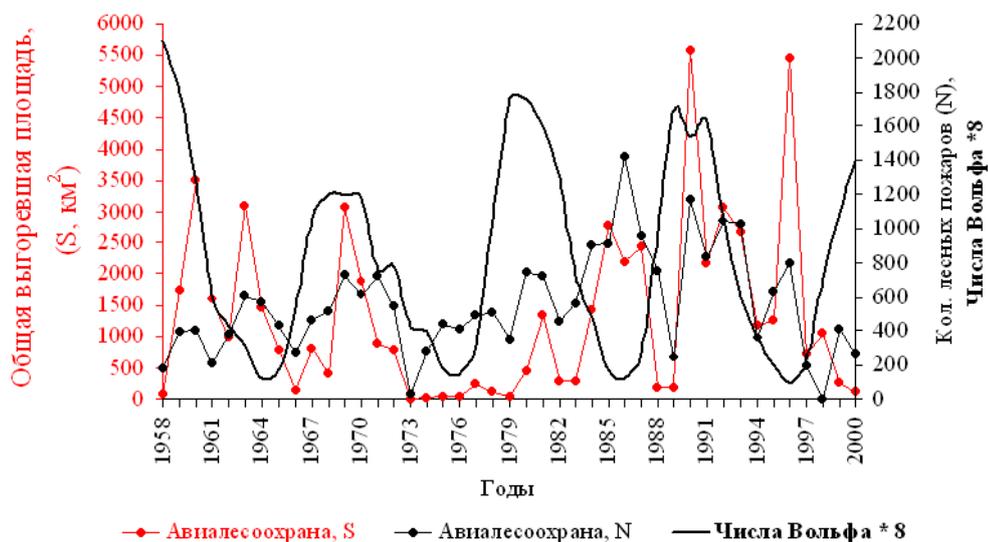


Рисунок 1 – Годовые вариации солнечной (числа Вольфа * 8) и лесопожарной активности («Авиалесоохрана» – общая выгоревшая площадь (S, км²) и количество лесных пожаров (N)) в Якутии за период 1958-2000 гг.

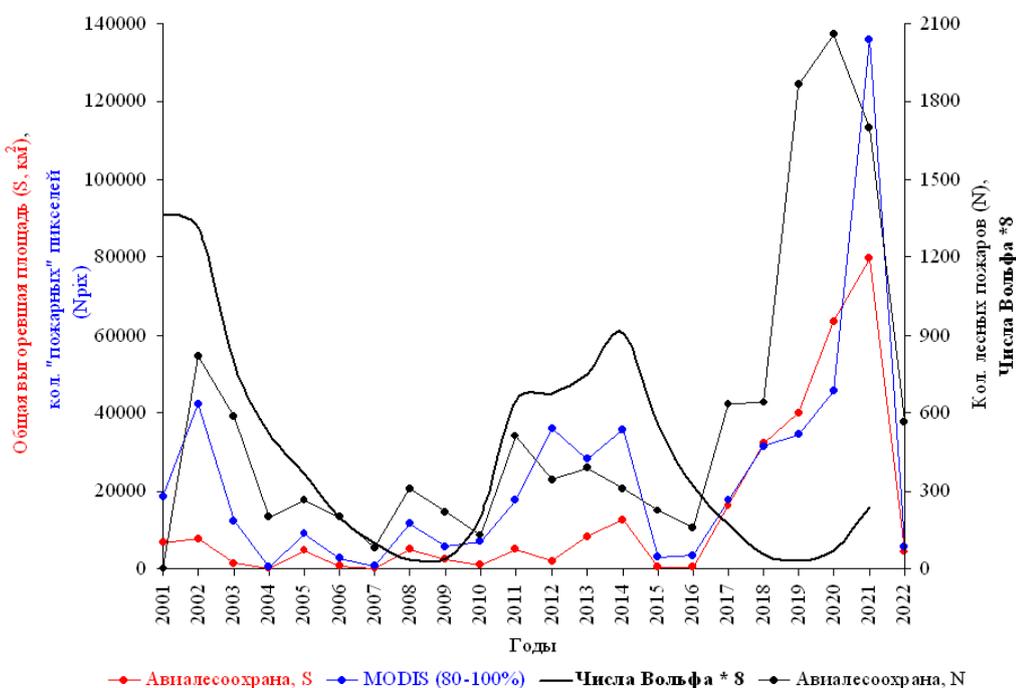


Рисунок 2 – Годовые вариации солнечной (числа Вольфа * 8) и лесопожарной активности («Авиалесоохрана» – общая выгоревшая площадь (S, км²) и количество лесных пожаров (N), MODIS/Terra, Aqua с уровнем достоверности от 80-100% [5] – количество «пожарных» пикселей (Npix, термоочки)) в Якутии за период 2001-2022 гг.

Причинно-следственная связь горимости лесов отражена в росте количества и площади лесных пожаров с 2017 г. (см. Рисунок 2) при учете данных средств космического мониторинга. В 2017 г. на каждого лесного инспектора РС (Я) приходилось порядка 715 тыс. га надзорной территории, что говорит о необеспеченности республики необходимой численностью лиц, осуществляющих федеральный государственный лесной надзор (доклад по лесному надзору за 2017 г. Департамента по лесным отношениям РС (Я)). В 2018 г. данный Департамент путем реорганизации присоединен к Министерству экологии, природопользования и лесного хозяйства РС (Я). По нормативам патрулирования лесов должностными лицами, осуществляющими федеральный государственный лесной надзор, утвержденным приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 21 января 2014 года № 21, штатная численность государственных лесных инспекторов по Республике Саха (Якутия) требует увеличения до 635 единиц (2017 г. – 328 ед.) с учетом нормы на одного государственного лесного инспектора 400 тыс. га надзорной территории и общей площади лесного фонда республики равной 254 млн. га.

По данным «Авиалесоохрана» в 2022 г. было в три и 18-ть раз меньше, соответственно количества лесных пожаров и общей выгоревшей площади, чем в 2021 г. В 2022 г. от общего количества лесных пожаров в 34% при тушении было задействовано воздушное судно (авиация), а в 2021 г. – 15%.

В работе [10] показано, что катастрофическая ситуация с горимостью лесов летом 2021 г. на территории Якутии обусловлена крупномасштабными циркуляционными факторами. Высокая пожароопасность в первую половину лета связана с атлантическими циклонами при углублении циркумполярного вихря в значительной толще тропосферы и адвекцией теплого сухого воздуха в теплых секторах южных циклонов. В августе 2021 г. увеличение площади лесных пожаров связано с усилением скорости ветра при его взаимодействии с циклонами, смещающимися на север Сибири и развитием гребней полярного антициклона. В свою очередь углубление циркумполярного вихря может быть связано с развитием сопряженных высотных гребней с северных районов Тихого океана и Атлантики.

В Якутии фактор лесных пожаров проявляется неоднозначно, что выражено в несоответствии горимости лесов и гибели насаждений от огня [11]. Данный факт говорит о том, что якутские леса в большей мере «дымят» (дымовой пирогенный аэрозоль), чем горят [3, 11]. В работе [11] показано, что гибель насаждений от пожаров наиболее заметной была в 1998-2000 гг.: в сумме 9939 га (99,39 км²). По данным государственного лесного реестра на 1 января 2018 г. площадь земель лесного фонда составляет 254 749,5 га, в том числе покрытая лесом – 155 519,8 тыс. га. В целом (по данным трех государственных учетов лесов МПР РФ по состоянию на 1 января 1993 г., 1998 г. и 2003 г. (Лесной фонд России, 1995, 1999, 2004 г.)) в различные периоды наблюдалось изменение площади земель лесного фонда РС (Я) [11].

На рисунке 3 представлен спектральный анализ Фурье с целью выявления квазипериодических колебаний выгоревшей площади по данным «Авиалесоохрана» за период 1958-2022 гг. Видно (Рисунок 3), что в значениях периодограммы не наблюдаются ярко выраженные «пики» (всплески). В свою очередь значения периодограммы – это объект существенных случайных колебаний. Также была рассмотрена зависимость спектральной плотности выгоревшей площади от частоты (частота, соответствует определенным периодам – годам) для того, чтобы исключить возможные случайные колебания, если они проявляются. В данном случае также не наблюдаются ярко выраженные «пики» выгоревшей площади за исключением проявления с наибольшими частотами квазидвухлетних колебаний. Известно, что квазидвухлетние колебания проявляются в различных параметрах атмосферы [12]. Таким образом, спектральный анализ Фурье выгоревшей площади по данным «Авиалесоохрана» не позволил выявить достоверно значимые квазипериодические колебания. Возможно, это связано с привлечением данных дистанционного зондирования Земли при обнаружении лесных пожаров и хоть незначительных, но изменений площади лесного фонда в различные периоды.

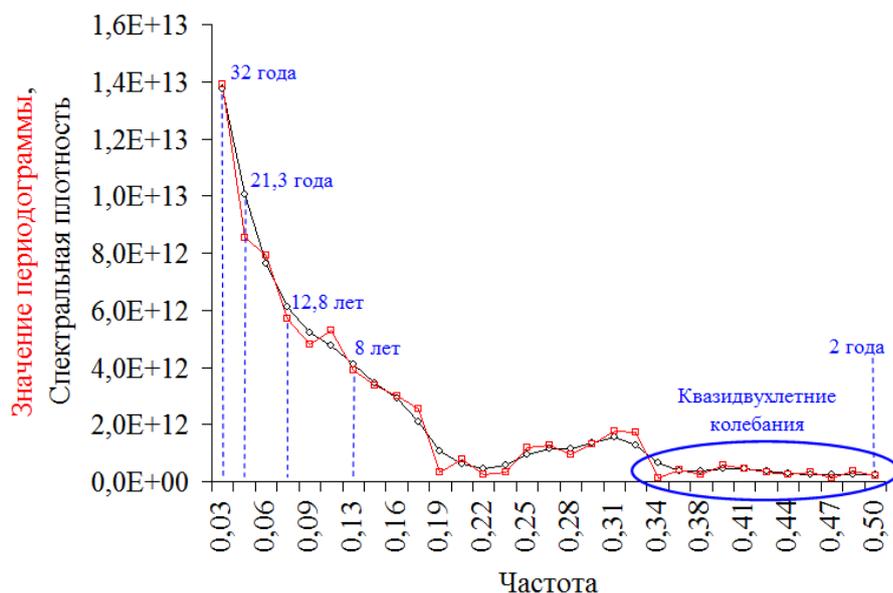


Рисунок 3 – Спектральный анализ Фурье выгоревшей площади по данным «Авиалесоохрана» за период 1958-2022 гг., где частота, соответствует определенным периодам – годам.

3. Выводы

По данным «Авиалесоохрана» в 2022 г. было в три и 18-ть раз меньше, соответственно количества лесных пожаров и общей выгоревшей площади, чем в год с катастрофической ситуацией горимости лесов (2021 г.) за рассматриваемый период 1958-2022 гг. В 2022 г. от общего количества лесных пожаров в 34% при тушении было задействовано воздушное судно (авиация), а в 2021 г. – 15%.

Спектральный анализ Фурье выгоревшей площади по данным «Авиалесоохрана» не позволил выявить достоверно значимые квазипериодические колебания. Возможно, это связано с привлечением данных дистанционного зондирования Земли при обнаружении лесных пожаров («Авиалесоохрана») и хоть незначительных, но изменений площади лесного фонда в различные периоды.

Мониторинг и анализ горимости лесов в Якутии, кроме основных характеристик (количество пожаров и общая выгоревшая площадь земель лесного фонда), должны быть дополнены показателем гибели насаждений от пожаров.

В возникновении лесных пожаров на территории Якутии не исключено проявление синергетического эффекта, т.е. усиливающий эффект взаимодействия двух или более факторов. Данный эффект обусловлен рядом климатообразующих факторов космического (гелиосферного), геосферного, антропогенного, биосферного и т.д. происхождений. В этом направлении необходимы научные изыскания для детального выявления факторов и их вклада в возникновение лесных пожаров.

4. Благодарности

Автор благодарит ГБУ РС (Я) «Якутская база авиационной охраны лесов» за предоставление сводок о лесных пожарах.

4. Литература

- [1] Pomortsev, O.A., Popov, V.F., Afonina, A.A. Forest fires: geophysical foundations of forecasting on the example of Central Yakutia // Mining Information and Analytical Bulletin. – 2008. – Dep. issue 2: Yakutia-1. – P. 363-366. (translated from Russia).
- [2] Vasiliev, M.S., Karimov, R.R. Investigation of the possible causes of forest fires in Yakutia according to remote observations // In the world of scientific discoveries. – Krasnoyarsk: Research and Innovation Center, 2014. – No. 4 (52). – P. 161-171. (translated from Russia).

- [3] Vasiliev, M.S., Nikolashkin, S.V., Boroyev, R.N. Atmospheric Transparency over Central Yakutia from the Sun Photometer Data in 2004-2014 // *Russian Meteorology and Hydrology*. – 2017. – Vol. 42. – No. 11. – P. 700-704.
- [4] Vasiliev, M.S., Nikolashkin, S.V. Temperature effect of smoke aerosol in the summer season over the central part of Yakutia for the period 2004-2014 // *Atmospheric and ocean optics*. – 2015. – Vol. 28. – No. 12. – P. 1106-1111. (translated from Russia).
- [5] Vasiliev, M.S., Pestryakova, L.A., Danilov, Yu.G. Spectroradiometer measurement of thermal points in Yakutia // Certificate of registration of the database 2022622829, 10.11.2022. Application No. 2022622809 dated 11.07.2022. (translated from Russia).
- [6] Kurbatsky, N.P. Fire danger in the forest and its measurements according to local scales. – M.: AS USSR, 1963. – P. 5-30. (translated from Russia).
- [7] Sofronova, T.M., Volokitina, A.V., Sofronov, M.A. Improving the assessment of fire hazard according to weather conditions in the mountain forests of the Southern Baikal region / V.N. Sukachev SB RAS; Krasnoyarsk State Pedagogical University named after V.P. Astafiev. – Krasnoyarsk. 2007. – 236 p. (translated from Russia).
- [8] Volokitina, A.V., Sofronova, T.M., Korets, M.A. Regional scales for assessing fire hazard in the forest: an improved compilation method // *Siberian Forest Journal*. – 2017. – No. 2. – P. 52-61. (translated from Russia).
- [9] Vasiliev, M.S., Nikolashkin, S.V. Study of the manifestation of solar-terrestrial relations on the surface air temperature in Yakutia according to meteorological stations data // *Science and Education*. – 2014. – No. 2 (74). – P. 124-130. (translated from Russia).
- [10] Vologzhina, S., Latysheva, I., Loschenko, K. Circulation factors of forest fires in Siberia and Yakutia at the beginning of the XXI century // *Transbaikal State University Journal*. – 2022. – Vol. 28. – No. 5. – P. 6-18. – DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-5-6-18.
- [11] Utkin, A.I. Forests of the Republic of Sakha (Yakutia) – a phenomenon of the taiga belt of Northern Eurasia // *Coniferous boreal zones*. – 2006. – Vol. 23. – No. 3. – P. 7-14. (translated from Russia).
- [12] Sitnov, S.A. QBO effect manifesting in ozone, temperature, and wind profiles // *Ann. Geophys.* – 2004. – Vol. 22. – No. 5. – P. 1495-1512.

**ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА В РАЙОНЕ ФГБОУ ВПО
«ЧУРАПЧИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ ФИЗИЧЕСКОЙ
КУЛЬТУРЫ И СПОРТА»**

Ольга Васильева, Юлия Муксунова, Владимир Попов
ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова»,
677000, Россия, г. Якутск, ул. Белинского, 58

**ENGINEERING-GEOLOGICAL SITUATION IN THE AREA OF CHURAPCHI
STATE INSTITUTE OF PHYSICAL CULTURE AND SPORTS**

Olga Vasilieva, Yuliya Muksunova, Vladimir Popov
North-Eastern Federal University, 58, Belinsky str., Yakutsk, 677000, Russia

Annotation. In the area of the village of Churapcha, in particular the Churapcha State Institute of Physical Culture and Sports, there is a complex engineering-geological, geocryological and natural-climatic situation. The activation of cryogenic processes, primarily thermokarst and thermal erosion, has acquired a regional-areal character. These processes are related to the fact that under the cover of loess-like loams from 1.5 to 3 meters there is an ice complex with a thickness of 10-15 meters. Accordingly, the safe operation and development of infrastructure requires the search for new engineering solutions.

1. Введение

Село Чурапча с населением более 10 тыс. человек находится в 177 км к востоку от г. Якутска. Чурапчинский государственный институт физической культуры и спорта (ЧГИФКиС) открыт в 1999 году, располагается на северном побережье озера Чурапча, в инженерном отношении представлен благоустроенными этажными каменными зданиями на свайном фундаменте и каркасными спортивными сооружениями на ленточном фундаменте, водопроводными коммуникациями, грунтовыми, гравийными и асфальтовыми автомобильными дорогами, бетонированными площадками (рис.1). Проведение озеленительных мероприятий древесно-кустарниковой растительностью затруднено в связи с суровыми климатическими условиями. По условиям влагообеспеченности район относится засушливым. Но в редкие годы возможны интенсивные ливневые осадки, со значительным превышением от нормы.



Рисунок 1 – Территория ЧГИФКиС [5].

В будущем следует ожидать только увеличение объемов строительства и дальнейшее развитие инфраструктуры, эксплуатация которого будет осуществляться в сложнейших инженерно-геологических, геокриологических и природно-климатических условиях.

2. Результаты исследований

Территория в географическом плане относится к Лено-Амгинской аласной физико-географической провинции, ее ландшафтную структуру составляют межаласный, аласный и мелкодолинный типы местности [4]. Озеро Чурапча фактически представляет собой регулируемое водохранилище в осложненной аласными котловинами долине ручья Куохара левого притока р.Татта с отметкой уреза воды 171 м. Абсолютные отметки межаласий колеблются в пределах 200 – 225 м, а днищ аласов и долин ручьев на отметке 180 □ 190 м.

На космоснимках последних лет в районе села Чурапча можно наблюдать новые озера □ дюеда (коэффициент озерности по сравнению с серединой XX века [1] увеличился более чем в 3 раза [2]). Почти повсеместно на открытых от леса межаласных пространствах наблюдается характерный просадочно-полигональный микрорельеф быларов и тымпы [3], свидетельствующий об активизации термокарстовых процессов, сегодня уже по сравнению с 2015 годом можно констатировать, что его развитие фактически приобрело регионально-площадной характер. Следует отметить, что в любой год при определенном стечении климатических условий эти процессы могут приобрести катастрофический характер для региона. Причем устойчивые тенденции увеличения температур воздуха и атмосферных осадков, предопределяют усиление динамики процессов термокарста и термоэрозии, увеличивают вероятность его катастрофического развития.

Геокриологические условия района с. Чурапча определяется лессоидной едомой. Общеизвестной теории лессообразования в настоящее время нет. Ледовый комплекс мощностью 10-15 м залегает на глубине от 1,5 до 3 м под покровом лессовидных супесей. Мощность сезонноталого слоя достигает 2,0-2,5 м, на склонах аласных котловин южной экспозиции эта величина больше, поэтому эти борта аласов осложнены байджеерами. Температура мерзлых пород в последнее десятилетие повысилась и составляет от -2 до -0,5 □С. Грунты имеют высокие показатели льдистости, засоленности и заторфованности. Грунты, в составе которых преобладает фракция 0,05-0,01 мм имеют в основном массивную и волнисто-шлировую криотекстуру. Грунтовые и климатические условия предопределяют проблемы с заболачиванием и подтоплением территорий, при этом усиливая развитие термокарста,

накопление воды между быларами также ускоряет термокарстовый и термоэрозионный процесс.

Для территории ЧГИФКиС отложения представлены супесями с примесью органических веществ, средnezасоленными, залегают в верхней части в сезонно-талом слое до глубины 2,7 м. Многолетнемерзлые грунты представляют собой супеси мерзлые, слабодистые, средnezасоленные мощностью до 0,9 м. Подстилаются супеси подземными льдом мощностью достигающих до 8,7 м. Под подземным льдом залегают супеси слабодистые без примеси органических веществ, не засоленные. По характеристике рельефа, геоморфологическим и геологическим характеристикам, по площади развития многолетнемерзлых грунтов относится к территориям со сложной категорией сложности природных условий.

3. Выводы

Ключевая роль климата в разрушении многолетнемерзлых пород общеизвестна. В областях распространения мерзлоты следует ожидать коренную перестройку криогенного ландшафта в случае дальнейшей эскалации современного потепления. Развитие криогенных процессов может привести территорию в абсолютно непригодное для хозяйственного освоения состояние. Возникает вопрос о методах защиты, прогнозировании деструктивных процессов, основанных на знании глубины и масштаба их развития на территории, села, понимании механизма их образования и развития в конкретных инженерно-геологических условиях.

4. Литература

- [1] Bosikov N.P. Evolution of Alas of Central Yakutia. – Yakutsk: IMZ SB AS USSR, 1991. – 128 p.
- [2] Popov V.F. Modern thermokarst in the area of Churapcha village // Geology and mineral resources of the North-East of Russia : materials of the VII All-Russian scientific conference dedicated to the 60th anniversary of the Institute of Geology of diamond and noble metals of the Siberian Branch of RAS, April 5-7, 2017. In 2 vols. – Yakutsk : NEFU Publishing House, 2017. – P. 385-387
- [3] Solov'ev P.A. Cryolithozone of the northern part of the Lena-Amga interflaves. – Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1959 – 144 p.
- [4] Fedorov A.N. Terrain types and physical-geographical zoning of the Lena-Amga interflave// Geographical studies in Yakutia. – Yakutsk, 1983. – P. 8 -13.
- [5] Bing Maps (access mode <https://www.bing.com/maps/>) date of reference: 27.02.2023.

СУЛЬФАТНЫЕ НОВООБРАЗОВАНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ АГРОЗЕМОВ ЗАБРОШЕННЫХ ПАСТБИЩ ДОЛИНЫ ТУЙМААДА

Татьяна Васильева, Яна Легостаева

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

SULFATE MINERALS ON THE SURFACE OF AGROZEMS OF ABANDONED PASTURES IN THE TUYMAADA VALLEY

Tatiana Vasileva, Yana Legostaeva

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

Annotation. Изучение засоленных почв и процессов соленакопления имеет большое практическое значение, так как является одним из признаков деградации почв. Изучен состав новообразований в виде корок и налетов, которые были обнаружены на поверхности почвенного покрова различных участков долины Туймаада в Центральной Якутии. Налеты на поверхности почвенно-растительного покрова участков на Покровском тракте 17 км, с. Хатассах и местности Ус Хатын состоят, главным образом, из гипса $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, тенардита Na_2SO_4 и мирабилита $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. Налеты на территории Намцырского тракта образованы из бледита $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, гипса, старкеита $\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ и гексагидрита $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Новообразования на территории Птицефабрики состоят из тенардита, гипса, бледита, коньяита $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, гексагедрита, галита и ярозита $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$. Термогравиметрические данные подтверждают результаты рентгенофазового анализа.

1. Введение

Засоленная почва является достаточно распространенным компонентом аридных ландшафтов и одним из признаков деградации почв. Как известно тип засоленности почв отличается в регионах по своему генезису, способу переноса солей и составу. Состав и структура отложений, на которых почвы развиваются, играет немаловажную роль в формировании и накоплении различных видов солей. Четвертичные отложения долины Туймаада Центральной Якутии, на которых развиваются почвы, представлены аллювиальными отложениями, достигающие местами значительной мощности (100-120 м) преимущественно сульфатно-гидрокарбонатные смешанные по катионам [1]. На понижениях древней аллювиальной равнины, где проводились исследования, распространены сульфатные солончаки и сильно засоленные сульфатами почвы [2, 3] и в годы с наименьшим количеством осадков, новообразованные соли кристаллизуются в виде налета и корок. Процесс накопления этих водно-растворимых солей на поверхности почвы связан с поднятием и испарением почвенных растворов до поверхности почв в летний период. Что в свою очередь связано с резко континентальным климатом, при котором наблюдаются большая сухость приходящих масс воздуха в летний период и малое количество осадков. Вечная мерзлота способствует накоплению растворимых солей в почвенном горизонте, выступая в роли упора для промывания почвы [2]. Исследованные участки в свое время относились к территориям, используемым для орошаемого земледелия и пастбищного животноводства [2, 3]. На таких почвах нередко протекание вторичного засоления вследствие бездренажного орошения и применения минерализованной воды, а также перегрузке пастбищ в результате уплотнения и уничтожения травянистой растительности [4].

Изучение типов соленакопления и закономерностей миграции солей в биосфере является основой для оценки районов с ирригационной деятельностью [4]. Поэтому изучение засоленных почв и процессов соленакопления имеет большое практическое значение. В данном

исследовании был изучен состав новообразований в виде корок и налетов, которые были обнаружены на поверхности почвенного покрова различных участков долины Туймаада Центральной Якутии.

2. Методы исследований.

Минералогический состав налетов исследовали методом рентгенофазового анализа на дифрактометре D2 PHASER, съемка образцов проводилась на $\text{CuK}\alpha$ излучении, при напряжении трубки 30 кВ и силе тока 10 мА, интервал съемки $4,5-65^\circ$ ($2\theta^\circ$), для диагностики минералов использовали базу данных PDF-2 (ЦКП ИГАБМ СО РАН). Налеты прессовались на предметных стеклах и помещались в универсальную кювету. Термический анализ проводился с помощью анализатора STA Jupiter, режим съемки от комнатной температуры до 1000°C в инертной среде аргона (аналитик Н.Н. Емельянова, ЦКП ИГАБМ СО РАН).

3. Результаты исследований

Изученные почвы характеризуются единой ассоциацией минералов, из них преобладающими являются кварц и полевые шпаты, в подчиненном количестве – минералы из групп амфиболов, хлоритов и слюд.

Исследованы налеты и корки на 5 участках: Покровский тракт 17 км ($61^\circ58'29''$ с.ш., $129^\circ39'34''$ в.д.), Хатассы ($61^\circ55'20,0''$ с.ш., $129^\circ35'53,9''$ в.д.), Птицефабрика ($61^\circ58'12,8''$ с.ш., $129^\circ35'40,4''$ в.д.), местность «Ус Хатын» ($62^\circ11'45''$ с.ш., $129^\circ46'45''$ в.д.), Намцырский тракт ($62^\circ11'08,4''$ с.ш., $129^\circ29'39,9''$ в.д.) (Рисунок 1).

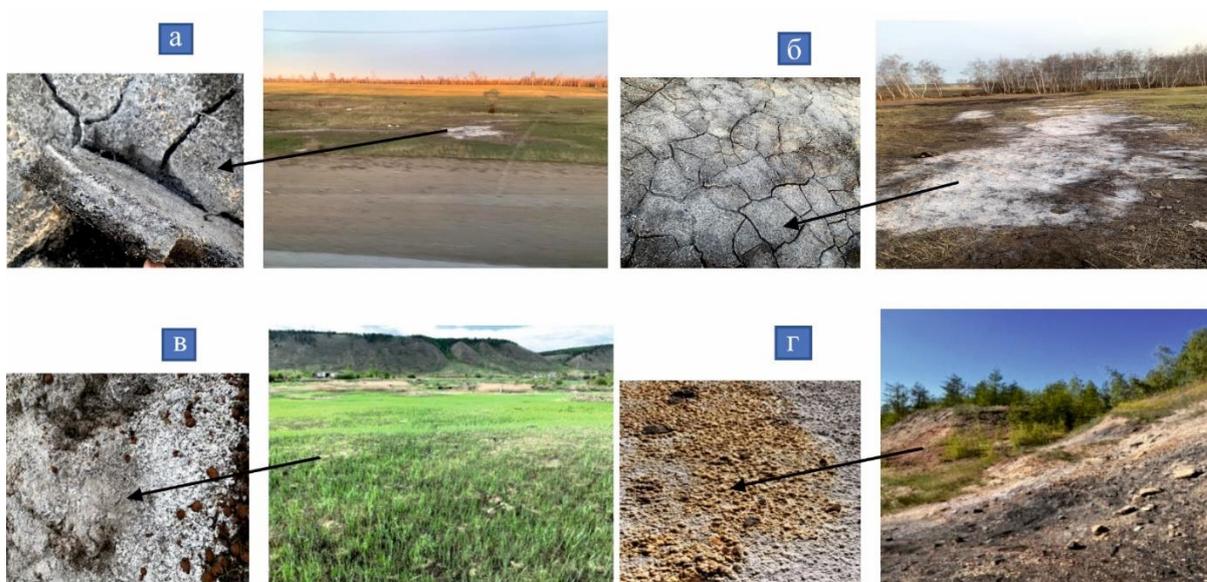


Рисунок 1 – Фото участков отбора проб и налетов: а) Покровский тракт, 17 км; б) местность Ус-Хатын; в) Птицефабрика; в) Намцырский тракт.

Новообразования на поверхности почвенно-растительного покрова исследованных участков представлены серыми, желтоватыми и белесыми порошковатыми массами, корками и рыхлыми налетами. По составу практически все образцы представляли собой полиминеральные смеси, основными минералами новообразований являются водные сульфаты (Рисунок 2).

Налеты на поверхности почвенно-растительного покрова участков на Покровском тракте 17 км, Хатассах, местности Ус Хатын однообразны и состоят, главным образом, из сульфатов кальция и натрия: гипса $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, тенардита Na_2SO_4 и мирабилита $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. Налеты на территории Намцырского тракта образованы из бледита $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, гипса, старкеита $\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ и гексагидрита $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Новообразования на территории Птицефабрики состоят из тенардита, гипса, бледита, коньяита $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, гексагидрита, галита. Более

сложный состав налетов на территории Намцынского тракта и Птицефабрики объясняется присутствием полиминерального вещества из близлежащих карьеров возле точек отбора.

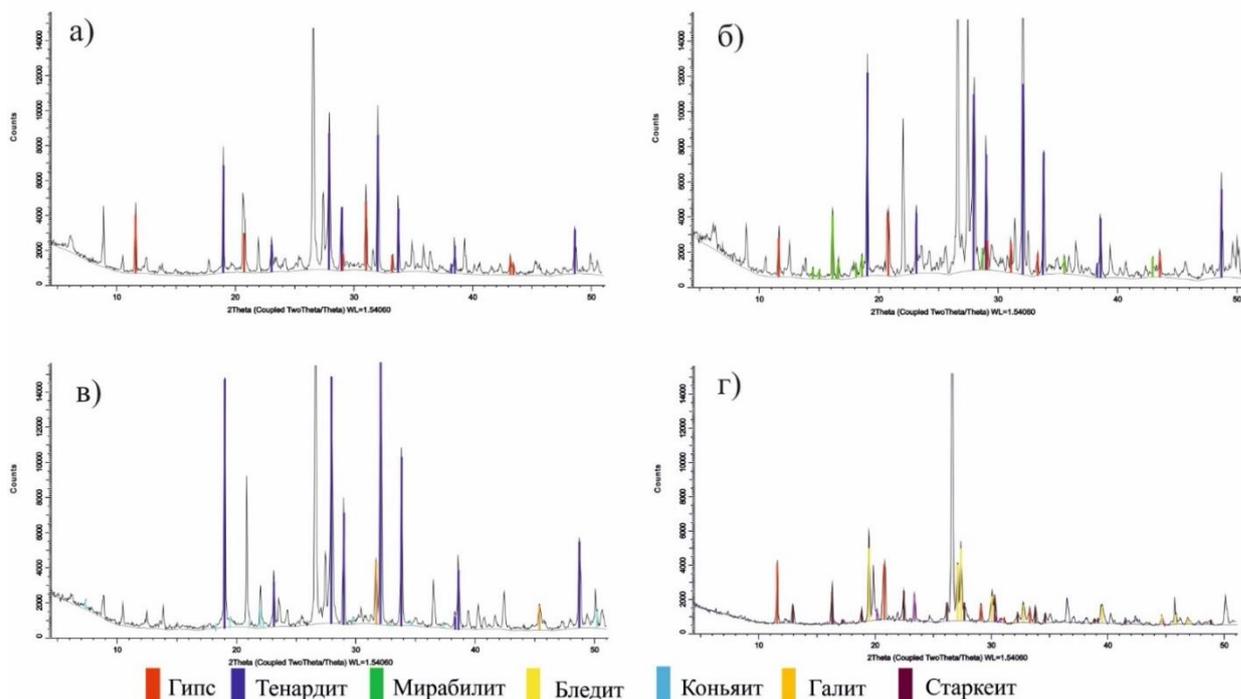


Рисунок 2 – Дифрактограммы налетов: а) Покровский тракт 17 км, б) Хатассы, в) Птицефабрика, г) Намцынский тракт.

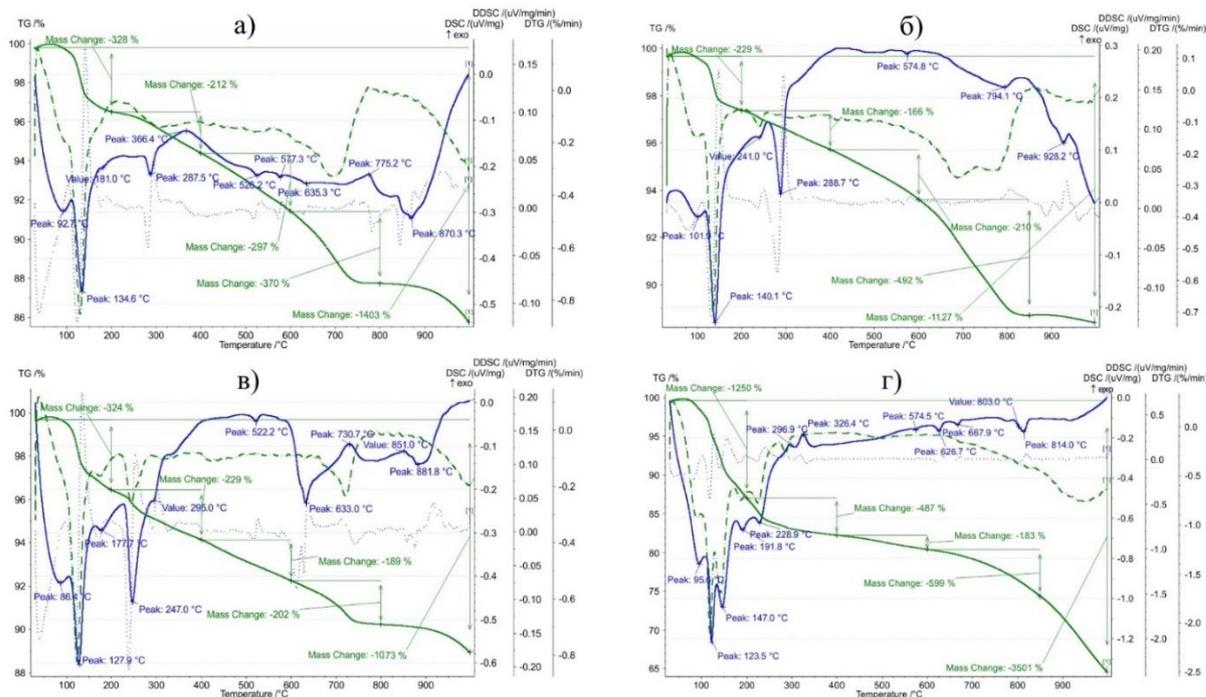


Рисунок 3 – Термограммы налетов: а) Покровский тракт 17 км, б) Хатассы, в) Птицефабрика, г) Намцынский тракт.

Термогравиметрические исследования подтверждают данный состав, на термограммах наблюдаются различная потеря массы, связанные с испарением гигроскопической и структурной воды. При этом плотность налета соответствует количеству гигроскопической воды (Рисунок 3).

Как известно при испарении сначала выпадают наименее растворимые соли. Поэтому при сульфатном составе раствора сначала выделяется гипс – это объясняет его повсеместное

присутствие на исследованных участках. Следующими по очереди выпадают тенардит, мирабилит, галит, гексагидрит и т.д [5]. Мирабилит в сухом воздухе довольно быстро теряет кристаллизационную воду и переходит в тенардит, процесс обратим. То же самое касается пар гексагидрит-старкеит и коньяит-бледит [6]. Поэтому образование и сохранение этих минералов в почвах Якутии связано с аридным климатом: небольшим количеством осадков и высокими температурами воздуха в летний период с большим суточным колебанием, приводящими к быстрому испарению влаги.

Изучение сезонных минералов представляет большой интерес с точки зрения расширения минералогической и геохимической картины изучаемой территории. В результате проделанной работы выявлен минералогический состав поверхностных новообразований агроземов долины Туймаада.

4. Выводы

Результаты исследований дополняют ранее опубликованные литературные данные и подтверждают преимущественно сульфатное засоление почв постагрогенных территорий. Активное проявление процессов поверхностного засоления в летний период 2020 -2021 г.г. связан с повышенной засушливостью первых месяцев лета.

Основным минералом поверхностных почвенных новообразований на участках исследований является гипс, на втором и третьем месте тенардит и бледит соответственно. Остальные минеральные примеси не имеют повсеместного распространения и зависят, во многом, от количества влаги. Плотность налетов зависит от потери массы при испарении гигроскопической воды.

5. Благодарности

Работа выполнена в рамках выполнения проектов Государственного задания Минобрнауки РФ FUEM2019-0003. Авторы благодарят О.В. Шадриную за предоставленные для исследования образцы и помощь в составлении статьи.

6. Литература

- [1] Makarov, V.N., Torgovkin N.V. Ecological and geochemical features of the soils of the cultural layer in the city of Yakutsk // *Mineralogy and Geochemistry of the Landscape of Mining Territories. Rational nature management. Modern Mineral Formation: Proceedings of the VII All-Russian Symposium with International Participation and XIV All-Russian Readings in Memory of Acad. A.E. Fersman.* – Chita: Transbaikal State University, 2018. – P. 71-77.
- [2] Elovskaya L.G., Konorovsky A.K., Savvinov D.D. Permafrost saline soils of Central Yakutia. – Moscow: Nauka, 1966. – 272 p.
- [3] Zolnikov V.G. Soils of the eastern half of Central Yakutia, their use // *Materials on natural conditions and agriculture in Central Yakutia.* – Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1954. – Vol. 4. – P. 55-222.
- [4] Kovda V.A. Problems of desertification and salinization of soils in arid areas of the world. – Moscow: Nauka, 2008. – 415 p.
- [5] Kukushkin Yu.N. Chemistry around us. – Moscow: Higher School, 1992. – 192 p.
- [6] Yakhontova, L.K. On the participation of the compound of trivalent arsenic in the oxidation zone of iron-cobalt-nickel arsenides. // *Proceedings of the Mineralogical Museum.* – 1964. – Vol. 15. – P. 176-183.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ВОДОНЕФТЯНЫХ ЭМУЛЬСИЙ РАСТВОРОВ ПОЛИМЕРОВ

Артур Винокуров¹, Альберт Портнягин²

1 ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова»,
677000, Россия, г. Якутск, ул. Белинского, 58

2 ФГБУН ФИЦ «ЯНЦ СО РАН» «Институт проблем нефти и газа СО РАН»,
677007, Россия, г. Якутск, ул. Автоторожная, 20

INVESTIGATION OF THE STABILITY OF OIL-WATER EMULSIONS OF POLYMER SOLUTIONS

Artur Arsenovich Vinokurov², Albert Serafimovich Portnyagin²

1 North-Eastern Federal University, 58, Belinsky str., Yakutsk, 677000, Russia

2 Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, 20, Avtodorozhnay str., Yakutsk, 677007, Russia

Annotation. The results of determining the stability of water-oil emulsions obtained from oil of the Irelyakhskoye oilfield and polymer solutions are presented: 1) polyacrylamide (PAA); 2) sodium carboxymethyl cellulose (Na-CMC) and 3) polyethylene glycol (PEG)). It has been established that emulsions prepared from a mixture of oil with a PEG solution are the most stable, and emulsions from Na-CMC solutions can be considered the least stable. It was also shown that small amounts of CaCl₂ salt in the system act as a WNE stabilizer. An increase in the salt concentration in the system leads to a decrease in the stability of the resulting emulsions prepared from PAA and Na-CMC solutions.

1. Введение

По мере увеличения обводненности добываемой нефти, встает вопрос ее подготовки к дальнейшей транспортировке по трубопроводному транспорту и последующей переработки. Одним из подготовительных этапов нефтяного сырья, является влагоудаление, однако в некоторых случаях, когда нефть и вода образуют водонефтяные эмульсии (ВНЭ), этот этап становится достаточно сложным. Известно, что при интенсивном перемешивании воды или водных растворов солей с нефтью, образуются водонефтяные эмульсии, которые могут обладать большой вязкостью и устойчивостью к разделению на составные фракции, что негативно влияет на эффективность процесса добычи нефти [1]. Для нефтегазовых месторождений Юго-Западной Якутии процесс разделения ВНЭ также является насущной проблемой, отягощенной низкими пластовыми температурами, большим содержанием асфальтосмолпарафиновых отложений и высокой минерализацией пластовых вод, которые способствуют стабилизации ВНЭ.

В настоящее время широкое применение нашли вторичные методы увеличения нефтеотдачи продуктивных пластов, где основным методом выступают методы водополимерного заводнения [2]. Эти методы также рассматриваются к применению на нефтегазовых месторождениях Якутии [3], однако вопрос образования ВНЭ из нефтей этих месторождений и растворов, наиболее перспективных для реализации водополимерного заводнения загустителей, слабо изучен и является актуальной задачей для увеличения эффективности добычи нефти в Якутии.

2. Результаты исследований

В работе исследованы обратные водонефтяные эмульсии (ВНЭ) второго порядка образованные из водных растворов натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы (Na-КМЦ), полиакриламида (ПАА) и полиэтиленгликоля (ПЭГ) с концентрациями 5, 1 и 30 г/л соответственно, и нефти Irelyakhского газонефтяного месторождения (ГНМ) в соотношении 80 мас.% водного раствора к 20 мас.% нефти.

Установлено, что при интенсивном перемешивании дистиллированной воды и нефти Иреляхского ГНМ лопастным смесителем со скоростью вращения вала равной 1200 об/мин., на 226 секунде от начала перемешивания, образуется стабильная эмульсия, с плотной и вязкой консистенцией, которая по внешнему виду напоминает «шоколадный мусс» (Табл. 1). При смешивании нефти с растворами полимеров по аналогичной методике, время необходимое для образования ВНЭ было разным. Так, смешение раствора Na-КМЦ с нефтью, продолжительностью более 900 с, не приводило к образованию эмульсий, тогда как при смешении нефти с раствором ПАА стабильная эмульсия образовывалась через 336 сек., а с раствором ПЭГ уже через 26 сек.

Для определения устойчивости полученных ВНЭ к разложению на составные части, образцы эмульсий были экспонированы в закрытом от прямых солнечных лучей помещении при комнатной температуре до полного их расслоения. Установлено, что наиболее длительный период расслоения наблюдался у эмульсий, полученных из смеси раствора ПЭГ с нефтью, время образования которых было наименьшим. Полученные таким образом эмульсии не расслаивались в течение 120 суток. Быстрее всех, менее чем за сутки, произошла дестабилизация ВНЭ с раствором ПАА, время образования которой было 336 секунд. Эмульсии с дистиллированной водой (время образования 226 сек.), разделились через 35 суток, а время разложения эмульсий с растворами Na-КМЦ не учитывалось, так как их получить не удалось (Табл.1).

Таблица 1 – Параметры образования и разложения ВНЭ в различных системах

| Состав ВНЭ | Доля нефти в ВНЭ, % | Время образования ВНЭ, с. | Время расслоения ВНЭ, сут. |
|-------------------------------|---------------------|---------------------------|----------------------------|
| Дистиллированная вода + Нефть | 20 | 226 | 35 |
| ПАА + Нефть | 20 | 336 | <1 |
| Na-КМЦ + Нефть | 20 | >900 (не образовалась) | - |
| ПЭГ + Нефть | 20 | 26 | >60 (не расслоилась) |

Таким образом, время образования ВНЭ характеризует их устойчивость к разделению. Видно, что с увеличением времени образования устойчивость эмульсий снижается. Следовательно, наиболее устойчивыми являются эмульсии, приготовленные из смеси нефти с раствором ПЭГ, а наименее устойчивыми, можно считать эмульсии из растворов Na-КМЦ.

Известно, что ВНЭ полученные из растворов солей обладают большей устойчивостью к расслоению [4]. Поэтому, для изучения влияния пластовой воды нефтегазовых месторождений Якутии на стабильность исследуемых эмульсий были приготовлены водонефтяные эмульсии из нефти и смеси растворов полимеров с моделью пластовой воды. В качестве модели пластовой воды выступал раствор хлорида кальция (CaCl_2) с концентрацией 400 г/л, который соответствует концентрации основного компонента в пластовых водах нефтегазовых месторождений Якутии [5]. Смеси растворов полимеров с моделью пластовой воды были смешаны таким образом, чтобы концентрация CaCl_2 в смеси была равна 40, 80, 120, 160 и 200 г/л. Количество воды бралось без учета массы соли в смеси и равнялось во всех случаях 80 %масс.

В процессе приготовления ВНЭ из растворов CaCl_2 и смесей модели пластовой воды с растворами полимеров было установлено (рис. 1), что при внесении в систему минимально рассмотренного количества соли CaCl_2 время образования стабильных ВНЭ из этих смесей уменьшается. Сокращение времени образования ВНЭ указывает на увеличение их стабильности, которое можно объяснить взаимодействием CaCl_2 с полярными молекулами

присутствующих в составе нефти асфальтенов, нафтеновых кислот, концентрирующихся в межфазных бронирующих оболочках глобул воды [6].

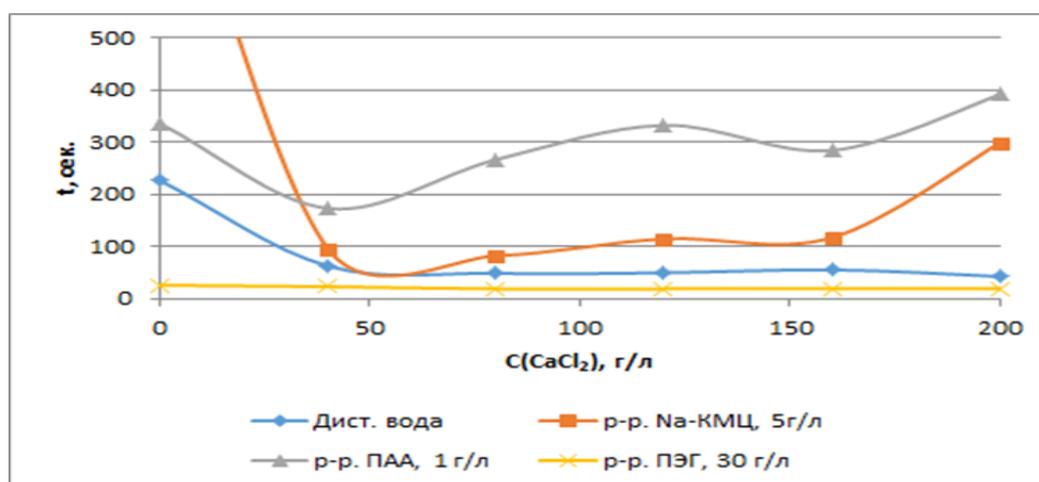


Рисунок 1 – Зависимость времени образования ВНЭ, приготовленных из растворов CaCl₂ и их смесей с растворами ПАА, Na-КМЦ и ПЭГ от концентрации CaCl₂

Дальнейшее увеличение концентрации CaCl₂ в смесях по-разному влияет на время срабатывания образования получаемых эмульсий. Время получения образования ВНЭ из растворов CaCl₂ и ПЭГ с увеличением концентрации соли практически не изменяется, тогда как этот параметр для эмульсий из растворов ПАА и Na-КМЦ увеличивается. Дальнейшее наблюдение за полученными ВНЭ показало, что наиболее устойчивыми являются эмульсии, полученные из растворов CaCl₂, всех рассмотренных смесей ПЭГ с моделью пластовой воды, и смесей раствора Na-КМЦ с содержанием CaCl₂ равным 40, 80, 120 и 180 г/л, которые не расслоились по истечении в течение 120 суток. Наиболее неустойчивыми оказались ВНЭ, полученные из смеси ПАА с моделью пластовой воды, которые расслоились в течение 7 суток. Увеличение времени срабатывания образования эмульсий с увеличением ростом концентрации CaCl₂ от 40 до 200 г/л для ВНЭ, полученных из растворов ПАА и с 160 до 200 г/л для растворов Na-КМЦ, возможно связано с происходящими при взаимодействии полимеров с солью процессами всаливания и высаливания полимера. Так, при взаимодействии ПАА с CaCl₂ образуется нерастворимая соль, в результате чего, вязкость системы уменьшается (процесс высаливания) [7]. А в растворе Na-КМЦ может произойти образование растворимых кальциевых солей карбоксиметилцеллюлозы, которое сопровождается увеличением вязкости раствора (процесс всаливания) [7]. Все эти процессы приводят к уменьшению концентрации CaCl₂ в системе и, соответственно, снижению его ингибирующих свойств.

Таким образом, показано, что небольшие количества соли CaCl₂ в системе выступают в роли стабилизатора ВНЭ. Увеличение концентрации соли в системе приводит к снижению стабильности получаемых эмульсий приготовленных из растворов ПАА и Na-КМЦ.

3. Благодарности

Работа выполнена в рамках бюджетного проекта № 122011100157-5 с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН и гранта №13.ЦКП.21.0016.

4. Литература

- [1] Позднышев, Г.Н. Стабилизация и разрушение нефтяных эмульсий / Г.Н. Позднышев. – М.: Недра, 1982. – 218 с.
- [2] Алтунина, Л.К. Физико-химические методы увеличения нефтеотдачи пластов / Л.К. Алтунина, В.А. Кувшинов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Физика. Химия. – 2013. – № 2. – С. 46-76.
- [3] Портнягин А.С., Федорова А.Ф., Шиц Е.Ю., Шилова Ю.Э. Изучение свойств полимерных

- растворов и эффективности вытеснения ими нефти в специфических условиях месторождений Юго-Западной Якутии // Наука и образование. – 2013. – № 2(70). – С. 46-50.
- [4] Крикунов, В.В. Реологические свойства водонефтяных эмульсий, образованных высокоминерализованными пластовыми рассолами / В.В. Крикунов, Е.В. Бобров, В.И. Шилов [и др.] // Вестник Тюменского гос. ун-та. – 2007. – №3. – С. 10-20.
- [5] Шиц Е. Ю., Федорова А.Ф., Портнягин А.С. Экспериментальное определение влияния закачки раствора ППД на коллекторские свойства продуктивных горизонтов Иреляхского ГНМ // Наука и образование. – 2006. – № 1. – С. 44-48.
- [6] Кирбижекова, Е.В. Зависимость реологических свойств водонефтяных эмульсий от содержания и минерализации водной фазы / Е.В. Кирбижекова, И.В. Прозорова, Н.В. Юдина, Н.Ю. Марголис // Нефтяное хозяйство. – 2013. – №10. – С. 112-115.
- [7] Федорова А.Ф., Портнягин А.С. Особенности взаимодействия высокоминерализованной пластовой воды Иреляхского ГНМ с растворами полимеров // Вода: химия и экология. – 2011. – № 12(42). – С. 94-97.

ИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВА НЕФТЕЗАГРЯЗНЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ БИОДЕГРАДАЦИИ

Юлия Глязнецова, Ираида Зуева, Ольга Чалая, Сара Лифшиц, Ольга Львова
ФГБУН ФИЦ «ЯНЦ СО РАН» «Институт проблем нефти и газа СО РАН»,
677007, Россия, г. Якутск, ул. Автоторожная, 20

CHANGES IN THE COMPOSITION OF OIL POLLUTION IN THE PROCESS OF BIODEGRADATION

Yuliya Glyaznetsova, Iraida Zueva, Olga Calaya, Sara Lifshits, Olga Lvova
Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, 20, Avtodorozhnay str., Yakutsk, 677007, Russia

Annotation. The paper presents the results of a model experiment on the bioremediation of oil-contaminated permafrost soils using the biological product developed in the laboratory and based on hydrocarbon-oxidizing microorganisms. According geochemical data it was found that in the process of biodegradation of oil pollution against the background of an increase in amount of hydrocarbon-oxidizing microorganisms in soils, the residual oil content had decreased. At the same time, the content of hydrocarbons in the composition of residual oil pollution had decreased by two times and resin-asphaltene components and oxygen-containing compounds had increased significantly. In the individual composition of saturated hydrocarbons, a decrease in low molecular weight n-alkanes and an increase in isoalkanes was noted, which indicated the occurrence of processes of biochemical oxidation of petroleum hydrocarbons. It was shown that with a total degree of pollution degradation of 84% over 2 growing seasons, due to the self-purification of soils during natural degradation, the residual content of oil products decreased by 17% and by 67% due to the use of a biological product. The results obtained can be used in the development of new effective biological preparations for a remediation of oil-contaminated permafrost soils.

1. Введение

В условиях Севера процессы самовосстановления почв протекают крайне медленно. Нефтезагрязнение может долгие годы негативно влиять на сложившийся хрупкий северный биоценоз и разрушать его, мигрировать в реки и водоемы, расширяя границы загрязнения [1, 2]. Вследствие этого необходима разработка эффективных и экологически чистых способов очистки почв, подвергшихся загрязнению нефтью и нефтепродуктами (НП), а также мониторинг процесса восстановления нарушенных земель. Как правило, при мониторинге учитывается только снижение содержания НП в почвах после очистки, а продукты трансформации нефтезагрязнения остаются неучтенными. Под влиянием солнечной радиации, окислительной и бактериальной деструкции происходит преобразование нефтяных углеводородов (УВ) в гетероорганические соединения, которые по своей токсичности могут превосходить исходные нефтяные компоненты. В связи с этим, для определения качественного состава загрязнения и его изменения в процессе биodeградации необходимы исследования с применением комплекса современных методов анализа [3-5].

2. Материал и методы исследований

В данной работе извлечение НП из почв выполнено методом холодной экстракции хлороформом. Далее хлороформенные битумоиды (ХБ) исследовали с применением комплекса аналитических методов: ИК-Фурье спектроскопии для изучения структурно-группового состава ХБ; жидкостно-адсорбционной колоночной хроматографии для определения группового компонентного состава ХБ; хромато-масс-спектрометрии для определения индивидуального состава насыщенных УВ [4]. Объектом исследований послужил

нефтезагрязненный участок на территории, расположенной на юго-западе Республики Саха (Якутия), на котором проводились экспериментальные работы по биологической очистке почв с применением разработанного в институте биопрепарата на основе аборигенных углеводородокисляющих микроорганизмов [6]. Продолжительность эксперимента составила 2 вегетационных сезона.

Материалом для исследований послужили мерзлотные почвы с экспериментальных участков, отобранные до и после проведения биологической очистки. Пробы отбирали в течение каждого сезона с мая по сентябрь. Полученные результаты сравнивались с результатами контрольного опыта (без обработки биопрепаратом).

3. Результаты исследований

Исходное содержание НП в почвах, которое определяли по выходу ХБ, составляло в среднем 32223 мг/кг (таблица 1), что соответствует высокому уровню загрязнения по классификации [7]. В течение всего эксперимента в почвах наблюдалась четко выраженная динамика снижения остаточного содержания НП по сравнению с контрольным участком, где очистка не проводилась. За 1 сезон степень деструкции нефтезагрязнения составила $K_{\text{дестр.}}$ 54 % и 84 % за 2 сезона. Через 2 сезона после биологической очистки концентрация НП в почвах снизилась до 5130 мг/кг (таблица 1).

Таблица 1 – Остаточное содержание НП С(НП), мг/кг в почвах экспериментальных участков

| № опытного участка | Время | | | | | | | |
|----------------------|---------|-------|----------|-------------------------|---------|-------|----------|-------------------------|
| | 1 сезон | | | | 2 сезон | | | |
| | май | июль | сентябрь | $K_{\text{дестр.}}$, % | май | июль | сентябрь | $K_{\text{дестр.}}$, % |
| Контроль | 34391 | 32275 | 30692 | 6 | 29823 | 28636 | 28598 | 17 |
| 1 | 37782 | 21411 | 21116 | 44 | 19742 | 10844 | 7050 | 81 |
| 2 | 27179 | 20202 | 10976 | 60 | 9537 | 7669 | 5387 | 80 |
| 3 | 30525 | 20781 | 13575 | 56 | 12147 | 8115 | 5360 | 82 |
| 4 | 32978 | 21333 | 11740 | 64 | 10689 | 7785 | 3862 | 88 |
| 5 | 24216 | 12137 | 12125 | 50 | 11096 | 8942 | 4939 | 80 |
| 6 | 34000 | 27458 | 14735 | 57 | 13402 | 9276 | 5936 | 83 |
| 7 | 35787 | 28587 | 16463 | 54 | 15101 | 9220 | 3960 | 89 |
| 8 | 35220 | 25156 | 16779 | 52 | 15258 | 8237 | 5032 | 86 |
| 9 | 26762 | 19554 | 13215 | 51 | 12006 | 6825 | 3852 | 86 |
| 10 | 24275 | 20193 | 11103 | 49 | 10099 | 7563 | 3964 | 84 |
| 11 | 41893 | 31363 | 18672 | 55 | 17652 | 7278 | 5624 | 87 |
| 12 | 36054 | 23222 | 17069 | 53 | 16139 | 9785 | 6598 | 82 |
| Среднее С(НП), мг/кг | 32223 | 22616 | 14797 | 54 | 13572 | 8462 | 5130 | 84 |

Детальное изучение состава почвенных битумоидов дает возможность судить об эффективности очистки и направленности в изменении качественных характеристик отдельных составляющих нефтяного загрязнения. Результаты мониторинга биодegradации нефтезагрязнения в почвах опытных участков позволили проследить динамику изменения его состава.

В групповом компонентном составе в почвах контрольного участка наблюдалось уменьшение углеводородных компонентов и увеличение смол и асфальтенов. Эта же динамика более выражена в почвах после биологической очистки. Как видно из таблицы 2 количество углеводородных компонентов уменьшилось в 2 раза и значительно увеличилось содержание

смолистых-асфальтеновых компонентов. Как известно, ароматические УВ являются наиболее токсичными для природных биоценозов, включая почвенные, и трудно поддаются разрушению [2 - 4]. В тоже время токсическое действие смолисто-асфальтеновых компонентов на экосистемы мало изучено. Смолисто-асфальтеновые компоненты нефти – соединения со сложной высокомолекулярной химической структурой с фрагментами гетероорганических элементов, обладают гидрофобностью и труднее всего поддаются деструкции. В целом, их влияние на почвенные экосистемы заключается не в химической токсичности, а в большей степени в нарушении водно-физических свойств почв [4].

По данным ИК-Фурье спектроскопии в процессе биодegradации нефтезагрязнения отмечено постепенное увеличение количества кислородсодержащих соединений – карбонильных групп (полоса поглощения 1710 см^{-1}) и эфирных связей (1170 см^{-1}). Это отражает процессы окисления нефтяных УВ с образованием карбоновых кислот и сложных эфиров. Отмечается увеличение в 5,5 раз относительных коэффициентов поглощения карбонильных групп D_{1700}^1 и в 4 раза эфирных связей D_{1170}^1 по отношению к углеводородным (рисунок 1).

Таблица 2 – Характеристика группового состава ХБ и насыщенных УВ проб почв опытных участков

| Показатели | Исходное загрязнение | После биологической очистки | | Контроль ч/з 2 сезона |
|---|----------------------|-----------------------------|-----------|-----------------------|
| | | 1 сезон | 2 сезон | |
| Групповой состав ХБ: | | | | |
| УВ, % | 70 | 54 | 35 | 50 |
| Смолы+асфальтены, % | 30 | 46 | 65 | 47 |
| Групповой состав алкановых УВ,% на Σ идентифицированных алканов: | | | | |
| н-алканы | 49,73 | 57,70 | 74,99 | 36,98 |
| изопреноиды | 19,16 | 25,00 | 12,56 | 34,67 |
| 2-и 3-метилалканы | 13,51 | 7,99 | 10,21 | 10,58 |
| 12-и 13-метилалканы | 17,60 | 9,31 | 2,24 | 17,77 |
| н.к.- nC_{20}/nC_{21} -к.к. | 1,17 | 1,40 | 0,13 | 1,12 |
| Максимум н-алканов | $nC_{15,17}$ | nC_{15} и nC_{25-27} | nC_{27} | $nC_{15,17}$ |
| Индекс нечетности СРІ | 1,05 | 1,11 | 6,53 | 1,12 |
| Изопреноиды/н-алканы | 0,39 | 0,43 | 0,17 | 0,94 |
| $Pt+Ph/nC_{17}+nC_{18}$ | 1,17 | 1,99 | 2,66 | 2,01 |

В процессе биологической очистки в почвах изменился состав насыщенных УВ как по соотношению внутри гомологических рядов, так и между различными рядами гомологов. В их составе увеличилось содержание н-алканов, а среди них высокомолекулярных гомологов. Максимум н-алканов сдвинулся с $nC_{15,17}$ на nC_{27} , снизилось содержание изопреноидов. Значительно увеличилось значение индекса нечетности СРІ (отношение н-алканов с нечётным числом атомов углерода в молекуле к –алканам с чётным числом атомов углерода) (таблица 2). Отношение $Pt+Ph/nC_{17}+nC_{18}$, которое многими исследователями используется как коэффициент биодegradации нефти или нефтезагрязнения [2-4], постепенно увеличивалось и к концу эксперимента в 2,7 раз превышало значение исходного загрязнения (таблица 2). Присутствие характерных биомаркеров 12, 13-метилалканов указывает на тип загрязнителя, которым послужила нефть, которая транспортируется по нефтепроводу «Восточная Сибирь – Тихий океан». Значительное снижение содержания этих УВ в процессе эксперимента также отражает динамику протекавших процессов биодеструкции насыщенных УВ. В контрольном участке за время эксперимента состав насыщенных УВ изменился в меньшей степени по сравнению с исходным загрязнением (таблица 1), что отражает медленно протекающие процессы деструкции нефтяных УВ в мерзлотных почвах.

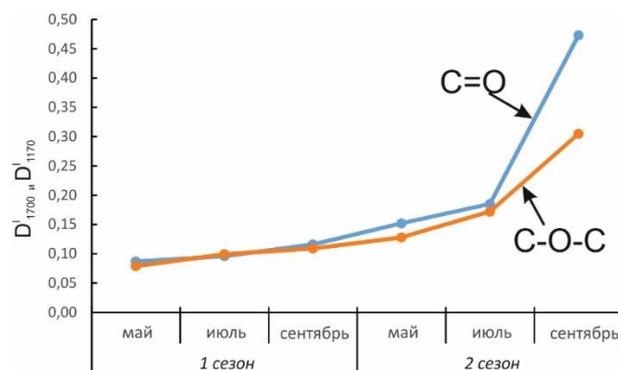


Рисунок 2 – Изменение относительного коэффициента поглощения карбонильных групп и эфирных связей.

4. Выводы

Анализ полученных данных показал, что в процессе биодegradации в химическом составе нефтезагрязнения происходят изменения, отражающие деструкцию нефтяных УВ. Уменьшается содержание углеводородных компонентов и увеличивается количество неуглеводородных – смол и асфальтенов. В составе ХБ почв после очистки увеличивается количество кислородсодержащих групп и связей – карбонильных, эфирных, гидроксильных, что отражает протекание процессов окисления УВ с образованием спиртов и альдегидов, кетонов, кислот и сложных эфиров. В составе насыщенных УВ изменяется тип хроматограмм от типичных для нефтезагрязненных почв с максимумом n-алканов на $nC_{15,17}$ до близких к фоновым со сдвигом максимума в высокомолекулярную область на nC_{27} ; уменьшается содержание n-алканов и увеличивается изоалкановых УВ; также увеличивается значение коэффициента CPI от ≤ 1 , присущего нефтям, до $CPI > 1$, характерного для фоновых проб; увеличивается и коэффициент биодegradации; уменьшается содержание биомаркеров состава 12- и 13-метилалканов.

Таким образом, при общей степени дegradации загрязнения 84 % за 2 сезона на процессы самоочистки почв за счёт естественной дegradации приходится 17 % и 67% за счет применения биопрепарата.

Использование аналитических возможностей различных методов и их сочетание позволяют, наряду с определением содержания НП, определять качественный состав нефтезагрязнения и его изменения в процессе биодegradации, что важно при создании новых эффективных биопрепаратов для очистки мерзлотных почв Якутии, выборе технологий для биоремедиации нарушенных земель и оценке качества очистных работ.

5. Благодарности

Исследования выполнены 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.

6. Литература

- [1] Oborin A.A., Khmurchik V.T., Ilarionov S.A., Markarova M.Yu., Nazarov A.V. Oil-contaminated biocenoses. – Perm: Permskiy gosudarstvenniy univercitet UB RAS, 2008. – 511 p.
- [2] Margesin R., Schinner F. Biodegradation and bioremediation of hydrocarbons in extreme environments // Applied Microbiology and biotechnology. – 2001. – Vol. 56. – No. 5-6. – P. 650-663.
- [3] Temerdashev Z.A., Pavlenko L.Ph., Karpokova I.G., Ermakova Ya.S., Ekilik V.S. Some methodological aspects of oil pollution evaluation of water bodies based on the degradation of petroleum products over time // Analytics and Control. – 2016. – Vol. 20. – No 3. – P. 225-235.

- [4] Glyaznetsova Yu.S., Zueva I.N., Chalaya O.N., Lifshits S.Kh. Oil pollution of soils and bottom sediments in the territory of Yakutia (composition, distribution, transformation). – Yakutsk: Askhaan, 2010. – 160 p.
- [5] Brodskii E.S., Lukashenko I.M., Kalinkevich G.A., Savchuk S.A. Identification of petroleum products in environmental samples using gas chromatography and gas chromatography-mass spectrometry // Journal of Analytical Chemistry. – 2002. – Vol. 57. – No. 6. – P. 486-490.
- [6] 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.
- [7] Goldberg, V.M., Zverev, V.P., Arbuzov, A.I., Kazennov, S.M., Kovalevskiy, Yu.V., Putilina Technogenic pollution of natural waters by hydrocarbons and its ecological consequences. – M.: Nauka, 2001. – 94 p.

СОДЕРЖАНИЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ПОЧВАХ В ЗОНЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕХНОГЕНЕЗА

Анна Гололобова

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

CONTENT AND DISTRIBUTION OF MICROELEMENTS IN SOILS IN THE AREA OF TECHNOGENESIS IMPACT

Anna Gololobova

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

Annotation. The extraction of natural mineral resources leads to a negative impact on the environment. Under conditions of intense multicomponent flows of pollutants, the most static cover is the soil cover, since it accumulates components of aerosols and suspended particles. The study is aimed at determining the regularities of the spatial distribution of microelements and at establishing the sources of their entry into the soil cover on the territory of the industrial site of the Udachny Mining and Processing Division. Methods used in the work - potentiometric, colorimetric, atomic absorption, statistical methods (descriptive, normal distribution analysis, spatial). It has been established that the coefficients of variation of trace elements in the upper soil layer of the study area are distributed in the following descending order: Zn>Ni>Mn>Cr>Co>Pb>Cd>As. The concentrations of the elements Pb, Ni, Cd, Co, Cr, Zn, and As in the surface soil layer of the study area do not have a normal distribution, with the exception of Mn. The main sources of pollution were identified. The content of Co, Cr and Ni in the surface layer of the soil is affected by the Udachny kimberlite pipe quarry and tailing dump no. 1, Zn – by the residential area of Udachny, As – by the polygon of highly mineralized brines.

1. Введение

Добыча природных минеральных ресурсов приводит к негативному воздействию на состояние окружающей среды. Приоритетным в разработке твердых полезных ископаемых является открытый способ добычи, который оказывает крайне неблагоприятное влияние на экологическое состояние компонентов природной среды [1, 2]. В условиях интенсивных многокомпонентных потоков загрязняющих веществ наиболее статичным является почвенный покров, так как в нем накапливаются компоненты аэрозолей и взвешенных частиц. Почва – депонирующий компонент окружающей среды, который отражает загрязнение атмосферного воздуха на территории за многолетний период. В условиях техногенеза, депонирующие свойства почв проявляются особенно ярко. В почвенном покрове происходит накопление тяжелых металлов (ТМ), которые поступают с выбросами горнодобывающих предприятий и автотранспорта. Соединения ТМ являются чрезвычайно опасными [3-5]. Поэтому важно иметь сведения содержания и распределении элементов-токсикантов в почвенном покрове, а также источники их поступления.

2. Материал и методы исследований

В качестве объекта исследования выбраны доминирующие типы почв Далдынского кимберлитового поля, в пределах Удачинского горно-обогатительного комбината (далее Удачинский ГОК) АК «АЛРОСА» (ПАО) – одно из крупнейших промышленных предприятий Якутии.

В составе общей площади почвенного покрова Далдыно-Алакитского района криоземы (по классификации WRB Cryosols) занимают 40,7 %. Мерзлотные аллювиальные (по WRB Fluvisols) почвы являются интразональным типом и в пределах данной территории

располагаются на 19,4 % площади. Подчиненными типами являются мерзлотные дерново-карбонатные неполноразвитые (по WRB Rendzic Leptosols) и мерзлотные дерново-глеевые почвы (по WRB Umbric Gleysols) [6].

Опробование почв на территории исследования проводилось из поверхностного слоя почв на глубину 0–20 см, где происходят основные изменения физико-химических свойств, связанные с антропогенной нагрузкой. Всего отобрано 42 пробы почвенного материала.

В подготовленных почвенных образцах определяли следующие параметры: показатель pH в суспензии почвы 1:2,5 методом потенциометрии на pH-метре S220 Mettler Toledo Seven Compact Advanced; содержание органического вещества (гумуса) по И.В. Тюрину методом колориметрии на спектрофотометре ПЭ-5300ВИ; подвижные формы Pb, Ni, Mn, Cd, Co, Cr, Zn и As методом атомно-абсорбционной спектрометрии на МГА-1000 ГК Люмэкс в экстрагенте 1 Н HNO₃. Микроэлементы и тяжелые металлы, извлекаемые 1 Н HNO₃, представляют собой максимальное содержание потенциально доступных металлов в растениях [7].

Перед статистическим анализом распределение набора данных оценивали с помощью методов «Box-plot» и гистограммы Шапиро-Уилка ($p < 0,05$); если значение распределения не было нормальным, данные преобразовывались в соответствии с принципами анализа композиционных данных (CoDa) с использованием центрированного логарифмического преобразования (clr) – нового подхода, который недавно доказал свою пригодность [8, 9].

Пространственный анализ позволяет выявить пространственные закономерности формирования ареалов загрязнения и их источники, представляющих угрозу экологического риска [10]. На основании опорных точек, взятых в разных местах поверхности, интерполирована непрерывная поверхность.

Данные были обработаны с применением программ Microsoft Excel 2013, Statistica 6.0, OriginPro 2021, Surfer.

3. Результаты исследований

Описание основных статистических показателей свойств почв и концентрации микроэлементов в почвенном покрове промышленной площадки Удачинского горно-обогатительного комбината представлены в таблице 1.

pH почвы колеблется от 6,3 до 7,4. По показателю pH видно, что пространственная вариабельность совсем мала ($CV=0,7$ %). Содержание органического вещества (гумуса) в верхнем слое почв исследуемой территории достаточно высокое и характеризуется высокой пространственной изменчивостью ($CV=68$ %).

Таблица 1 – Описательная статистика свойств почв и содержания подвижных форм микроэлементов на территории промышленной площадки Удачинского ГОКа (n=42)

| Элементы, мг/кг | Mean | Geom. mean | Median | Min | Max | CV | SD |
|-----------------|------|------------|--------|-------|-----|------|-----|
| Pb | 2,3 | 1,5 | 2,5 | 0,1 | 5,2 | 2,5 | 1,6 |
| Ni | 13 | 8,5 | 17 | 0,4 | 27 | 78 | 8,8 |
| Mn | 30 | 30 | 31 | 16 | 40 | 40 | 6,4 |
| Cd | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,004 | 0,9 | 0,03 | 0,2 |
| Co | 3,9 | 2,3 | 4,8 | 0,03 | 7,5 | 7,3 | 2,7 |
| Cr | 4,5 | 2,5 | 4,8 | 0,1 | 8,5 | 11 | 3,3 |
| Zn | 21 | 12 | 16 | 1,3 | 101 | 499 | 22 |
| As | 0,2 | 0,1 | 0,2 | 0,02 | 0,7 | 0,02 | 0,2 |
| pH | 7,8 | 7,8 | 8,1 | 6,3 | 9,1 | 0,7 | 0,8 |
| SOM, % | 6,3 | 3,3 | 3,5 | 0,4 | 34 | 68 | 8,3 |

Примечание: Mean – среднее арифметическое; Geom. mean – среднее геометрическое; Median – медиана; Min – минимальное значение; Max – максимальное значение; CV (coefficient of variation) – коэффициент вариации, %; SD (standard deviation) – стандартное отклонение.

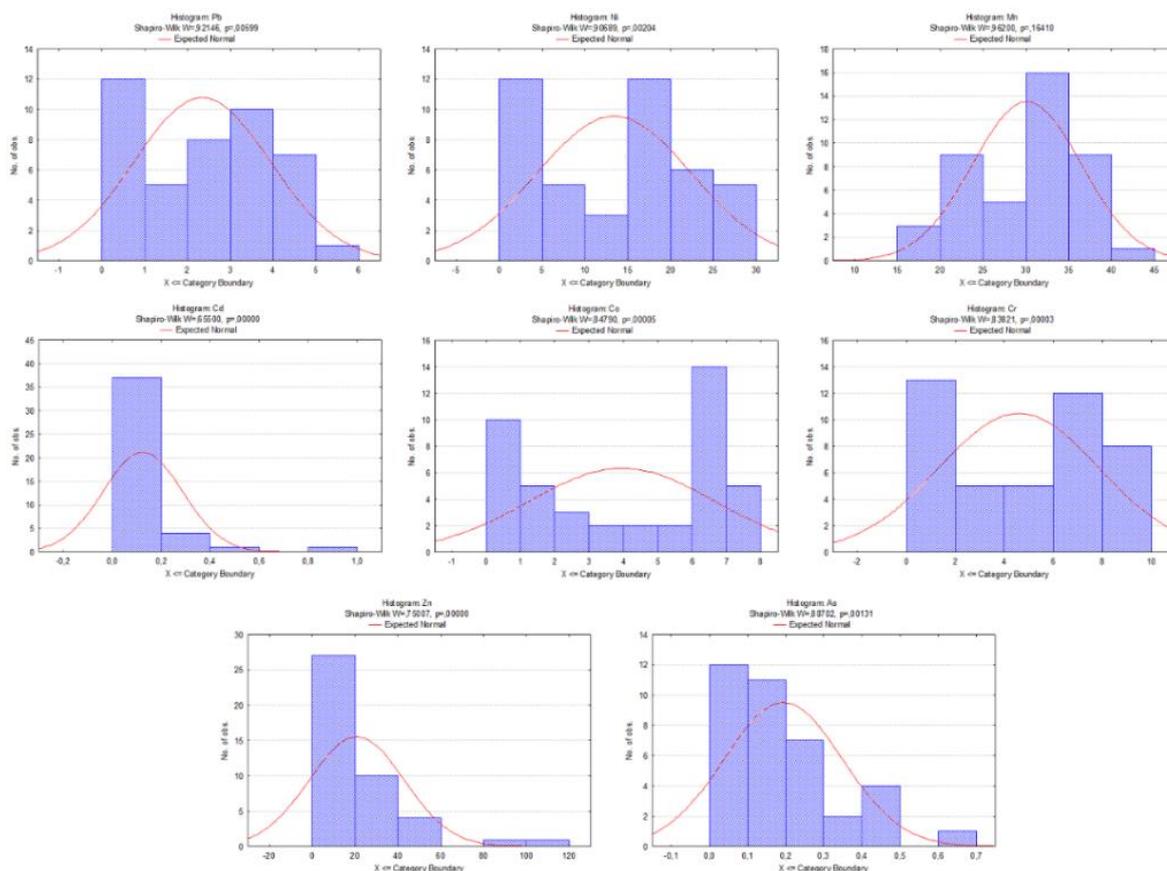


Рисунок 1 – Гистограмма распределения микроэлементов по Шапиро-Уилка.

Коэффициенты вариации микроэлементов в верхнем слое почвы Удачинского горно-обогатительного комбината уменьшается в порядке $Zn > Ni > Mn > Cr > Co > Pb > Cd > As$. Распределение As, Cd, Pb, Co, Cr и Mn на территории исследования является более гомогенными, чем распределение Ni и Zn.

В природе содержание элементов подчиняется нормальному распределению при отсутствии других источников поступления поллютантов (например, антропогенных поступлений) [11]. По гистограмме Шапиро-Уилка (рисунок 1), концентрации элементов Pb, Ni, Cd, Co, Cr, Zn и As в поверхностном слое почв исследуемой территории не имеют нормального распределения, что указывает на то, что на них могут сильно влиять внешние факторы. Mn показал приблизительно нормальное распределение и указывает, что данный элемент имеет связь с почвообразующим материалом.

Анализ коробчатых диаграмм «Box-plot» (рисунок 2) показал, что у Pb, Zn и As медиана находится примерно в середине шкалы процентилей; в диаграммах Ni, Mn, Cd, Co и Cr срединная линия проходит почти посередине прямоугольника. В случае Cd, Zn и As есть несколько экстремальных выбросов, которые указывают на присутствие точек с высокими концентрациями, возможно, связанные также с внешними факторами.

Карты распространения исследуемых микроэлементов в почвенном покрове промышленной площадки Удачинского ГОКа представлены на рисунке 3. Тенденции распределения Co, Cr, Mn и Ni в верхних горизонтах почв являются схожими, что свидетельствует о их когерентности и об едином источнике поступления. Наиболее высокие концентрации отмечены непосредственно в зоне влияния карьера кимберлитовой трубки «Удачный» и хвостохранилища №1.

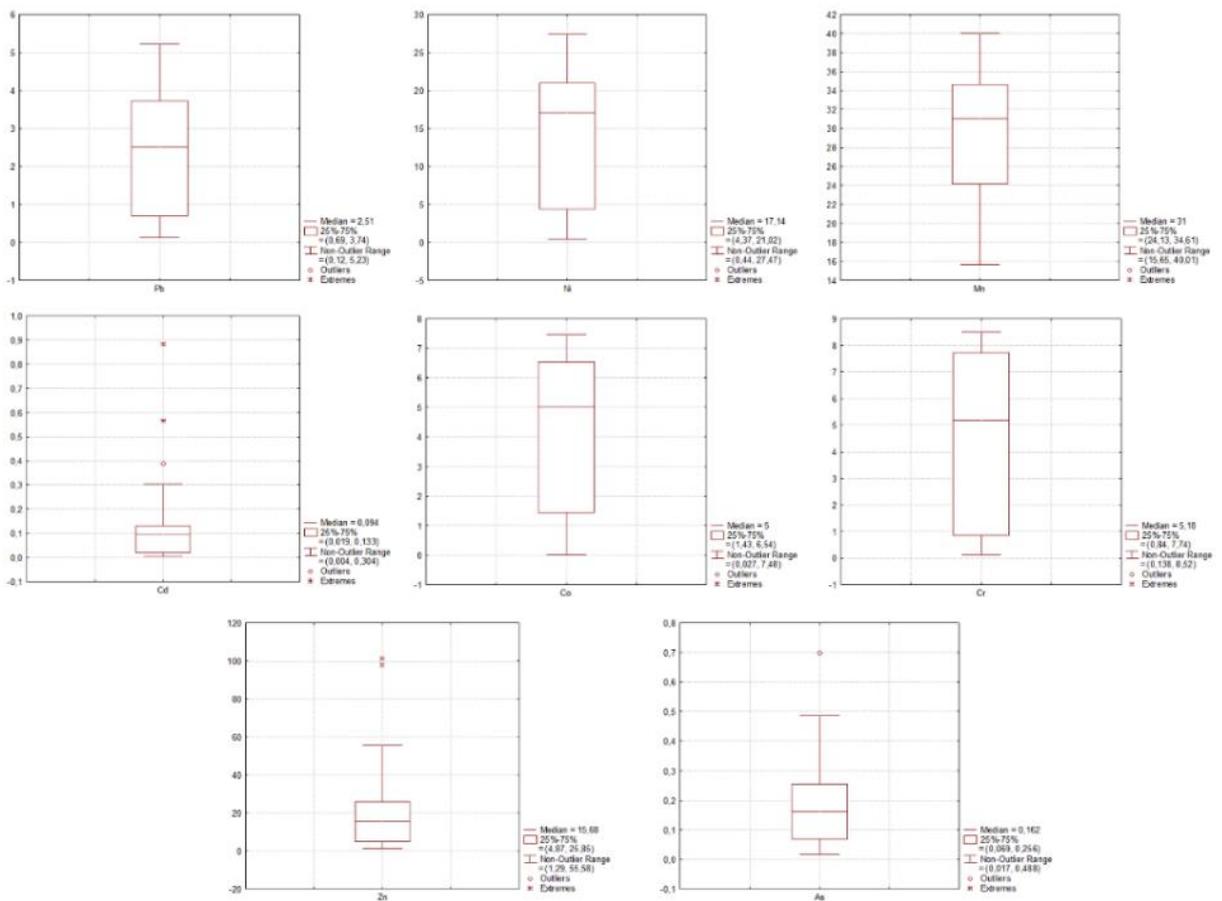


Рисунок 2 – Коробчатая диаграмма «Box-plot» распределения микроэлементов.

Распределение Zn в поверхностном слое почв отличается. Очаг загрязнения Zn находится непосредственно на территории города Удачный. Исходя из этого, можно сказать, что почвенная нагрузка этих металлов в поверхностном слое почвы происходит за счет воздействия антропогенных факторов, но источники поступления этих элементов разные.

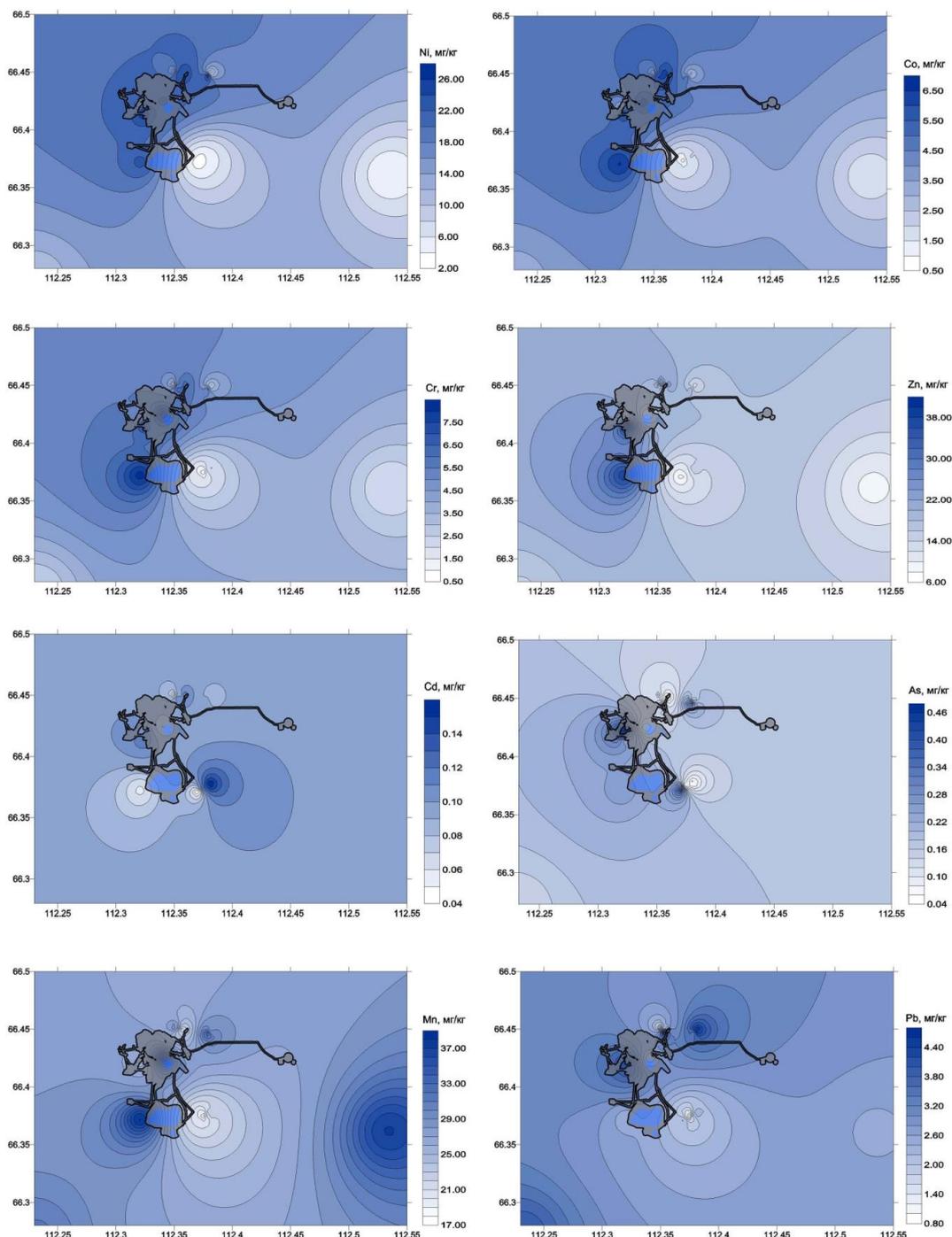


Рисунок 3 – Пространственное распределение микроэлементов на поверхностном слое почв территории промышленной площадки Удачинского ГОКа.

Пространственное распределение Cd и Pb не имеет привязки к объектам территории промышленной площадки УГОКа и города Удачный. Можно сделать вывод, что исходные материалы и естественные процессы повлияли на аккумуляцию Cd и Pb в поверхностных горизонтах почв, что согласуется и с их различными моделями пространственного распределения.

Распространение As имеет очаг высокой концентрации в районе воздействия полигона дренажных рассолов и высокоминерализованных вод «Октябрьский». Таким образом, возможно, что источниками поступления As в поверхностный слой почвы являются как природные, так и антропогенные факторы, например в результате аварийных разгрузок нагнетательных скважин на полигоне «Октябрьский».

3. Выводы

На основании проведенных исследований определено, что в почвенном покрове промышленной площадки Удачинского ГОКа на территории Далдынского кимберлитового поля распространение микроэлементов не соответствует нормальному распределению из-за большого разброса значений. Это связано с комплексностью естественных и техногенных воздействий. Коэффициенты вариации микроэлементов в верхнем слое почв исследуемой территории распределяются в порядке убывания: Zn>Ni>Mn>Cr>Co>Pb>Cd>As.

Анализ пространственного распределения микроэлементов позволил определить основные источники и очаги загрязнения. Источником поступления Co, Cr и Ni является участок карьера кимберлитовой трубки «Удачная» и хвостохранилище № 1 обогатительной фабрики, Zn – хвостохранилище № 1, селитебный район г. Удачный, As – полигон высокоминерализованных рассолов «Октябрьский».

5. Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта Государственного задания Минобразования РФ FUEM-2019-0003 «Эколого-геохимическое изучение техногенных массивов на территории Якутской алмазоносной провинции».

6. Литература

- [1] Basova, I.A., Ioina, M.A. and Glukhova, E.N. Geoeological state of soil cover in mining regions // *Izvestiya TulGU*. – 2010. – Vol. 1. – P. 16-20.
- [2] Basova, I.A., Ivatanova, N.P. and Kopylov, A.B. Assessment of the ecological state of soils in regions with a developed mining industry // *Izvestiya TulGU*. – 2012. – Vol. 1-2. – P. 14-16.
- [3] Zhuravleva, M.A., Zubrev, N.I., Panfilova, M.I. and Efremova, S.Yu. The impact of the enterprise on the distribution of heavy metals in the sanitary protection zone of the railway // *Ecology and industry of Russia*. – 2018. – Iss. 22. – Vol. 2. – P. 52-57.
- [4] Kravtsova, M.V., Volkov, D.A., Afanas'ev, S.V., Mel'nikova, D.A. and Belik, V.S. Analysis and assessment of the level of pollution of the soil cover of industrial zones // *Ecology and industry of Russia*. – 2018. – Iss. 22. – Vol. 9. – P. 62-66.
- [5] Huang, X., Hu, J., Qin, F., Quan, W., Cao, R. and Fan, M. Heavy Metal Pollution and Ecological Assessment around the Jinsha Coal-Fired Power Plant (China) // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. – 2017. – Vol. 14(12). – P. 1589.
- [6] Legostaeva, Ya.B. Spatial and intraprofile differentiation of permafrost soils in northwestern Yakutia. Cand. Diss. – Ulan-Ude, 2005. – 143 p.
- [7] Šmejkalová, M., Mikanová, O. and Borůvka L. Effects of heavy metal concentrations on biological activity of soil micro-organisms // *Plant, Soil and Environment*. – 2003. – Vol. 49. – P. 321-326.
- [8] Mullineaux, S.T., McKinley, J.M., Marks, N.J., Scantlebury, D.M. and Doherty, R. Heavy metal (PTE) ecotoxicology, data review: traditional vs. a compositional approach // *Science of The Total Environment*. – 2021. – Vol. 769. – P. 145246.
- [9] Reimann, C., Filzmoser, P., Fabian, K., Hron, K., Birke, M., Demetriades, A., Dinelli, E. and Ladenberger, A. The concept of compositional data analysis in practice – Total major element concentrations in agricultural and grazing land soils of Europe // *Science of The Total Environment*. – 2012. – Vol. 426. – P. 196-210.
- [10] Celine, S.L., Xiangdong, L., Wenzhong, S., Sharon, C. and Iain, T. Metal contamination in urban, suburban, and country park soils of Hong Kong: a study based on GIS and multivariate statistics // *The Science of the Total Environment*. – 2006. – Vol. 356. – P. 45-61.
- [11] Zhao, Y., Wang, Z., Sun, W., Huang, B., Shi, X. and Ji, J. Spatial interrelations and multiscale sources of soil heavy metal variability in a typical urban–rural transition area in Yangtze River Delta region of China // *Geoderma*. – 2010. – Vol. 156. – P. 216-227.

ГИДРОСЛЮДИСТО-МОНТМОРИЛЛОНИТОВАЯ ГЛИНА ДЛЯ ОЧИСТКИ ОБЪЕКТОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ОТ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕНИЙ

Лариса Ерофеевская, Александр Александров, Сергей Ефимов
ФГБУН ФИЦ «ЯНЦ СО РАН» «Институт проблем нефти и газа СО РАН»,
677007, Россия, г. Якутск, ул. Автоторожная, 20

HYDROMICACEOUS MONTMORILLONITE CLAY FOR ENVIRONMENTAL CLEANUP FROM OIL CONTAMINATION

Larisa Erofeeskaya, Aleksandr Aleksandrov, Sergey Efimov
Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, 20, Avtodorozhnay str., Yakutsk, 677007, Russia

Annotation. The hydromicaceous montmorillonite clay of Markha deposit (Yakutia) has been tested as a promising oil sorbent and carrier for hydrocarbon-oxidizing microorganisms. A brief description of the material composition of physico-chemical and technological properties of clays of the deposit is given. It has been found that immobilization of oil-oxidizing microflora on the surface of clay granules promotes rapid adaptation of microorganisms to the environment, compared to the liquid microbial suspension; accelerates the processes of oil degradation in the mineral nutrient medium with oil. Hydromicaceous montmorillonite clay of Markha deposit is suitable for independent use as a sorbent for collecting oil from solid surfaces (soil, concrete). Saturation of clay with oil occurs within the first 1-2 minutes, after contact with oil, which allows preventing oil spill on the adjacent clean areas.

1. Введение

Одной из наиболее актуальных проблем в регионах развития нефтегазовой отрасли является риск загрязнения окружающей среды (ОС) нефтью и нефтепродуктами (НП) при их добыче, транспортировке и переработке. В России, наиболее полно испытавшей эту проблему, является территория Западной Сибири. Такая же ситуация может возникнуть перед Якутией в связи с ускоренным развитием в Республике собственной нефтяной промышленности и освоению известных и новых нефтяных месторождений, резкому увеличению объема геологоразведочных работ, проходки скважин, построению внутри промысловой сети нефтепроводов. Последние десятилетия многими учеными изыскиваются разнообразные пути ликвидации этих загрязнений. Наибольший интерес представляет разработка экологически безопасной и экономически выгодной рекультивации земель биологическим методом, в основу которого положена активация микробиологической деструкции нефти. Существует два способа биологической рекультивации: активация метаболической активности естественной микрофлоры путем поддержания оптимальных физико-химических условий среды [1-3] и внесение в почву специально разработанных промышленных штаммов углеводородокисляющих микроорганизмов (УОМ), внесенных в почву с биопрепаратами (БП) [4,5]. Однако вследствие длительного периода адаптации и под воздействием аборигенных микроорганизмов, с их повышенной плотностью заселения в почве, активность специально внесенных с БП микробных популяций быстро снижается. На жизнедеятельность бактерий и грибов, участвующих в биодеструкции нефтяных углеводородов (УВ) огромное влияние оказывает как состав УВ компонентов, так и время, прошедшее с момента нефтезагрязнения. Попавшие в почву легкие фракции НП с течением времени испаряются и окисляются. Происходит сокращение в составе нефти легкодоступных парафинонафтеновых низкомолекулярных УВ и истощение биогенных элементов. Изменяется качественный состав нефтяного сырья. При этом тяжелые трудно окисляемые нефтяные фракции в совокупности с продуктами метаболизма, образующимися в процессе жизнедеятельности микроорганизмов, оказывают негативное действие на почвенную микрофлору. Сдерживают процессы

восстановления почвенного плодородия. В результате гибнет растительный покров. Экосистеме наносится значительный ущерб. Все эти обстоятельства делают крайне востребованными проведение научных исследований микробиологического метода реабилитации мерзлотных почв Якутии с применением местного сырья.

Целью настоящих исследований являлось получение биопрепарата для очистки объектов ОС (воды, почвы) от нефтезагрязнений на основе местного природного сырья.

2. Краткая характеристика месторождения

Мархинское месторождение глин керамзитовых находится на левом коренном берегу р.Лены, в 11 км к северо-западу от г.Якутска.

В геологическом строении месторождения принимают участие средне- и верхнеюрские континентальные и четвертичные отложения. К отложениям *якутской свиты* средней юры приурочено тело полезного ископаемого, представленное пластовой залежью, вытянутой с юго-востока на северо-запад на расстоянии 1300 м. Ширина залежи колеблется от 200 до 500 м. Полезный слой представлен глинами, алевролита-глинистыми породами. Средняя мощность полезного слоя составляет 11, 6 м (от 1.6 до 29.1 м). Вскрышные породы представлены растительным слоем и песками разномерными глинистыми, мощностью от 0.1 до 8.5 м. Мощность внутренней вскрыши колеблется от 0.0 до 9.5 м. Средняя мощность внешней вскрыши, по подсчетным блокам, колеблется от 1.1 до 2.8 м, а внутренней вскрыши - от 0.64 до 5.3 м. Соотношение объема вскрыши к объему полезного ископаемого составляет 1:2.2. Средняя мощность полезного слоя, по подсчетным блокам, колеблется от 6 до 17 м.

По минералогическому составу глины относятся к гидрослюдисто-монтмориллонитовой. Они характеризуются нижеследующим химическим составом, %: SiO₂ - от 61.56 до 71.78; Al₂O₃ - от 13.96 до 16.73; Fe₂O₃ - 0.97 до 4.23; FeO - от 0.48 до 5.35; TiO₂ - от 0.43 до 0.92; п.п.п. - от 1.42 до 9.39 и H₂O - от 0.92 до 2.41.

Гранулометрический состав глины следующий, %: фракций крупнее 1 мм - нет; 1-0.05 мм - 10.0-70.0; 0.05-0.002 мм - 11.9-73.3 и менее 0.002 мм - 9.1-27.7.

По зерновому составу глины характеризуются преобладанием пылевой фракции. По дисперсности - относятся к грубодисперсному глинистому сырью. Число пластичности колеблется от 5.3 до 14.9 м. По среднему значению числа пластичности глины относятся к умеренно пластичным.

Технологические свойства глины изучались с целью использования их в качестве сырья для производства керамзитового гравия. Обжиг сырья проводился в слабоокислительной среде с предварительным подогревом до 100°C. Установлено, что оптимальная температура обжига находится в пределах 1200-1260°C. Интервал вспучивания 100-120°. Коэффициент вспучивания колеблется от 1.8 до 5.22. При повышении температуры подогрева до 400-500°C свойство вспучиваемости теряется совершенно.

Качество сырья не выдержано по мощности и простиранию. В мощности полезного слоя отмечаются прослойки некондиционных пород, что затрудняет эксплуатацию месторождения. В связи с этим наиболее целесообразным способом обработки месторождения является селективная выемка полезного ископаемого на основе тщательной эксплуатационной разведки. Запасы по категории А+В - составляют 3,372 и по категории С₁ - 2879 млн. м³ [6,7].

3. Материалы и методы исследований

В качестве нефтесорбента и носителя для УОМ испытана гидрослюдисто-монтмориллонитовая глина Мархинского месторождения (Якутия).

В качестве основы для получения БП использован штаммы углеводородокисляющих бактерий, выделенных из мерзлотных почв Якутии.

Для культивирования УОМ использовали вариации жидких и агаризированных минеральных питательных сред Мюнца с содержанием 1% нефти [8,9]. В жидких средах УОМ накапливали при температуре +20±1°C при 180 об/мин, в течение 6-120 суток. Деструкцию нефти

определяли визуально по наличию лизиса (растворения нефти), дезинтеграции слоя нефти и образования пигмента.

Степень деградации нефти учитывали в 3-х бальной системе, относя БП к одному из разрядов:

«+++» – высокая УВ-окисляющая активность;

«++» – удовлетворительная УВ-окисляющая активность;

«+» – слабая УВ-окисляющая активность;

«–» – БП, не способный утилизировать УВ нефти.

Испытание глины для сорбции нефти проводили в соответствии с установленным стандартом [10].

4. Экспериментальная часть и результаты исследования

Опыты показали, что насыщение испытуемой гидрослюдисто-монтмориллонитовой глины нефтью происходит практически сразу после погружения образца в нефть. Через 1 минуту нефтеемкость исследуемого образца глины достигает 0,62 г/г, через 2 минуты 0,7 г/г и не меняется в течение 6 часов.

Эксперименты по использованию глины, как носителя УОМ, показали положительные результаты. Испытаны два способа иммобилизации микробных клеток на глину:

- 1) способ непрерывного поддержания суспензии клеток в диспергированном состоянии;
- 2) простое перемешивание микробной взвеси с глиной.

При первом способе, глину подвергали стерилизации в автоклаве после чего, соблюдая асептические условия, глину смешивали с суспензией клеток УОМ, смесь инкубировали при температуре 28°C в течение 8-ми часов в качалочных условиях, при 180 об/мин.

При втором способе, глину перемешивали с микробной взвесью, с последующей иммобилизацией в течение 24 часов и контактным высушиванием в течение 48 часов.

Полученные, таким образом, БП испытывали на способность к деструкции нефти в минеральной среде Мюнца [9].

Показано, что БП, полученный при иммобилизации УОМ на глину способом непрерывного поддержания суспензии клеток в диспергированном состоянии, проявляет более высокую УВ-окисляющую активность, чем БП, полученный при иммобилизации УОМ на глину способом простого перемешивания микробной взвеси с глиной (таблица 1).

Таблица 1 – Степень деградации нефти в среде Мюнца под влиянием биопрепаратов

| Время испытания, часы | Способ иммобилизации УОМ на глину | | Суспензия УОМ | Глина без УОМ |
|-----------------------------|-----------------------------------|----------|------------------|------------------|
| | 1 способ | 2 способ | | |
| Степень деградации нефти | | | | |
| Через 6 часов | + | + | - | - |
| Через 12 часов | ++ | ++ | - | - |
| Через 24 часа | +++ | ++ | + | - |
| Через 36 часов | +++ | ++ | + | - |
| Через 48 часов | +++ | ++ | ++ | - |
| Через 72 часа | +++ | +++ | ++ | - |
| Через 96 часов | +++ | +++ | +++ | - |
| Через 120 часов | +++ | +++ | +++ | - |

С целью контроля выживаемости УОМ в БП проведен опыт по внесению БП в стерильную почву, искусственно загрязненную нефтью Талаканского месторождения. Нефть вносили в почву из расчета 100 см³ на 1 кг почвы. БП в загрязненную почву вносили из расчёта 50 г сухой формы на 1 кг почвы и 100 см³ жидкой формы БП на 1 кг почвы. Концентрация клеток УОМ, при посеве на микробиологический агар, составила: для жидкой формы БП в среднем 4 млрд. КОЕ/см³; для сухой формы БП – в среднем 6 млн. КОЕ/см³. Опыт проведен в лабораторных условиях в 3-х повторностях. В качестве контроля использовали глину без УОМ (50 г на 1 кг

почвы); суспензию УОМ без глины (100 см³ на 1 кг почвы) и стерильную нефтезагрязненную почву, не обработанную БП. Экспозиция опытов составила 90 суток. Общую численность УОМ выражали в колониеобразующих единицах (КОЕ) на абсолютно-сухой вес (АСВ) почвы. Показано, что иммобилизованные УОМ в БП сохраняют свою активность и сравнительно быстро адаптируются к нефтезагрязнению, о чем свидетельствует рост численности УОМ в опытах с почвой, обработанной БП (таблица 2).

Таблица 2 – Динамика накопления УОМ после обработки нефтезагрязненной почвы биопрепаратами

| Срок экспозиции | Способ иммобилизации УОМ на глину | | Суспензия УОМ | Глина без УОМ | Контроль почва без БП |
|-----------------|---|-------------|---------------|---------------|-----------------------|
| | 1 способ | 2 способ | | | |
| | Общая численность микроорганизмов, млн. КОЕ/г АСВ почвы | | | | |
| До внесения БП | не выделено | не выделено | не выделено | не выделено | не выделено |
| Через 1 сутки | 0,006 | 0,002 | 0,006 | не выделено | не выделено |
| Через 7 суток | 0,04 | 0,02 | 0,08 | не выделено | не выделено |
| Через 14 суток | 0,6 | 0,4 | 0,2 | не выделено | не выделено |
| Через 30 суток | 0,4 | 0,2 | 0,4 | не выделено | не выделено |
| Через 60 суток | 0,8 | 0,6 | 0,8 | не выделено | не выделено |
| Через 90 суток | 136,0 | 112,0 | 4,0 | не выделено | не выделено |

5. Выводы

Полученные результаты свидетельствуют о том, что УОМ иммобилизованные на гидрослюдисто-монтмориллонитовую глину, быстро адаптируются к условиям ОС и эффективно разрушают нефть в условиях лабораторного опыта, в сравнении с опытами, где УОМ не иммобилизовали на сорбент-носитель или в опыте с простым внесением глины в нефтезагрязненную почву. Через 90 суток общая численность УОМ в опытах с сухой формой БП значительно превышала численность УОМ в опытах с жидкой формой БП (табл. 2). Это свидетельствует о том, что гидрослюдисто-монтмориллонитовая глина является перспективным сырьем для разработки биопрепаратов и сорбентов для борьбы с нефтяными разливами и их последствиями.

6. Благодарности

Работа выполнена в рамках Госзадания Министерства науки и высшего образования РФ по Программе ФНИ № 122011200369-1 «Биогеохимия процессов формирования и разрушения углеводородных флюидов» и Научно-образовательного Центра НОЦ «Север», кластер «Рациональное природопользование в криолитозоне» с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН в рамках гранта №13.ЦКП.21.0016.

7. Литература

- [1] Kireeva N.A., Miftakhova A.M., Salakhova G.M. Growth and development of spring wheat plants on oil-contaminated soils and during bioremediation // *Agrochemistry*. – 2006. – No. 1. – P. 85-90.
- [2] Seredina V.P., Andreeva T.A., Alekseeva T.P., Burmistrova T.I., Tereshchenko N.N. Oil-contaminated soils: properties and recultivation. – Tomsk: TPU Publishing, 2006. – 270 p.
- [3] Tereshchenko N.N., Lushnikov S.V., Pysh'eva E.V. Recultivation of oil-contaminated soils. // *Ecology and industry of Russia*. – 2002. – No. 10. – P. 17-20.
- [4] Gallego J.R., Loredó J., Llamas J. F. et al. Bioremediation of diesel-contaminated soils: Evaluation of potential *in situ* techniques by study of bacterial degradation // *Biodegradation*. – 2001. – No. 12. – P. 325-335. – DOI: 10.1023/A:1014397732435.

- [5] Salem K.M., Perminova I.V., Grechishcheva N.Yu., Murygina V.P., Meshcheryakov S.V. Biorecultivation of oil-contaminated soils with humic preparations // Ecology and industry of Russia. – 2003. – No. 3. – P. 19-21.
- [6] Explanatory note to the State Geological Map of the Russian Federation scale 1:200 000. Sheet P-52-XVI. – St. Petersburg, 2004. – 120 p.
- [7] Explanatory note to the overview map of the deposits of building materials of the Yakut ASSR scale 1:2 500 000. In two volumes. Ministry of Geology of the USSR, union "Soyuzgeolfond". – Moscow, 1988. – Vol. 1. – 422 p.
- [8] Methods of soil microbiology and biochemistry Editor Zvyagintsev D.G. – Moscow: Publishing of Moscow State University, 1991. – 304 p.
- [9] Kersten D.K. Morphological and cultural properties of indicator microorganisms of oil and gas survey // Microbiology. – 1963. – No. 5. – P. 1024-1030.
- [10] GOST 33627-2015 Activated carbon. The standard method for determining the sorption characteristics of adsorbents. – M.: FSUE "STANDARTINFORM", 2016. – 10 p.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ЗАЩИТА НАРУШЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ ЛЕДОВОГО КОМПЛЕКСА В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ

Александр Жирков, Максим Сивцев

ФГБУН «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН»,
677010, Россия, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36

RESTORATION AND PROTECTION OF DISTURBED AREAS OF THE ICE COMPLEX IN CENTRAL YAKUTIA

Alexander Zhirkov, Maxim Sivtsev

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36, Permafrost str., Yakutsk, 677010, Russia

Annotation. At present, in cold regions, under the influence of climate change and the growth of technogenic load, there is an intensive degradation of permafrost rocks. This problem is extremely relevant for areas where ice-rich deposits are widespread, and in particular, where an ice complex is developed, which is most vulnerable to thermal subsidence and thermokarst processes. These processes greatly change natural and artificial landscapes and make it difficult for humans to effectively develop cold regions. Already today we are witnessing the consequences of the degradation of ice-rich deposits: damage to buildings and linear structures, degradation of agricultural land, etc. This leads to huge environmental and socio-economic costs. This situation indicates the fundamental and applied interest of our research. Fundamentally, it is associated with the search for opportunities to restore and protect the melted (disappeared) shielding (transitional) layer in natural landscapes and disturbed areas in a short time. In the applied plan - direct restoration and protection of disturbed conditions of agricultural fields, engineering structures, etc. The goal of the project is to assess degradation and the possibility of restoring and protecting devastated areas with ice-rich soils in Central Yakutia by restoring a shielding (transitional) layer. As a result of the research, the possibility of restoring lands destroyed by thermokarst using a combined method of thermal protection, including the creation of heat-insulating (restoration of vegetation cover) and heat-intensive (increased ground ice content) layers, providing an optimal level of heat transfer in the "atmosphere-soil" system during the annual cycle, for reaching the minimum depth of the active soil layer. The application of the new method will not only ensure the rapid reclamation of lands disturbed by thermokarst, but also reduce carbon emissions by reducing the degree of degradation of the upper layers of frozen rocks. On the basis of theoretical and field experiments, the main regularities of the formation of the active layer of soil when using various options for thermal protection are established, confirming the effectiveness and expediency of using the proposed method for widespread implementation in the areas of distribution of the ice complex.

Key words: permafrost, ice complex, active layer, shielding layer, permafrost degradation, restoration of the shielding layer.

1. Введение

Наблюдаемое повышение температуры воздуха в арктических и субарктических регионах значительно выше, чем в среднем в мире, что влечет по собой быструю трансформацию природной среды, в том числе многолетнемерзлых пород (ММП) [1]. Частота и величина разрушений ландшафтов, связанных с деградацией многолетнемерзлых пород, в этих регионах возрастают [2, 3]. Поскольку прогноз климатических моделей предсказывает, что в Арктике произойдет одно из самых быстрых потеплений на планете, и, как следствие, деградация ММП должно распространяться и усиливаться [1]. Разрушение ММП представляет собой существенный риск в виде усиления парникового эффекта (выброс парниковых газов) и

повреждения инженерных сооружений. Поэтому изучение процессов и механизмов при деградации многолетнемерзлых пород в современных условиях имеет большое значение, в том числе для понимания будущих изменений в арктических и субарктических регионах.

2. Результаты исследований

В настоящее время, в холодных регионах под влиянием климатических изменений и ростом техногенной нагрузки, наблюдаются процессы интенсивной деградации многолетнемерзлых пород. Эта проблема крайне актуальна для территорий, где распространены сильнольдистые отложения, и в особенности, где развит ледовый комплекс, который наиболее уязвим к процессам термопросадки и термокарста. Эти процессы очень сильно меняют естественные и техногенные ландшафты, и затрудняют эффективное освоение холодных регионов человеком. Уже сегодня мы наблюдаем последствия деградации сильнольдистых отложений: повреждения зданий и линейных сооружений, разрушение сельхозугодий, пашен и др. Это приводит к огромным экологическим и социально-экономическим издержкам. Так, на Северном форуме по устойчивому развитию, посвященный изменениям климата и реакции многолетней мерзлоты, прошедшем в конце сентября 2021 года в г. Якутске, Главой Республики Саха (Якутия) Айсеном Сергеевичем Николаевым было озвучено, что деградация мерзлоты привела к уменьшению посевной площади сельскохозяйственных культур в регионе на 57% - со 107 тыс. га в 1990 г. до 46 тыс. га в 2016 г.[4]

В настоящее время термокарст наиболее активен в открытых природных и антропогенных ландшафтах [5, 6]. Такие ландшафты характеризуются тонким (0-0,2 м) защитным слоем (защитный слой — это зона между основанием сезонно-талого слоя и кровлей подземных льдов). А на участках, покрытых бореальным лесом, его толщина достигает 0,7-1 м [5, 6]. В результате современного потепления климата происходит процесс разрушения защитного слоя, который выступает буферной зоной многолетнемерзлых пород от более глубокого протаивания [7, 8], что приводит к быстрому развитию термокарстовых процессов [9]. Деградация ММП представляет собой существенный риск в виде усиления парникового эффекта (выброс парниковых газов) и повреждения инфраструктуры. Поэтому изучение того, как развивается деградация и типизация влияющих на это факторов в современных условиях, имеют большое значение, в том числе для понимания будущих изменений в арктических и субарктических регионах. Всё это обосновывает фундаментальный и прикладной интерес наших исследований. Предлагается комплекс мер для восстановления нарушенных термокарстовыми процессами территорий ледового комплекса путем воссоздания защитного слоя [10].

Суть эксперимента:

I этап. В конце летнего периода предлагается механически разровнять просевшую дневную поверхность (проведение планировки) бульдозером и спецтехникой. Далее устанавливаются температурные и влажностные логгеры для мониторинга термовлажностного режима грунтов. Определяются реперные точки для наблюдения за динамикой деятельного слоя прямыми методами. В конце сконструированная экспериментальная площадка огораживается.

II этап. Поздней осенью этого же года, перед началом заморозков планируется проведение оросительных работ для увлажнения ранее разровненной территории до оптимальных значений (в зависимости от количества летних осадков), при которых вся влага в деятельном слое промерзает. Данный этап очень серьезный и ответственный, так как переувлажнение в данном случае грозит усилением процесса термокарста и провалом эксперимента. А недостаточное орошение – получением некондиционных данных. Поэтому, перед орошением необходимо рассчитать оптимальное количество орошаемой влаги, в зависимости от влажностного режима грунтов.

III этап. Зимой (декабрь, январь) планируется проведение снегоочистительных или снегоуплотнительных работ, для получения более глубокого промерзания увлажненных грунтов. Выбор того или иного мероприятия будет зависеть от количества снега в этот период. Выполнение всех необходимых мероприятий при оптимальных расчётных значениях увлажнения должно привести к восстановлению защитного слоя.

IV этап. Весной следующего года, для дальнейшего сохранения восстановленного защитного слоя требуются незамедлительные рекультивационные мероприятия, в случае сельскохозяйственных территорий возобновление посевных работ. В естественных ландшафтах - высадка деревьев для создания лесного массива.

Применение предложенной методики по рекультивации разрушенных термокарстом территорий позволит восстановить заброшенные пашни или защитить используемые, остановив процесс термокарста.

В настоящий момент получены данные годового цикла наблюдений натурального эксперимента. Ниже представлены изменение температурного режима грунтов в трех экспериментальных участках (рис. 1) в сентябре 2021 г. и в сентябрь 2022 г. (рис. 2).



Рисунок 1 – Схема расположения экспериментальных участков.

Красными выделены участки работ:

скв. № 1, 2, 3, 4 – экспериментальный участок № 1 действующая пашня;

скв. № 5, 6, 7, 8 – экспериментальный участок № 2 деградируемый участок ледового комплекса;

скв. № 9 и 10 – контрольная площадка с естественными не тронутыми условиями, участок № 3

Мерзлота на глубине 2,5-10 м имеют высокотемпературный характер от $-0,9$ до $-0,4$ °С, что свойственно деградирующим ландшафтам. По криолитологическому строению на этих глубинах залегают подземные льды, которые, судя по температурам, близки к процессу фазового перехода.

Наибольшее понижение температуры ММП наблюдается на участке №1 (действующая пашня), где проведена только снегоочистка (рис. 2). Глубже деятельного слоя температура грунтов за год понизилась на $0,3-0,9$ °С.

На участке №2 входе засыпки в 2021 г. ложбины просадки привозным грунтом искусственно увеличилась глубина сезонно-талого слоя, также увеличилась теплоёмкость грунтов при орошении перед началом заморозков (см. рис. 24-26). По этой причине процесс охлаждения в основном протекает в деятельном слое и с глубиной затухает, при этом температура ММП понизилась на $0,15-0,73$ °С.

На участке №3 эксперименты по изменениям условий не проводились, поэтому температуры считаются естественными. При проходке скважин на глубине 2,5 м были вскрыты ПЖЛ и до 10 м не пройдены. Температура в толще льда понижается от $-0,45$ (2,5 м) до $-0,9$ °С (10 м), такие

значения не характерны для других участков Центральной Якутии с похожими ландшафтными условиями. Состояние высокотемпературных ПЖЛ очень чувствительно реагирует на малейшее изменение климата, поэтому для сохранения криолитозоны территорий с такими условиями необходимы срочные меры, одним из которых, собственно, является предложенный комплексный подход.

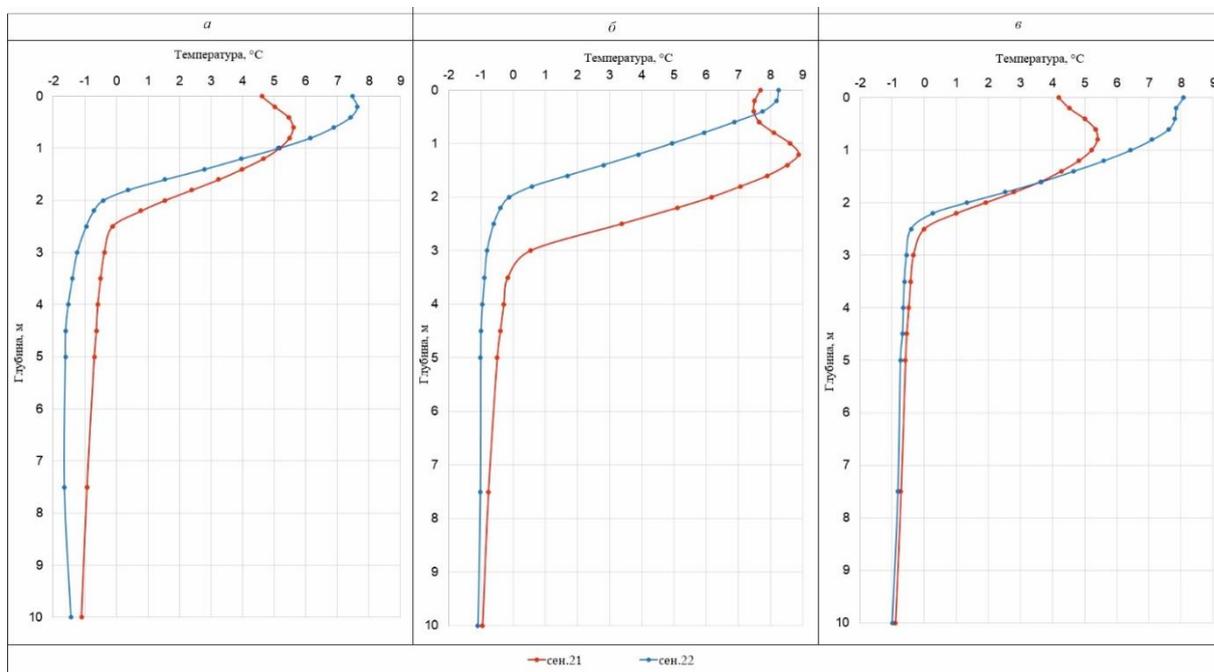


Рисунок 2 – Среднемесячная температура грунтов за сентябрь месяц 2021 и 2022 гг.
а – участок №1, б – участок №2, в – участок №3.

3. Выводы

Доказана возможность восстановления разрушенных термокарстом земель с помощью комбинированного способа тепловой защиты, включающего создание теплоизоляционного (восстановление растительного покрова) и теплоемкого (увеличение льдистости грунта) слоев, обеспечивающих оптимальный уровень теплообмена в системе «атмосфера-грунт» в течение годового цикла, для достижения минимальной глубины деятельного слоя грунта. Применение нового способа позволит не только обеспечить скорую рекультивацию нарушенных термокарстом земель, но и сократить объем выбросов углерода за счет снижения степени деградации верхних слоев мерзлых пород. На основании теоретического и натурного экспериментов установлены основные закономерности формирования деятельного слоя грунта при использовании различных вариантов тепловой защиты, подтверждающие эффективность и целесообразность использования предлагаемого способа для широкого внедрения на территориях распространения ледового комплекса.

4. Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 21-55-15013 НЦНИ_а.

5. Литература

- [1] The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). – URL: <https://www.ipcc.ch/2019/>
- [2] Osterkamp, T.E. The Recent Warming of Permafrost in Alaska // *Glob. Planet. Chang.* – 2005. – 49. – P. 187-202.
- [3] Jorgenson, M. Thermokarst terrains, in *Treatise on Geomorphology*, vol. 8, edited by J. Shroder, R. Giardino, and J. Harbor, chap. Glacial and Periglacial Geomorphology. – San Diego, Calif.: Academic Press, 2013. – P. 313-324
- [4] <https://tass.ru/interviews/12509211>

- [5] Fedorov, A.N.; Iwahana, G.; Konstantinov, P.Y.; Machimura, T.; Argunov, R.N.; Efremov, P.V.; Lopez, L.M.C.; Takakai, F. Variability of permafrost and landscape conditions following clear cutting of larch forest in Central Yakutia // *Permafr. Periglac. Process.* – 2017. – 28. – P. 331-338.
- [6] Fedorov A.N. The influence of boreal forest dynamics on the current state of permafrost in Central Yakutia / A. N. Fedorov, P. Y. Konstantinov, N. F. Vasilyev, A. A. Shestakova // *Polar Science.* – 2019. – Vol. 22. – P. 100483. – DOI 10.1016/j.polar.2019.100483. – EDN LXAZDK
- [7] Шур Ю.Л. Верхний горизонт толщи мерзлых пород и термокарст. – Новосибирск: Наука, 1988. – 212 с.
- [8] Shur, Y.; Hinkel, K.M.; Nelson, F.E. The transient layer: Implications for geocryology and climate-change science // *Permafr. Periglac. Process.* – 2005. – 16. – P. 5-17.
- [9] Grosse, G.; Romanovsky, V.; Jorgenson, T.; Anthony, K.W.; Brown, J.; Overduin, P.P. Vulnerability and feedbacks of permafrost to climate change // *Eos Trans. Am. Geophys. Union.* – 2011. – 92. – 73-74.
- [10] Zhirkov, A.; Sivtsev, M.; Lytkin, V.; Kirillin, A.; Séjourné, A.; Wen, Z. An Assessment of the Possibility of Restoration and Protection of Territories Disturbed by Thermokarst in Central Yakutia // *Eastern Siberia. Land.* – 2023. – 12. – P. 197. – URL: <https://doi.org/10.3390/land12010197>.

ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ И ЗАСОЛЕННОСТИ ПОРОВОЙ ВЛАГИ НА СТАБИЛЬНОСТЬ ГИДРАТОВ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Изабелла Иванова, Людмила Калачева, Альберт Портнягин, Виктор Иванов, Алла Бубнова
ФГБУН ФИЦ «ЯНЦ СО РАН» «Институт проблем нефти и газа СО РАН»,
677007, Россия, г. Якутск, ул. Автоторожная, 20

INFLUENCE OF POROUS MEDIUM AND SALINITY OF PORE MOISTURE ON KINETICS OF THE NATURAL GAS HYDRATE STABILITY

Izabella Ivanova, Liudmila Kalacheva, Albert Portnyagin, Viktor Ivanov, Alla Bubnova
Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, 20, Avtodorozhnay str., Yakutsk, 677007, Russia

Annotation. The actuality of the natural gas hydrates stability investigation in saline porous media is related to the possibility of underground gas storages in a hydrate state in subpermafrost aquifers in Yakutia. This paper presents the experimental results of the kinetic parameters investigation of the natural gas hydrates decomposition in bi- and polydisperse sands saline with model stratum waters of bicarbonate-sodium and chloride-calcium types. The main parameters of the hydrate decomposition were determined depending on the fineness of the porous medium and the type of model stratum waters: the amount of released gas; the amount of gas absorbed by 1 mol of water; the degree of water conversion into hydrate and the average rate of hydrates decomposition. Based on the results of the obtained data, it was concluded that polydisperse sands saline with bicarbonate-sodium waters of low mineralization are suitable for underground gas storages in porous media.

1. Введение

Природный газ является одним из основных источников энергии в Якутии. В связи с этим, возникает необходимость создания подземных хранилищ путем закачки газа в низкотемпературные пласты, для его хранения в гидратном состоянии. В качестве таких хранилищ на территории Республики Саха (Якутия) рассматриваются подмерзлотные водоносные горизонты, расположенные в Вилюйской синеклизе. Процесс гидратообразования в пористой среде протекает в статических условиях без перемешивания фаз и имеет ряд особенностей. Различие в процессе гидратообразования в объеме воды с гидратообразованием в пористой среде связывают в первую очередь с особенностями взаимодействия поровой влаги с минеральными частицами пород. Поэтому кинетические параметры образования гидратов в пористых средах зависят от таких факторов как размер частиц дисперсной среды и влагонасыщенность, состав и минерализация поровой влаги, скорость фильтрации газа и т.д. Подземные воды в Якутии имеют более высокую минерализацию и разнообразный состав: генетический тип вод по глубине изменяется от гидрокарбонатно-натриевого до хлоридно-кальциевого [1], поэтому существует необходимость исследования образования гидратов природного газа в пористых средах, насыщенных растворами гидрокарбоната натрия различных концентраций, а также растворами хлорида натрия с концентрациями более 3% мас.

2. Экспериментальная часть

Объектами исследования являлись гидраты природного газа, полученные в следующих образцах песков:

1 – песок серый, кварцевый голоценового возраста аллювиального происхождения, был отобран с поймы р. Лена. Песок слабо отсортированный (бидисперсный), мелко-среднезернистый с преобладанием частиц 0,5–0,25 мм (54%) (Таблица 1). Плотность твердой компоненты – 2,67 г/см³. Пористость в рыхлом сложении – 39,5%, в плотном – 37,0%;

2 – песок темно-оранжевый, кварцевый, отобранный с месторождения Кильдямский, неогенового возраста аллювиального происхождения. Неотсортированный (полидисперсный) крупный песок, суммарно преобладают частицы > 0,25 мм (Таблица 1). Плотность твердой компоненты – 2,83 г/см³. Пористость в рыхлом сложении – 36,1%, в плотном – 34,2%. Гранулометрический состав песков определен ситовым методом по ГОСТ 12536-2014. Плотность твердой компоненты, плотности в рыхлом и плотном сложениях, а также пористость песков определялись по ГОСТ 5180-2015.

Таблица 1 – Гранулометрический состав песков, выраженный в стандартных фракциях

| Размер частиц по фракциям, мм | Содержание частиц по фракциям, % | |
|-------------------------------|----------------------------------|----|
| | 1 | 2 |
| >10 | 0 | 0 |
| 10–4 | 0 | 0 |
| 4–2 | 0 | 1 |
| 2–1 | 1 | 17 |
| 1–0,5 | 3 | 34 |
| 0,5–0,25 | 54 | 34 |
| 0,25–0,1 | 42 | 14 |
| 0,1–0,05 | 0 | 0 |
| < 0,05 | 0 | 0 |

Засоленность пористых сред задавалась растворами гидрокарбоната натрия 0,25 и 2,0% мас. и хлорида натрия с концентрациями 5 и 15% мас., что соответствует минерализации генетических типов вод, характерных для водоносных комплексов Вилюйской синеклизы [1]. Для сравнения гидраты этого газа были также получены в образцах песков с пресной водой.

В качестве газа-гидратообразователя был использован природный газ Средневилюйского ГКМ, который поступает по магистральному газопроводу «Кысыл-Сыр – Мастах – Якутск».

Методики получения и разложения гидратов описаны в [2].

В таблице 2 приведены средние значения объема газа, выделившегося при разложении гидратов природного газа в бидисперсном и полидисперсном песках, увлажненных водой и исследуемыми растворами солей различных концентраций. Видно, что независимо от дисперсности, в песках, увлажненных 0,25% раствором NaHCO₃, образовалось наибольшее количество гидрата. Следует отметить, что больший объем газа выделяется при разложении гидратов, полученных в полидисперсном песке.

Таблица 2 – Объем газа, выделившегося при разложении гидратов природного газа, полученных в пористых средах с водой и растворами различных солей

| Дисперсность песка | H ₂ O дист. | Объем выделившегося газа, л | | | |
|--------------------|------------------------|-------------------------------------|-------|----------------------|-------|
| | | Раствор NaHCO ₃ , % мас. | | Раствор NaCl, % мас. | |
| | | 0,25 | 2 | 5 | 15 |
| би | 2,112 | 3,147 | 2,016 | 1,734 | 0,479 |
| поли | 3,220 | 3,825 | 2,557 | 1,975 | 0,523 |

Количество выделяющегося газа из полученных образцов, нормированное к количеству воды (N, моль газа/моль воды) представлено на Рисунках 1 а) и б).

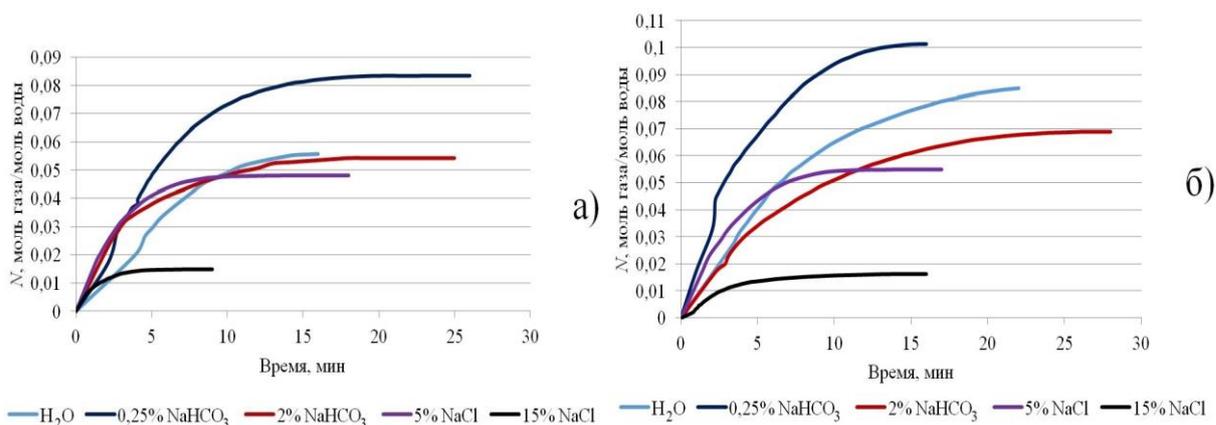


Рисунок 1 – Количество выделяющегося природного газа, приходящееся на 1 моль воды в системе «пористая среда – дистиллированная вода / раствор NaHCO_3 », где: а) – бидисперсный песок; б) – полидисперсный песок.

В би- и полидисперсном песках наблюдается тенденция уменьшения значения N в ряду: $0,25\% \text{NaHCO}_3 > \text{H}_2\text{O} > 2\% \text{NaHCO}_3 > 5\% \text{NaCl} > 15\% \text{NaCl}$. Анализ геометрической формы, полученных кинетических кривых выделения газа, показал, что разложение гидратов в пористых средах характеризуется максимальными начальными скоростями. Степень превращения воды в гидрат (W_h , %) в пористых средах представлена на Рисунке 2.

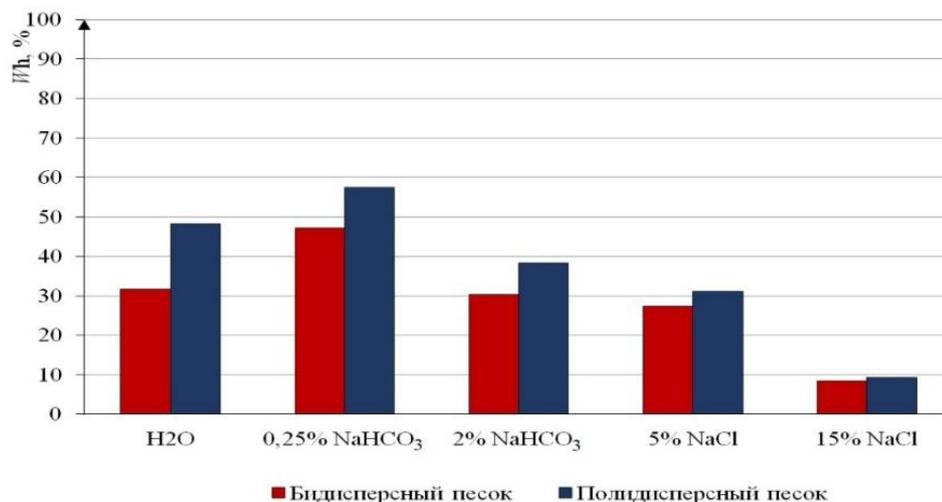


Рисунок 2 – Степень превращения воды в гидрат в различных системах в би- и полидисперсном песках.

Независимо от дисперсности степень превращения воды в гидрат уменьшается в ряду: $0,25\% \text{NaHCO}_3 > \text{H}_2\text{O} > 2\% \text{NaHCO}_3 > 5\% \text{NaCl} > 15\% \text{NaCl}$. Однако в любой из этих систем степень превращения воды в гидрат выше в системах с полидисперсным песком. Это можно объяснить тем, что в полидисперсном песке больший размер частиц приводит к увеличению пространства междуузлий, и, следовательно, к высокой вероятности зарождения гидратов, по сравнению с бидисперсным песком с меньшим размером частиц, поэтому в полидисперсном песке образуется больше гидратов [3]. Высокая степень превращения воды в гидрат в системе с раствором $0,25\% \text{NaHCO}_3$ в би- и полидисперсном песках свидетельствует о проявлении им промотирующих свойств.

Для оценки стабильности гидратов в исследуемых системах определена их степень разложения. Установлено, что кинетические кривые разложения гидратов в пористой среде описываются полиномом четвертой степени с величиной достоверности аппроксимации (R^2) $> 99\%$ (Таблица 3), что указывает на хорошее совпадение расчетных линий с экспериментальными данными. Решением уравнений – полиномов четвертой степени – стало определение $\tau_{0,5}$ – времени, за

которое разлагается 50% гидратов, и затем по полученным значениям были рассчитаны средние скорости (v_{cp}) разложения гидратов. Полученные результаты приведены в Таблице 3. В бидисперсном песке в ряду 15% NaCl > 5% NaCl > 2% NaHCO₃ > 0,25% NaHCO₃ > H₂O происходит уменьшение средней скорости разложения гидратов, причем с увеличением концентрации солей скорость возрастает на порядок от 0,205 до 1,64 мин⁻¹ в воде и растворе 15% NaCl, соответственно.

В полидисперсном песке средняя скорость разложения гидратов уменьшается в ряду: 15% NaCl > 5% NaCl > 0,25% NaHCO₃ > 2% NaHCO₃ > H₂O, достигая максимального значения также в растворе 15% NaCl, увеличиваясь по сравнению с водой только в 2 раза. Следует отметить, что средние скорости разложения в растворах NaHCO₃ имеют очень близкие значения – 0,254 и 0,233 мин⁻¹ для 0,25% и 2% растворов, соответственно. Обнаружено, что средняя скорость разложения гидратов в бидисперсном песке практически всегда выше, по сравнению с полидисперсным песком, что свидетельствует о более высокой стабильности гидратов, полученных в последнем.

Таблица 3 – Параметры разложения гидратов, полученных в пористых средах

| Раствор | Дисперсность песка | R ² | $\tau_{0,5}$, МИН | v_{cp} , МИН ⁻¹ |
|--------------------------|--------------------|----------------|--------------------|------------------------------|
| H ₂ O | бидисперсный | 0,9976 | 4,89 | 0,205 |
| | полидисперсный | 0,9990 | 5,43 | 0,184 |
| 0,25% NaHCO ₃ | бидисперсный | 0,9975 | 4,63 | 0,216 |
| | полидисперсный | 0,9965 | 3,94 | 0,254 |
| 2% NaHCO ₃ | бидисперсный | 0,9981 | 3,01 | 0,332 |
| | полидисперсный | 0,9993 | 4,29 | 0,233 |
| 5% NaCl | бидисперсный | 0,9999 | 1,99 | 0,503 |
| | полидисперсный | 0,9997 | 2,41 | 0,415 |
| 15% NaCl | бидисперсный | 0,9983 | 0,94 | 1,064 |
| | полидисперсный | 0,9943 | 2,06 | 0,485 |

3. Выводы

По результатам выполненной работы сформулированы следующие выводы:

- 1) Определены основные параметры разложения гидратов в зависимости от дисперсности пористой среды и типа модельных пластовых вод. Установлено, что в би- и полидисперсном песках количество газа, поглощенного 1 моль воды и степень превращения воды в гидрат уменьшается в ряду: 0,25% NaHCO₃ > H₂O > 2% NaHCO₃ > 5% NaCl > 15% NaCl, причем эти параметры выше в полидисперсном песке. Вероятно, раствор гидрокарбоната натрия с концентрацией 0,25% проявляет свойства слабого кинетического промотора гидратообразования.
- 2) Более стабильные гидраты образуются в пористых средах с пресной водой, нестабильные – в системах с растворами хлорида натрия, а гидраты, полученные в системах с растворами гидрокарбоната натрия, занимают промежуточное положение в этом ряду. По сравнению с гидратами в системах с бидисперсным песком, гидраты в системах с полидисперсным песком обладают более высокой термодинамической стабильностью.
- 3) Для создания подземных хранилищ газа в пористых средах подходят полидисперсные грунты, засоленные водами гидрокарбонатно-натриевого типа с низкой минерализацией как среда для образования гидратов природного газа, т.к. процесс гидратообразования в них характеризуется высокими значениями степени превращения воды в гидрат, а также образованием относительно устойчивых гидратов. Кроме того, 0,25% раствор гидрокарбоната натрия проявляет свойства кинетического промотора гидратообразования, что благоприятствует процессу образования гидратов в полидисперсных средах с гидрокарбонатно-натриевым типом вод.

4. Благодарности

Работа выполнена в рамках бюджетного проекта № 122011100157-5 с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН и гранта №13.ЦКП.21.0016.

5. Литература

- [1] Waters of oil and gas fields of the USSR: Handbook / ed. L.M. Zorkin. – M: Nedra, 1989. – 382 p.
- [2] 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. – P. 196-200.
- [3] Siangsai A., Rangsunvigit P., Kitiyanan B., Kulprathipanja S., Linga P. Investigation on the roles of activated carbon particle sizes on methane hydrate formation and dissociation // Chem. Eng. Sci. – 2015. – Vol. 126. – P. 383-389.

ЧИСЛЕННЫЙ ПРОГНОЗ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ

Михаил Каймонов

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

NUMERICAL FORECAST OF THE TEMPERATURE REGIME OF HYDROTECHNICAL STRUCTURES OF MINING ENTERPRISES UNDER THE CONDITIONS OF PERMAFROST

Michail Kaimonov

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

Annotation. The necessity of a preliminary assessment of the intensity of thermal processes occurring in frozen soils with inclusions of buried ice in the design of structures of the surface complex of open-pit mines in the permafrost zone has been substantiated. It is emphasized that special attention should be paid to objects that have a warming effect, in particular, settling ponds intended for the purification of quarry and dump waters in the summer period of operation. In order to assess the possibility of placing and subsequent construction of such structures on sites built up with high ice soils, as well as rational modes of their operation, multivariate numerical experiments were carried out on the developed mathematical model. The results of studies are presented that confirm the possibility of placing and constructing settling ponds on sites with ice lenses in the bottom, subject to seasonal (only in summer) operation. Requirements for the rational operation of settling ponds have been developed, the observance of which ensures long-term stability and trouble-free operation of all facilities of the treatment complex in the summer in permafrost conditions.

1. Введение

Освоение недр Северо-Восточных регионов РФ со сложными инженерно-геологическими условиями требует особых подходов для обеспечения надежности функционирования строящихся горных предприятий-рудников, шахт, карьеров, а также сооружений поверхностных комплексов, которые порой приходится возводить на площадках условно пригодных для строительства, в частности, на косогорах и сложенных высокольдистыми грунтами. При этом необходимым условием их качественного проектирования, обеспечения долговременной устойчивости и последующей безаварийной эксплуатации, является включение в состав проектов разделов по теплотехническому расчету и математическому моделированию процессов теплообмена происходящих в основаниях сооружений и вмещающем мерзлом горном массиве [1-3].

2. Математическое моделирование гидротехнических сооружений горнодобывающих предприятий в условиях вечной мерзлоты

Все выше сказанное в полной мере относится к разрабатываемому проекту на отработку небольшого рудного месторождения, расположенного в гористой местности Кобяйского улуса РС(Я) открытым способом. В отсутствии подходящих площадок вблизи карьера требуемых размеров для размещения поверхностных объектов, проектанты вынуждены были разместить полигон очистных сооружений, включая пруд-отстойник (ПО) для очистки карьерных и подотвальных вод на склоне, сложенном ледниковыми отложениями с включениями мощных подземных линз льда, что в свою очередь потребовало внести изменения в традиционную конструкцию ПО.

В соответствии с проектом ПО в виду наличия мощной линзы погребённого льда принято возводить полууглублённого типа. При сезонной работе карьера (будет эксплуатироваться только в летний период) наполненный водой ПО будет оказывать негативный растепляющий эффект на ограждающие дамбы, возведенные из мерзлых грунтов, и ледяную линзу занимающую почти всю площадь дна его второй секции, что может нарушить устойчивость дамб и тем самым режим функционирования всего очистного сооружения и, как следствие этого, неочищенные воды будут попадать в речную систему, что недопустимо с позиций экологии.

В связи с этим, для оценки растепляющего эффекта ПО на ограждающие грунтовые дамбы при различных режимах его эксплуатации были проведены исследования, включая численные эксперименты на разработанной математической модели.

Конструктивно ПО представляет собой две горизонтальные секции, разделенные фильтрационной дамбой с противофильтрационным элементом в основании.

Задача может быть сформулирована следующим образом. Вокруг пруда-отстойника возведены ограждающие дамбы из скального грунта крупностью 20÷200 мм определенных геометрических размеров. Начальное распределение температуры, влажности в теле, основании дамбы и пруда-отстойника, а также физико-механические и теплофизические свойства используемых грунтов известны (приведены в проекте). В теле и основании возведенной дамбы и на дне пруда отстойника под влиянием теплообмена с атмосферным воздухом (гребень, правый и левый откосы), а также с водой (постоянно или периодически покрываемая водой поверхность откосов дамбы и дно пруда-отстойника) и грунтами основания происходит формирование определенного температурного режима. В основании дамбы и на дне пруда-отстойника естественный температурный режим грунтов изменяется в соответствии с новыми условиями теплообмена.

При разработке математической модели исследуемого процесса приняты следующие упрощающие допущения:

- Теплообмен на поверхности дамбы (гребень, правый и левый откосы) и массива горных пород с атмосферным воздухом определяется по закону Ньютона с коэффициентом теплообмена α .
- Результирующую лучистого теплообмена (солнечную радиацию) контактного слоя определяем по формуле радиационного баланса земной поверхности (Q_R) [4].
- Фильтрация воды в теле дамбы и ее основании отсутствует.
- За время эксплуатации дамбы ее геометрические размеры, а также физические и теплофизические свойства грунтов не изменяются.

В соответствии с принятыми расчетной схемой и упрощающими допущениями, расчет двухмерного температурного поля дамбы, ее основания и дна пруда-отстойника при нестационарном тепловом режиме сводится к решению системы дифференциальных нелинейных уравнений теории теплопроводности [5]:

$$\left[C(T, x, y) + L_1 W(x, y) \rho \delta (T - T^*) \right] \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T, x, y) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(T, x, y) \frac{\partial T}{\partial y} \right];$$

$$C(T, x, y) = \begin{cases} c_1(x, y) \rho_1(x, y), & T < T^*; \\ c_2(x, y) \rho_2(x, y), & T > T^*; \end{cases} \quad \lambda(T, x, y) = \begin{cases} \lambda_1(x, y), & T < T^*; \\ \lambda_2(x, y), & T > T^*; \end{cases}$$

$$x, y \in D_{xy}, t > 0,$$

где T – температура породы, °С; T^* – температура фазовых переходов влаги в породе, °С; t, x, y

– временная (с) и пространственные координаты (м); L_1 – скрытая теплота плавления (замерзания) льда (воды), Дж/кг; W – влажность породы, доли единицы; ρ – плотность воды, кг/м³; c_1, ρ_1, λ_1 (c_2, ρ_2, λ_2) – удельная теплоемкость (Дж/(кг·К)), плотность (кг/м³) и

коэффициент теплопроводности (Вт/(м·К)) соответственно для мерзлых (талых) пород;
 $\delta(T - T^*)$ – функция Дирака.

На рис. 1 представлены изолинии температур в теле дамбы, ее основании и под дном пруда-отстойника на 1 октября в случае, когда полигон пруда-отстойника все лето простоял «сухим». Как видно из рис. 1 в течение летнего периода в основании дамбы сохраняются отрицательные температуры горных пород. Со стороны полигона пруда-отстойника происходит значительная оттайка грунтов дна и откоса дамбы. Так же происходит оттайка погребённого льда на мощность более 0,5 м.

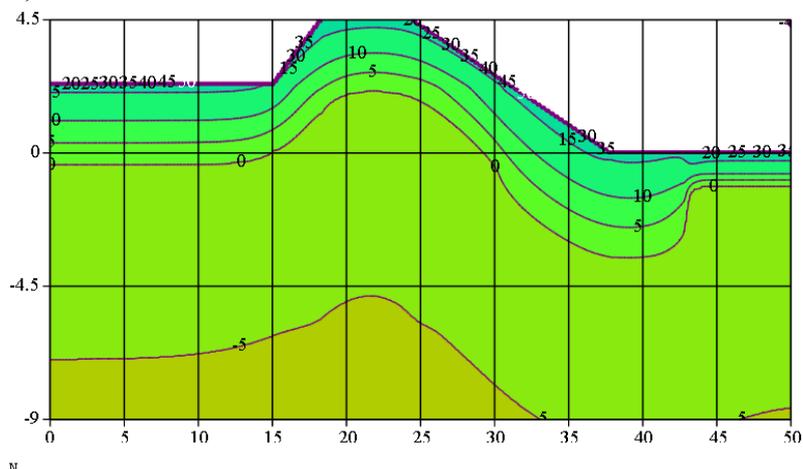


Рисунок 1 – Изолинии температур в теле дамбы, ее основании и под дном пруда-отстойника на 1 октября в случае, когда полигон пруда-отстойника все лето простоял «сухим».

На рис. 2 представлены изолинии температур в теле дамбы, ее основании и под дном пруда-отстойника на 1 октября после опорожнения отстойника на 6-м году эксплуатации. Как видно из рис. 2 в течение летнего периода в основании дамбы сохраняются отрицательные температуры горных пород. Со стороны полигона пруда-отстойника оттайки грунтов дна и откоса дамбы не наблюдается. Оттайки погребённого льда не происходит.

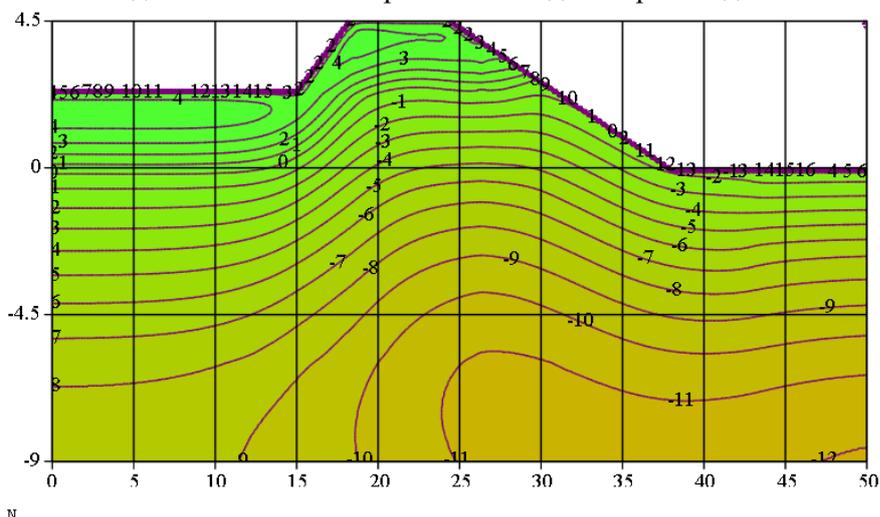


Рисунок 2 – Изолинии температур в теле дамбы, ее основании и под дном пруда-отстойника на 1 октября после опорожнения отстойника на 6-м году эксплуатации.

3. Выводы

Таким образом, результаты проведенных численных экспериментов позволяют сделать заключение, что с теплофизических позиций строительство ПО на мерзлых четвертичных грунтах с наличием погребенных льдов возможна при соблюдении нижеперечисленных условий и требований: сезонной (только в летний период) эксплуатации ПО; полного

опорожнения обеих секций перед наступлением заморозков; обязательного наполнения обеих секций очищаемой водой в летний период на глубину не менее 1 метра; периодической уборки снега из ПО и ограждающих дамб [6].

Тем самым будет обеспечена долговременная устойчивость ограждающих насыпных сооружений и нормальное функционирование очистного комплекса.

4. Литература

- [1] Biyanov G.F. Platiny` na vechnoj merzloste. – M.: E`nergoatomizdat, 1983. – 176 p. (in Russian).
- [2] Chzhan R.V. Temperaturny`j rezhim i ustojchivost` nizkonaporny`x gidrouzlov i gruntovy`x kanalov v kriolitozone. – Yakutsk: Izd-vo IMZ SO RAN, 2002. – 208 p. (in Russian).
- [3] Demchenko T.V., Krivonogova N.F., Krivoshhekov V.S., Shherbanosov V.N. Gidrouzly` Chukotki: inzhenerno-geokriologicheskie usloviya. – Magadan: ChF SVKNII DVO RAN, 2005. – 112 p. (in Russian).
- [4] Pavlov A.V. E`nergoobmen v landshaftnoj sfere Zemli. – Novosibirsk: Nauka, 1984. – 256 p. (in Russian).
- [5] Kurilko A.S., Ermakov S.A., Khokholov Yu.A., Kaimonov M.V., Burakov A.M. Modelirovanie teplovy`x processov v gornom massive pri otkry`toj razrabotke rossy`pej kriolitozony`. – Novosibirsk: Akademicheskoe izd-vo “Geo”, 2011. – 140 p. (in Russian).
- [6] Kaimonov M.V., Kiselyov V.V., Kurilko A.S., Krayushkin S.A. Teplofizicheskie aspekty` stroitel`stva i e`kspluatscii poluuglublyonny`x prudov-otstojnikov kar`erov kriolitozony` // Gorny`j informacionno-analiticheskij byulleten` (nauchno-texnicheskij zhurnal). – 2016. – № S21. – P. 409-417. (in Russian).

ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ ПОЧВ МИНЕРАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПРЕДБАЙКАЛЬЯ

Анна Каминская

ФГБОУ ВО Иркутский государственный университет,
664003, Россия, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1

HISTORY OF THE STUDY OF SOILS OF MINERAL SPRINGS OF THE BAIKAL REGION

Anna Kaminskaya

Irkutsk State University, 1, Karl Marx str., Irkutsk, 664003, Russia

Annotation. The results of fundamental studies of the waters of the mineral springs of Eastern Siberia and the soil cover formed in the zone of influence of mineral springs are presented. The necessity of a comprehensive study of the factors of formation of soils of mineral springs, the influence of chemical elements of mineral waters on soils in order to preserve and rational use of territories in modern conditions is indicated.

1. Введение

Восточная Сибирь широко известна своими гидрологическими ресурсами, такими как озеро Байкал, реками Иркут, Ангара, Лена, Нижняя Тунгуска, искусственно созданными водохранилищами, а также запасами минеральных вод. На территории Предбайкалья расположено около четырехсот источников и скважин с минеральной водой, при этом некоторые воды, которые бьют из минеральных источников, являются термальными.

В связи с использованием минеральных источников населением, возникает проблема сохранения природных ресурсов. Так, пробуренные в ряде районов скважины продолжают фонтанировать, бесцельно расходуются запасы подземных вод, происходит самоизливание соленых вод, что может вызвать засоление почв. Для сохранения и рационального использования природных ресурсов необходимо исследовать почвы, формирующиеся под воздействием минеральных вод, и изучить их влияние.

2. Основная часть

Исследованием гидрохимического состава минеральных вод занимались Ломоносов И.С., Кустов Ю.И., Пинникер Е.В. (1977 г.), ими было установлено, что на химический состав вод влияют состав гордых пород, рельеф, а также взаимосвязь химического состава вод породы и почвы. Минерализация подземных вод значительно влияет не только на почвенный покров, но и экосистему в целом, так как при испарении воды могут образовываться различные скопления минералов, оседающие на окружающих предметах [1]. В некоторых случаях воды минеральных источников могут изменять свой химический состав, перемешиваясь с другими подземными водами или при изменении почвообразующих пород в результате тектонических явлений.

Изучением минеральных источников в рамках курортно-рекреационного потенциала Иркутской области занимался Г.М. Шпейзер (2010), который исследовал минерализацию и качественный состав лечебных питьевых вод санаторно-курортных комплексов, что позволило дать характеристику химического состава, определить типизацию минеральных вод. Им были охарактеризованы основные типы минеральных вод и объединены по месторасположению, близкому ионному составу, минерализации, и некоторым специфическим чертам, например вкус, запах или цвет. На территории излияния наиболее известных и широко используемых источников были выделены следующие типы: Краинский тип (Новонкутское месторождение); Московский тип (г. Лесогорск); Казанский тип (Усть-Кут); Ижевский тип (с. Олха Шелеховского района); Угличский тип (скважина №2 Олхинского месторождения); Алма-Атинский тип (Усть-Балейская площадь); Обуховский тип (г. Ангарск санатории «Родник»);

Крымский тип (43 км Байкальского тракта); Минский тип (р. Лена, Киренга, Бирюса); Усольский тип (Усолье-Сибирское); Сулакский тип (Бурдугуз); Нукутский тип (левый берег Братского водохранилища); Усть-Кутский тип (г. Усть-Кут, д. Турука, Верхне-Марково, Каймоново, Туманшет) [2].

Почвенный покров Восточной Сибири всесторонне исследуется, начиная с 17 века, но по большей мере комплексно изучаются вопросы, связанные с определением закономерностей выявления типов почв, определением основных физико-химических свойств почв, проведение экологической оценки, связанной с антропогенным воздействием и загрязнением тяжелыми металлами. Для большей территории области был дан анализ почвенного строения региона, но не были затронуты почвы, образующиеся под воздействием минеральных источников – довольно распространенного природного явления. На данный момент последними, наиболее актуальными данными о таких почвах являются исследования Лопатовской О.Г. (2019) [3].

В результате исследования дана классификация, морфологическое описание и основные физико-химические свойства почв минеральных источников. Таким образом, почвы около минеральных источников чаще всего соответствуют стволу: Синлитогенные почвы, отделам: Ааллювиальные почвы, Стратоземы и Слаборазвитые. Верхние горизонты таких почв отличаются высоким содержанием гумуса, легким гранулометрическим составом, нейтральным или щелочным уровнем рН, установлено содержание карбонатов – от 6,5 до 66,5% [3].

3. Выводы

Таким образом, минеральные источники Восточной Сибири имеют широкое распространение и отличаются уникальными водными микросистемами и уникальными разнообразным минералогическим составом. Источники являются индикаторами экологического состояния подземных вод, влияют на химический состав окружающих их почв, отражают динамику изменений климата [4]. Места излияния минералогических вод позволяют проводить комплексные экологические и почвенные исследования, которые необходимы для создания более точной и комплексной картины условий генезиса и закономерностей формирования таких почв, оценки влияния химических элементов минеральных вод на почвы, проведения экологической оценки почв под минеральными источниками, что станет основой для сохранения и рационального использования почвенного покрова территории в современных условиях.

4. Литература

- [1] Lomonosov I.S., Kustov Yu.I., Pinneker E.V. Mineral waters of the Baikal region. – Irkutsk: East-Siberian Publishing House, 1977. – 224 p.
- [2] Speizer G. M. Resort and recreational potential of the Irkutsk region / G. M. Speizer // Izvestiya Irkutsk State University. Series: Earth Sciences. – 2010. – Vol. 3. – No 2. – P. 190-216.
- [3] Lopatovskaya, O.G. Features of pedohalogenesis of ecological-meliorative complexes of the Western Baikal region: diss. ...doc. Biol. Sciences: 03.02.13 / Lopatovskaya Olga Gennadievna. – Irkutsk, 2019 – 304 p.
- [4] Lopatovskaya, O.G. Malkin mineral springs: water chemistry and soil salinization / O. G. Lopatovskaya, V. V. Takhteev, S. D. Lazareva, O. V. Zarubina, O. G. Nikolaeva // News of Irkutsk State University. Ser. Biology. Ecology. – 2011. – Vol. 4. – No. 1. – P. 81-86.

РАЗРАБОТКА ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ОЗЁР ЯКУТИИ (НА ПРИМЕРЕ БАСЕЙНА РЕКИ ИНДИГИРКА)

Сардана Левина, Людмила Пестрякова

ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова»,
677000, Россия, г. Якутск, ул. Белинского, 58

DEVELOPMENT OF GEOECOLOGICAL CLASSIFICATION OF YAKUTIA LAKES (USING THE EXAMPLE OF THE INDIGIRKA RIVER BASIN)

Sardana Levina, Lyudmila Pestryakova

North-Eastern Federal University, 58, Belinsky str., Yakutsk, 677000, Russia

Annotation. Currently, there are a large number of limnological classifications based on the identification of a separate feature of the lake. Such classifications, which evaluate a lake by one parameter, are one-parameter and don't allow evaluating a lake reservoir as a whole, taking into account socio-economic problems. Multiparameter classifications are extremely rare and are essentially universal, capable of solving complex problems. This work is devoted to the study of the interdisciplinary potential of the regional ecological-limnological classification (RELC) on the example of the lakes of Yakutia. RELC takes into account all the main components of the lake system, allows you to describe the class of the lake in the form of a single formula with the preparation of an individual passport for each object.

1. Введение

Классификация является способом группировки изучаемых объектов исходя из обобщения их общих признаков. Методы и подходы классификаций постоянно совершенствуются. В литературе существует большое количество лимнологических классификаций базирующиеся на выявлении отдельного признака озера, которое не позволяет оценивать озёрный водоём в целом с учетом социально-экономических задач. Цель работы – разработка классификации озёр Якутии на примере бассейна реки Индигирка по основным параметрам (географическим, физико-химическим, гидробиологическим).

2. Основной раздел вашей статьи

Объектом исследования послужили 42 разнотипных озера бассейна реки Индигирка. Большой объём фактического материала по озёрам района исследования позволил нам разработать региональную эколого-лимнологическую классификацию (РЭЛК) для озёр Якутии [1, 2, 3, 4]. За основу РЭЛК учитывались существующие классификации, в том числе структура универсальной лимно-экологической классификации (УЛЭЖ) [5] с существенными изменениями и дополнениями с учетом природно-климатических условий региона. Структура разработанной РЭЛК состоит из 3 параметров, 18 признаков и 106 показателей. Каждому признаку прикреплен код обозначения.

На основе приведенной геоэкологической классификации озёр Якутии была выполнена типизация (паспортизация) 42 озёрных экосистем бассейна реки Индигирка. Параметры изученных озёр бассейна реки Индигирка были использованы для сравнительного анализа с параметрами 199 озёр Якутии [6], включающего 66 показателей, входящих в 14 признаков и 3 параметра. Географический параметр включает 7 признаков, и включает от 3 до 6 показателей (таблица 1).

Относительно высоты над уровнем моря оказалось, что большинство изученных озёр Якутии расположены на очень низкой высоте. Озёра бассейна реки Индигирка почти все находились в пределах высоты до 200 м, в том числе: до 25 м – 48 %; от 25 до 50 м – 43 %; от 50 до 75 м – 7 %. Исключение составляет озеро (Ю26) на Момском хребте – 596 м (2 %).

Для составления генетического признака (G) мы придерживались схемы ландшафтно-лимногенетической классификации для озёр Якутии [7].

Таблица 1 – Сравнение эколого-лимнологических показателей географического параметра изученных озёр бассейна реки Индигирка с озёрами Якутии.

| Показатель | Якутия (n-199) | Индигирка (n-42) |
|--|----------------|------------------|
| Высота над уровнем моря (E) | | |
| E11-очень низкий (0-200 м) | 67,0* | 98,0 |
| E12-низкий (200-500 м) | 26,0 | - |
| E13-средний (500-1000 м) | 5,0 | 2,0 |
| E14-высокий (1000-2000 м) | 2,0 | - |
| Генезис (G) | | |
| Термокарстовые – G1 | 66,0 | 36,0 |
| Водно-эрозионные – G2 | 17,0 | 21,0 |
| Эрозионно-термокарстовые – G3 | 9,0 | 19,0 |
| Ледниково-зандровые – G9 | 3,0 | 24,0 |
| Величина площади водного зеркала (A) | | |
| A2 – большая, от 101 до 1000 км ² | 1,0 | 2,4 |
| A3 – средняя, от 10 до 100 км ² | 5,0 | 19,0 |
| A4 – небольшая, от 1,0 до 10 км ² | 18,0 | 21,4 |
| A5 – малая, от 0,1 до 1,0 км ² | 39,0 | 33,4 |
| A6 – маленькая, от 0,01 до 0,1 км ² | 29,0 | 21,4 |
| A7 – озёрки, от 0,001 до 0,01 км ² | 8,0 | 2,4 |
| Максимальная глубина (Dm) | | |
| D3 – повышенная, от 12,5 до 25 м | 2,0 | 2,0 |
| D4 – средняя, от 6,25 до 12,5 м | 3,0 | - |
| D5 – малая, от 3,12 до 6,25 м | 28,0 | 24,0 |
| D6 – очень малая, меньше 3,12 м | 67,0 | 74,0 |
| Средняя глубина (Da) | | |
| Da1 – очень большие, больше 16 м | 1,1 | |
| Da2 – большие, от 8 до 16 м | 0,5 | |
| Da3 – средние, от 4 до 8 м | 1,1 | 2,4 |
| Da4 – малые, от 2 до 4 м | 3,7 | |
| Da5 – очень малые, меньше 2 м | 93,7 | 97,6 |
| Коэффициент удлиненности (K) | | |
| K1 – вытянутая (более 10,0) | 3,0 | - |
| K2 – удлиненная (7,0-10,0) | 2,0 | 14,5 |
| K3 – оваловно-удлиненная (5,0-7,0) | 4,0 | - |
| K4 – близкая к овалу (3,0-5,0) | 10,0 | 9,5 |
| K5 – близкая к кругу (1,5-3,0) | 46,0 | 64,0 |
| K6 – округлая (менее 1,5) | 36,0 | 12,0 |
| Развитие береговой линии (L) | | |
| L1 – изрезанная (более 6,0) | 1,0 | - |
| L2 – слабоизрезанная (2,0-6,0) | 14,0 | 7,0 |
| L3 – округлая (менее 2,0) | 85,0 | 93,0 |

Для физико-химического параметра озёр были включены 6 признаков от 3 до 6 показателей (Таблица 2).

В наших исследованиях вместо температуры воды использованы данные местных метеорологических станций июльской температуры воздуха приземного слоя, усредненные более чем за 20-летний период, с корректировкой по широте и расстоянию от побережья для

каждого озера из базы данных «NOAA Physical Sciences Laboratory (PSL)». По температурному признаку они различаются: по всей Якутии преобладают озёра с теплой водой, а в «индигирских» озёрах температурный режим умеренно-холодный. По минерализации: ультрапресная вода в «индигирских» озёрах, а в целом по Якутии – минерализация меняется в широких пределах. Хотя по ионному составу вод они близки. По общей жесткости в «индигирских» объектах абсолютно доминировали озёра с очень мягкой водой. Тогда как во втором наборе отмечен разброс значений.

Таблица 2 – Сравнение эколого-лимнологических показателей физико-химического параметра изученных озёр бассейна реки Индигирка с озёрами Якутии.

| Показатель | Якутия (n-199) | Индигирка (n-42) |
|--|----------------|------------------|
| Температурный режим (Т) | | |
| T1 – холодные: t _{ср} <10 °С | 4,0 | 40,0 |
| T2 – умеренные: t _{ср} = 10-15 °С | 24,0 | 50,0 |
| T3 – тёплые: t _{ср} = 15-20 °С | 72,0 | 10,0 |
| Прозрачность (Ts) | | |
| Ts1 – прозрачная (более 30 см) | 77,0 | 87,0 |
| Ts2 – слабо мутная (25-30 см) | 8,0 | 2,0 |
| Ts3 – средне мутная (20-25 см) | 6,0 | 7,0 |
| Ts4 – мутная (10-20 см) | 8,0 | 4,0 |
| Ts5 – очень мутная (менее 10 см) | 1,0 | – |
| Минерализация (М) | | |
| M1 – очень малая, до 100 мг/л | 24,0 | 81,0 |
| M2 – малая, 100-200 мг/л | 18,0 | 12,0 |
| M3 – средняя, 200-500 мг/л | 30,0 | 7,0 |
| M4 – повышенная, 500-1500 мг/л | 25,0 | - |
| M5 – высокая, 1500-3000 мг/л | 2,0 | - |
| M6 – очень высокая, 3000 мг/л | 1,0 | - |
| Ионный состав (I) | | |
| I 1 (1) – гидрокарбонатная кальциевая | 37,0 | 28,0 |
| I 1 (2) – гидрокарбонатная магниевая | 41,0 | 50,0 |
| I 1 (3) – гидрокарбонатная натриевая | 13,0 | 9,0 |
| I 2 (1) – сульфатная кальциевая | - | 3,0 |
| I 2 (3) – сульфатная натриевая | 3,0 | 6,0 |
| I 3 (3) – хлоридная натриевая | 6,0 | 3,0 |
| Водородный показатель (рН) | | |
| рН1 – кислые (3,0-5,0) | 0,5 | 2,0 |
| рН2 – слабокислые (5,0-6,5) | 7,0 | 12,0 |
| рН3 – нейтральные (6,5-7,5) | 29,0 | 24,0 |
| рН4 – слабощелочные (7,5-8,5) | 34,0 | 48,0 |
| рН5 – щелочные (8,5-9,5) | 25,0 | 14,0 |
| рН6 – сильнощелочные (выше 9,5) | 4,5 | - |
| Общая жесткость (Th) | | |
| Th1 – очень жесткие (выше 9) | 3,0 | - |
| Th2 – жесткие (6-9) | 9,0 | - |
| Th3 – умеренно-жесткие (3-6) | 32,0 | - |
| Th4 – мягкие (1,5-3) | 25,0 | 5,0 |
| Th5 – очень мягкие (менее 1,5) | 31,0 | 95,0 |

В качестве признака гидробиологического параметра озёр мы включили интегральный индекс сапробности, рассчитанный по диатомовым водорослям (Таблица 3).

Используя РЭЛК изученным 42 озёрам района исследования, были получены индивидуальные паспорта с формулой для каждого озера. На основании полученных индивидуальных паспортов выполнен кластерный анализ для создания групп озёр, схожих между собой. В качестве меры сходства применено евклидово расстояние. Используя результат кластерного анализа выявлены три преобладающих класса со следующими формулами озёр:

Таблица 3 – Сравнение эколого-лимнологических показателей гидробиологического параметра изученных озёр бассейна реки Индигирка с озёрами Якутии.

| Показатель | Якутия (n-199) | Индигирка (n-42) |
|---|----------------|------------------|
| Зона сапробности по диатомеям (S_i) | | |
| $S_{;2}$ – олигосапробная (0,50 – 1,50) | 29,0 | 64,0 |
| $S_{;3}$ – б-мезосапробная (1,51 – 2,5) | 66,0 | 36,0 |
| $S_{;4}$ – а-мезосапробная (2,51 – 3,5) | 4,0 | - |

I. E11 G9 A3 D6 K5 L3 T2 Ts1 M1 I1(3) Ph4 Th5 Si3 – **ледниковое озеро**, расположено на очень низкой высоте над уровнем моря, **среднее по площади**, с очень малой глубиной, округлое, близкой к кругу формы, с умеренной и прозрачной водой, с очень малой минерализацией, слабощелочное, с **гидрокарбонатно-натриевой** очень мягкой водой, с **бета-мезосапробной зоной** (озёра ледникового происхождения лесотундры и северной тайги);

II. E11 G1 A5 D6 K5 L3 T2 Ts1 M1 I1(1) Ph4 Th5 Si2 – **термокарстовое озеро**, расположено на очень низкой высоте над уровнем моря, **малое по площади**, с очень малой глубиной, округлое, близкой к кругу формы, с умеренной и прозрачной водой, с очень малой минерализацией, слабощелочное, с **гидрокарбонатно-кальциевой** очень мягкой водой, с **олигосапробной зоной** (большинство термокарстовых озёр субарктической тундры и северной тайги);

III. E11 G3 A4 D5 K4 L3 T3 Ts1 M2 I2(3) Ph5 Th5 Si2 – **эрозионно-термокарстовое озеро**, расположено на очень низкой высоте над уровнем моря, **небольшое по площади**, с малой глубиной, округлое, близкой к овалу формы, с теплой и прозрачной водой, с малой минерализацией, слабощелочное, с **сульфатно-натриевой** очень мягкой водой, с **олигосапробной зоной** (большинство озёр лесотундры)

Оказалось, что основными объединяющими признаками исследуемых озёр являются генезис озёрных котловин (ледниковые, термокарстовые и эрозионно-термокарстовые) и ионный состав воды озера (ледниковые – с гидрокарбонатно-натриевой водой; термокарстовые – с гидрокарбонатно-кальциевой водой; эрозионно-термокарстовые – с сульфатно-натриевой водой).

3. Выводы

Разработанная РЭЛК может быть применена для решения задач озёрного природопользования и озёрных ресурсов исследуемого региона. Индивидуальные формулы для каждого озера заданы английскими буквами для возможности применения классификации в статистической обработке данных, в том числе на компьютерных программах. Структура геоэкологической классификации будет в дальнейшем дополнена другими признаками и показателями водных объектов в зависимости от цели и задач типизации и/или инвентаризации озёрного природопользования разного уровня. В частности, при классификации озёр урбанизированных территорий (городов) можно дополнительно ввести такие показатели, как: содержание общего азота, показатель БПК5 и растворенный кислород и другие.

4. Благодарности

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности Министерства образования и науки РФ по Заданию №FSRG-2020-0019 и №FSRG-2023-0027.

5. Литература

- [1] База данных № 2018621972. Разнообразие водорослей отдела Bacillariophyta термокарстовых водоемов бассейна р. Индигирка : №2018621972 : заявл. 30.11.2018 : опубл. 06.12.2018 / Л. А. Пестрякова, Р. М. Городничев, И. М. Перепелица [и др.] ; заявитель, правообладатель Северо-Вост. фед. ун-т. – 1 с.
- [2] Левина, С.Н. Биоиндикационная оценка состояния разнотипных водоемов бассейна реки Индигирка с применением диатомового анализа / С.Н. Левина, М.И. Федулова, Н.М. Нигматуллин, П.В. Давыдова, Р.М. Городничев, Л.А. Пестрякова // География: развитие науки и образования : Коллективная монография по материалам ежегодной международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 22–25 апреля 2020 года. Том 2. – Санкт-Петербург: Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, 2020. – С. 76-79.
- [3] Levina, S.N. Diatom complexes of the surface lake sediments in the Indigirka river basin / S.N. Levina, L.A. Pestryakova // Limnology and Freshwater Biology. – 2020. – No. 4. – P. 571-572. – DOI 10.31951/2658-3518-2020-A-4-571.
- [4] Левина, С. Н. Оценка современного состояния озер низовья реки Индигирка / С. Н. Левина, П. В. Давыдова, И. А. Баишева // Региональные геосистемы. – 2021. – Т. 45. – № 2. – С. 168-182. – DOI 10.52575/2712-7443-2021-45-2-168-182.
- [5] Исследование междисциплинарного потенциала УЛЭК на примере озер России, Абхазии и Турции / А. И. Галеева, Н. М. Мингазова, Н. Уздемир, И. Р. Гильманшин // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – № 8(122). – DOI 10.23670/IRJ.2022.122.85.
- [6] Пестрякова, Л. А. Диатомовые комплексы озер Якутии : монография / Л. А. Пестрякова. – Якутск : Издательство ЯГУ, 20086. – 197 с.
- [7] Жирков, И. И. Схема лимногенетической классификации озер Северо-Востока России / И. И. Жирков // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2014. – № 34. – С. 18-25.

**ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ БАСЕЙНА РУЧЬЯ СЕМЮЕЛЯХ-САЛА
(АБЫЙСКАЯ НИЗМЕННОСТЬ) НА ПЕРСПЕКТИВНЫХ УЧАСТКАХ
ПОИСКА ИСКОПАЕМОЙ МАМОНТОВОЙ ФАУНЫ**

Яна Легостаева¹, Наталья Сивцева², Владимир Попов³, Юлия Муксунова³

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

2 Академия Наук РС (Я), 677007, Россия, г. Якутск, пр-т Ленина, 33

3 ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова»,
677000, Россия, г. Якутск, ул. Белинского, 58

**GEOECOLOGICAL CONDITIONS OF THE SEMYULYAKH-SALA CREEK BASIN
(ABYISKAYA LOWLAND) IN PROMISING AREAS OF SEARCH FOR FOSSIL
MAMMOTH FAUNA**

Yana Legostaeva¹, Natalya Sivtseva², Vladimir popov³, Yulia Muksunova³

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

3 North-Eastern Federal University, 58, Belinsky str., Yakutsk, 677000, Russia

Annotation. Brief results of ecological and geographical analysis of conditions at the site of extraction of fossil mammoth bone are presented. On the example of a site located in the basin of the Semyulyakh-Sala creek, the level of impact on the abiotic components of the ecosystem and the degree of their stability during extraction of fossil mammoth bone by the method of hydraulic washing-out. It was revealed that the 20-year period of the use of hydraulic washing-out in the extraction of mammoth bone did not significantly affect the edoma plain, the configuration of the river network, valleys and riverbeds and their coastal zone. Visualization of the processes of migration of soil material as a result of the destruction of the banks showed that during abrasion and thermal abrasion, the level of migration is many times higher than as a result of hydraulic washing-out from a motor pump. Pollution of surface waters as a result of fossil mammoth bone extraction is local in nature. The waters of the Indigirka, Tirekhtyakh rivers and the Semyulyakh creek, according to five indicators are characterized as clean, close to the natural conditions of watercourses and belong to the I class of quality. The water in the place of pulp flow on the Semyulyakh-Sala creek is characterized as moderately polluted, belonging to the III class of water quality from an ecological standpoint. Bottom deposits of watercourses in the study segments are characterized by an acceptable degree of pollution and a condition close to natural conditions with small variations in Cu, La, Y, Cr, Yb, Nb, Mo contents.

Keywords. Mammoth fauna, Abyiskaya lowland, Yakutia, stability of geosystems, man-made impact, hydraulic washing-out

1. Введение

Рациональное освоение минерально-сырьевых ресурсов в современных условиях должно соответствовать экологическим нормам. Остро ставятся вопросы экологии и охраны природы в горнодобывающих регионах с высокоразвитой промышленностью в связи с длительным периодом их восстановления [1]. При этом существенное воздействие на недра и экосистему в целом начинается уже с этапа разведки. Основные мировые запасы ископаемой мамонтовой кости (ИМК) и мамонтовой фауны, которые являются уникальным биоминеральным ресурсом, выявлены по данным некоторых исследователей в «Североякутской костеносной провинции», расположенной в тундровой и лесотундровой зоне Яно-Индибирской и Колымской низменностях [2; 3].

Последние четыре года в Якутии добывается ежегодно порядка 122 тонн остатков мамонтовой фауны, из них 96 процентов приходится на бивни мамонта. Эксперты считают, что на сегодняшний день под видом сбора ископаемой мамонтовой кости как палеонтологического, коллекционного материала ведётся промышленная добыча сырья [4].

Добыча мамонтовой фауны законом не предусмотрена, лицензии выдаются недропользователям на сбор бивней. Но то обстоятельство, что при добыче бивней при помощи мотопомп можно добыть высококачественный товар, заставляет людей идти на нарушение имеющегося законодательства. Осложнение геоэкологической ситуации при добыче полезных ископаемых на Севере, в том числе и ИМК, обусловлено слабой восстановительной способностью природных компонентов на фоне постоянно растущего техногенного давления в криолитозоне [5;6]. Несмотря на достаточно большой объем исследований воздействия геологоразведочных и непосредственно добычных работ на компоненты ландшафта, практически нет исследований, касающихся отклика окружающей природной среды на процесс добычи ИМК.

Цель работы – геоэкологическая оценка состояния абиотических компонентов экосистемы на модельном участке добычи мамонтовой кости методом гидроразмыва.

2. Краткая характеристика метода поисков и добычи ИМК

Участки находок мамонтового фаунистического комплекса находятся, как правило, на поворотах крупных рек и в ручьях тундровой зоны, при этом обязательно наличие жильных льдов в едомных отложениях или лессовидного суглинка, в которых произошло захоронение остатков мамонтовой фауны. Существует несколько видов поиска и добычи ИМК, при этом самый распространенный и, в тоже время запрещенный законодательством РС (Я) шахтовый поиск [7]. Применяется на склонах и ярах береговой полосы (рис.1). После находки бивня мамонта на берегу в этом месте начинают размывать почву струёй воды мотопомпы. При размывании почвы начинают появляться фрагменты бивней и костей мамонта, локализуя костеносный горизонт. Дальнейший поиск и размывание грунтов ведут внутри шахт.



Рисунок 1 – Унифицированная схема добычи ИМК.

3. Характеристика основных природно-климатических факторов устойчивости экосистем к техногенному воздействию

Ручей Семюелях-Сала (длина 14 км) является правым притоком реки Семюелях, впадающего в правый приток реки Индигирки – реку Тирехтях (длина 119 км). Расстояние от пос. Белая Гора до устья реки Тирехтях по реке Индигирка составляет 50 км, а устье реки Семюелях расположено на расстоянии 4,6 км от устья р.Тирехтях, соответственно устье реки Семюелях-

Сала – 4,8 км. Территория бассейна реки Тирехтях (1260 км²) расположена в Абыйском улусе республики Саха (Якутия), включенном в состав Арктической зоны Российской Федерации. В географическом плане территория бассейна реки Семюелях-Сала расположена в таежной области страны Северо-Восточная Сибирь на фрагменте Абыйской низменности.

Район полностью находится за Северным Полярным кругом и характеризуется экстремальными природно-климатическими условиями. Климат территории принадлежит субарктическому поясу сибирской области. Среднегодовая температура воздуха за последние 20 лет составляет -11,6 °С, она значительно выросла, так как в XX веке уверенно держалась в районе -14 °С. Отрицательные температуры держатся с сентября по май. Годовые суммы атмосферных осадков сильно колеблются от 23 до 374 мм, в среднем составляя 206 мм. Основная доля осадков (50 – 60 %) приходится на теплый период года. Снежный покров лежит более двух третей года в течение 8 месяцев. Незначительный влагозапас маломощного снежного покрова способствует быстрому стоку талых вод, инфильтрации которых препятствуют многолетнемёрзлые породы.

Все реки рассматриваемой территории относятся к Восточносибирскому типу, характеризующемуся высоким весенним половодьем, летними паводками и очень низкой зимней меженью. 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-Сала имеет долину шириной до 100 метров, в основном ее ширина в нижнем течении составляет 70 метров. На склонах развиты ложбины стока или делли, часто они не четки, не заметны в рельефе и выражаются через растительность.

На космических снимках Google Earth разных лет (1985 и 2021 годы) отчетливо видно, что конфигурация долин и русел рек Семюелях и Семюелях-Сала не изменилось, т.е. является устойчивым, хотя здесь имело место быть добыча мамонтовой кости методом гидроразмыва (рис.2).



Рисунок 2 – Космоснимки конфигурации русла рек Семюелях и Семюелях–Сала за 1985 и 2021 годы.

Вода характеризуется нейтральной реакцией среды, сульфатно–магниевым составом, слабой минерализацией, со слабым запахом в июне и очень слабым запахом в июле, цветность уменьшается в 5 раз по сравнению с июнем. Разница в гидрохимическом составе вод между июнем и июлем отмечается только по содержанию сульфатов. Для вод р. Индигирка свойственен не высокий уровень минерализации. По величине общей жесткости вода «очень мягкая». Воды реки отличаются пониженным содержанием солей. По соотношению главных ионов вода относится к сульфатному классу, магниевой группе, II типа. На долю сульфатов приходится 30–40 % от всей суммы ионного состава. В распределении катионного состава 16–19% — это ионы кальция и порядка 25–28% - магния. По компонентному солевого составу значительных превышений ПДКвр не зафиксировано. В микроэлементном составе

поверхностных речных вод проведен анализ на содержание восьми микроэлементов – Fe, Mn, Cu, Pb, Ni, Cd, Zn и Co. Из них во всех пробах ниже предела обнаружения анализа оказались Pb и Cd. Марганец был зафиксирован только в одной пробе, отобранной непосредственно на стоке пульпы в месте работы насоса на руч. Семюелях–Сала. Медь в двух пробах. Никель и цинк обнаружены в 52% проб, а кобальт – в 76% проб. Общее железо зафиксировано во всех отобранных пробах в достаточно высоких концентрациях. В разгар добычных работ на руч. Семюелях-Сала поверхностные воды на исследуемых отрезках рек Индигирка, Тирехтях и ручья Семюелях по пяти показателям характеризуются как чистые, приближенные к естественным условиям водотоков и относятся к I классу качества вод (рис.3).

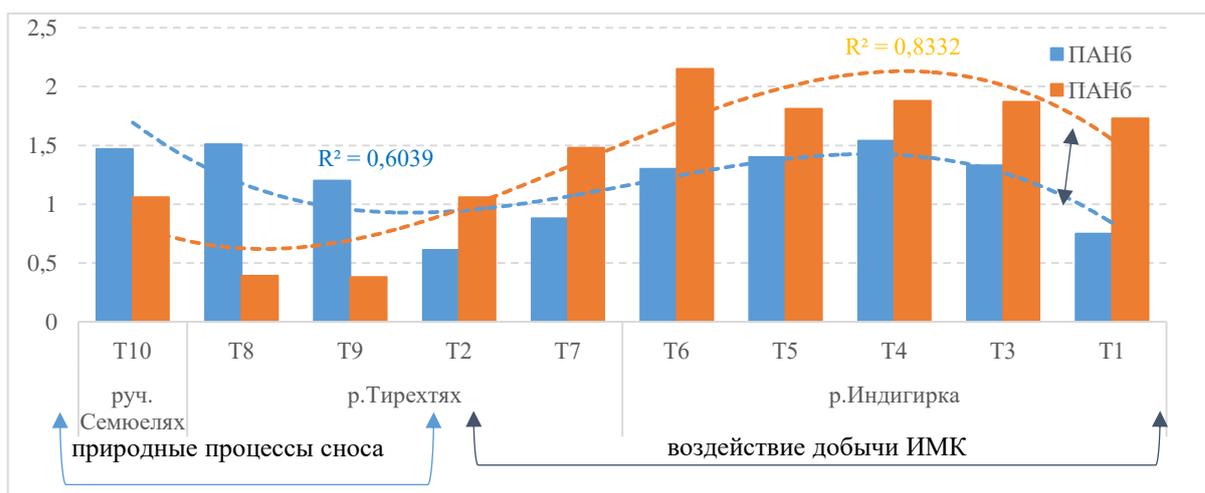


Рисунок 3 – Показатель антропогенной нагрузки (ПАН⁶) водотоков на исследуемых отрезках рек в июне и июле 2022 г.

В месте стока пульпы на ручье Семюелях-Сала воды отличаются большей мутностью и характеризуется как умеренно загрязненные, относящиеся к III-му классу качества вод с геоэкологических позиций. Основные превышения относительно фоновых значений выявлены по Zn и Ni, коэффициенты концентрации (Kк) варьируют в пределах 2–3 г/ф для Ni и в 1,5–3,4 г/ф для Zn. В отношении санитарно–гигиенических нормативов оценки состояния поверхностных вод можно сделать вывод о существовании не высокого превышения рыбохозяйственных нормативов по Fe и Ni.

Река сносит грунтовый материал, образованный при разрушении берегов в результате абразии и термоабразии многократно больше (рис. 4а), чем тот который образовался в результате гидроразмыва, этот объем на общем фоне исчезающее мал. Он так же очень мал по сравнению с объемом материала дноуглубительных работ на реке Индигирке достигающих 1 млн. м³ в год. Пустоты штолен 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 мерзлотных условий, образование просадок. Однако за прошедший промежуток времени геосистемы оказались в целом достаточно устойчивы к техногенному воздействию того объема горных работ по добыче мамонтовой кости, который произошел до настоящего времени. Под устойчивостью геосистем обычно понимается их способность испытывать внешние воздействия без разрушения, когда геосистема перестает быть сама собою и становится другой геосистемой. Одним из факторов устойчивости является то, что обрушенные склоны, сложенные супесями и суглинками выполаживаются и легко зарастают растительностью на суглинистом субстрате (рис. 4б).



Рисунок 4 – Естественное разрушение береговой линии (а) и зарастание выположенных берегов (б).

Одним из главных факторов геоморфологической устойчивости является холод. С другой стороны, геосистемы Абыйской низменности сильно или даже катастрофически уязвимы. Уязвимость – свойство, обратное устойчивости, т.е. неспособность противостоять внешним воздействиям. Главной особенностью, определяющей уязвимость северных геосистем, является наличие мерзлого льдистого субстрата, легко теряющего равновесное состояние под влиянием деструктивных процессов или при нарушении температурного режима мерзлоты. Формирование подземного льда – самого неустойчивого минерала земной коры, его количество, условия залегания и распространения – важнейший фактор уязвимости литогенной основы северных геосистем. Любое нарушение теплового баланса поверхности здесь приводит к активному развитию криогенных процессов с полным преобразованием ландшафта с деформацией поверхности. Таким образом, для данной территории геоэкологический риск является весьма высоким. Реакция криогенного ландшафта на внешние воздействия определяется с его геолого-геоморфологическими особенностями. Четвертичные отложения, формирующие собой едому, сложены алиивритом, лессовидными суглинками с небольшим содержанием песчаной фракции, льдом. Ледовый комплекс включает мощную систему повторно-жильных льдов, пронизывающих толщу на всю мощность отложений. Для территории характерны основные криогенные процессы, как морозобойное растрескивание, термокарст, пучение, термосуффозия, солифлюкция. Особенно хотелось бы подчеркнуть вопрос потепления климата. Среднегодовая температура растет и повысилась с $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ до можно сказать $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Другим аспектом климатических преобразований является изменение увлажненности территории и стока рек. К сожалению, длительного ряда наблюдений за осадками на данной территории нет, особенно слабо изучены малые и средние реки, такие как Тирехтях и Семюелях. Однако можно сделать вывод, что эти характеристики также меняются и они вышли из устойчивого состояния, об этом говорят скачки то в сторону маловодности или наоборот чрезмерного половодья как в этом году. Изменяется годовой режим стока. Весь этот комплекс может вызвать в конечном итоге полное разрушение едомы, его ландшафтов и полное преобразование территории. Этот процесс может иметь глобальные последствия. Соответственно нам пока дана возможность исследовать эти объекты. Соответственно необходимы дальнейшие гидрологические, геоэкологические, мерзлотно-гидрогелогические, геоморфологические, стратиграфические, геологические и географические исследования. Для этого в пос.Белая Гора целесообразно организовать научную станцию для исследования всей территории нижней Индигирки.

4. Выводы

Анализ дешифрирования снимков, показал, что 20–ти летний период применения методов гидроразмыва при добыче мамонтовой кости методом не значительно повлияла на едомную равнину, конфигурацию речной сети, долины и русла рек и их прибрежной зоны.

Визуализация процессов сноса грунтового материала в результате разрушения берегов выявила, что при абразии и термоабразии уровень сноса многократно больше, чем в результате гидроразмыва при использовании мотопомпы.

Образование пустот в виде пещер в дальнейшем при их обрушении, наполнении водой и каких-либо других процессах может вызвать на земной поверхности формирование отрицательных форм рельефа, активизацию термокарста, локальное изменение мерзлотно-гидрогеологических условий и образование просядок.

Загрязнение поверхностных вод в результате добычи ИМК носит локальный характер. Воды р.р. Индигирка, Тирехтях и руч. Семюлях по пяти показателям характеризуются как чистые, приближенные к естественным условиям водотоков и относятся к I классу качества. Вода в месте стока пульпы на ручье Семюлях-Сала характеризуется как умеренно загрязненная, относящаяся к III-му классу качества вод с экологических позиций.

Донные отложения водотоков на отрезках исследований характеризуются допустимой степенью загрязнения и состоянием, приближенным к естественным условиям с небольшими вариациями содержаний Cu, La, Y, Cr, Yb, Nb, Mo.

В целом состояние почвенного покрова на участках исследований характеризуется допустимым уровнем загрязнения почвенного покрова. Верхние органогенно-аккумулятивные горизонты отличаются слабой аккумуляцией и низкими значениями суммарного показателя загрязнения (Zc).

Анализ природных факторов показал, что за прошедший промежуток времени геосистемы оказались в целом достаточно устойчивы к техногенному воздействию того объема горных работ по добыче мамонтовой кости, который происходит до настоящего времени.

5. Литература

- [1] Серпуховитина Т.Ю., Лазарев Р.А., Логвинова А.Н., Цыцорин И.А. Анализ антропогенных факторов воздействия на гидросферу и пути их снижения в горнодобывающих регионах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 2-1. – С. 263-274.
- [2] Керемясов Н. В. Методы и технологии поиска ископаемой мамонтовой кости / Н. В. Керемясов // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия: Науки о Земле. – 2018. – № 2(10). – С. 5-18.
- [3] Нестерова Е. А. Поиск местонахождений остатков мамонтовой фауны в криолитозоне с использованием ГИС-технологий и геофизических методов / Е. А. Нестерова, Н. Н. Николаева, И. В. Горохов // МАТЕРИАЛЫ XXI Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов в г. Нерюнгри, с международным участием : Материалы конференции, Нерюнгри, 27–29 февраля 2020 года. – Нерюнгри: Изд-во Технического института (ф) СВФУ, 2020. – С. 149-153. – DOI 10.18411/tifsvfu-2020-C1-196-43.
- [4] <https://ysia.ru/vyvesti-dobychu-bivnej-mamontov>
- [5] Зятькова, Л.К., Елепов, Б.С. У истоков аэрокосмического мониторинга природной среды («Космос» - программе «Сибирь»): монография. / Л.К. Зятькова, Б.С. Елепов. – Новосибирск: СГТА, 2007. – 380 с.
- [6] Вицентий А. В. Применение дистанционного зондирования земли и космических технологий для развития арктических и субарктических территорий Российской Федерации / А. В. Вицентий // Труды Кольского научного центра РАН. – 2013. – № 5(18). – С. 40-45.
- [7] Распоряжение №649-РГ

ТОРИЙ ВО ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВАХ ЛЕТНЕЙ И ЗИМНЕЙ ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ ЯКУТСКА

Владимир Макаров

ФГБУН «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН»,
677010, Россия, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36

THORIUM IN SUSPENDED MATTER IN THE SUMMER AND WINTER SURFACE ATMOSPHERE OF YAKUTSK

Vladimir Makarov

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36, Permafrost str., Yakutsk, 677010, Russia

Annotation. The distribution of thorium in suspended matter (PM) in the summer and winter surface atmosphere of Yakutsk has been studied. It has been established that the average concentration of Th in explosives is: 5,5 mg/kg in summer and 1,45 mg/kg in winter. In the explosive dust-explosive snow system, a sharp decrease in the concentration of Th is observed. The bulk of Th, about 90%, falls out of the atmosphere during the warm period of the year. The volume of atmospheric input of Th into the territory of the city is on average about 0,261 mg/m² day. In areas of geochemical anomalies in the northern industrial part of the city, this value increases two to three times. The total fallout of Th on the territory of the city is about 0,6·10⁻²% of the annual intake of pollutants from the atmosphere.

1. Введение

Загрязняющие воздух взвешенные вещества (ВВ) – это собирательное понятие, включающее твердые частицы, атмосферные аэрозоли, непосредственно поступающие в воздух, и те частицы, которые образуются в процессе превращения газов. Уровень загрязнения ВВ является одним из важнейших показателей качества воздуха, которым дышат люди. Взвешенные вещества - недифференцированная по составу пыль (аэрозоль), содержащаяся в воздухе населенных пунктов; показатель вредности - резорбтивное действие, класс опасности – 3. Распространение актиноидов в том числе и Th в атмосфере северных урбанизированных территорий остается малоисследованной проблемой.

2. Результаты и обсуждение

На территории Якутска было проведено геохимическое изучение ВВ в летней и зимней (снежный покров) приземной атмосфере.

Для исследования ВВ летней атмосферы на территории города л в период с 17 июля по 15 октября 2019 г. был проведен сбор пыли в пылесборники. Для получения сведений о зимней атмосфере в марте 2020 г. на территории города было отобрано 80 проб снега. Изучалась растворимая и твердая фазы снега.

Аналитическая обработка геохимических проб проведена в лаборатории подземных вод и геохимии криолитозоны Института мерзлотоведения СО РАН (аналитики Л.Ю. Бойцова, Е.С. Петрова и О.В. Шепелева) и в Аналитическом сертификационном испытательном центре Института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН. Содержание Th определялось масс-спектральным (X-7, Thermo Elemental, США) методом анализа.

Считается, что основным источником поступления актиноидов в зону гипергенеза являются горные породы. В геологическом отношении район исследований расположен в зоне стыка двух крупных структур Сибирской платформы: Алданской антеклизы и Вилюйской синеклизы. В геохимическом отношении территория относится к Вилюйской лито-сидерофильной области с накоплением относительно КЗК V, Ti, Mn, P, Sb, Sn, Li, Nb, U и Лено-Алданской

халькофильной зоне с накоплением Se, Pb, Ag, Bi, Au [1]. Характер концентрирования тория в компонентах зоны гипергенеза, которые могут быть источниками Th привносимого в атмосферу приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Концентрирование Th в геологических составляющих зоны гипергенеза [2, 3].

| Компоненты зоны гипергенеза | Коэффициент концентрации относительно кларка земной коры [4] | | Кол-во проб |
|-----------------------------------|---|---------|-------------|
| | 0.7-1.0 | 1.0-1.5 | |
| Аллювий, Q | Th | - | 124 |
| Почвы города | - | Th | 1769 |

Аллювиальный комплекс голоцена представлен в нижней части разреза комплекса галечниками и песками, а в верхней состоит из песков, супесей и суглинков. Техногенные почвы города, где доминируют урбаноземы и экраноземы, незначительно обогащены Th по сравнению с аллювиальными отложениями.

Среднее содержание тория в геосферах и компонентах окружающей среды приведено в таблице 2.

Таблица 2 – Среднее содержание тория в литогенных компонентах окружающей среды, мг/кг.

| Природная среда | Th | Источники |
|--|----------|-----------|
| Атмосфера | | |
| Взвешенные вещества (пылевая фаза), Якутск | 1,45-5,5 | Автор |
| Литосфера | | |
| Литосфера | 13,0 | [4] |
| Пески, песчаники | 6,7 | [5] |
| Почво-грунты, Центральная Якутия | 7,3 | [6] |
| Почво-грунты, район Якутска | 10,6 | |

ВВ в летней атмосфере полидисперсны и представляют собой совокупность твердых частиц разного размера. Дисперсный состав ВВ в основном относится к собственно пыли, фракция PM_{10-100} – около 70% (PM – аббревиатура “particulate matter”, цифра показывает содержание всех частиц диаметром 10-100 мкм). Для Th наблюдается накопление в пылеватых фракциях, в комплексе с группой преимущественно сидерофильных элементов - Ti, Mn, Co, Ni, Zn, Ga, Sr, Zr, Sn, La, W, поступающих в атмосферу в основном с минералами группы железа.

Минералогический состав основной массы «летних» ВВ (PM_{10-100}) в атмосфере города представлен в легкой фракции: кварцем и карбонатами (по 36%) и полевым шпатом (24%); в тяжелой: преимущественно амфиболами (49%), эпидотом и пироксенами (10-11%), ильменитом и гранатами (около 7%). Более дисперсные «зимняя» ВВ (PM_{10}) сложена в основном карбонатами (около 70%), углистыми соединениями (15%), включениями кварца и полевого шпата 10%) и железистого растительного детрита (5%). Специфичными минеральными фазами ВВ коррелирующими с актиноидами, осевшими на почвенный покров в зоне техногенного воздействия, являются: для Th пироксены и амфиболы.

Установлено, что в приземной атмосфере Якутска формируются техногенные геохимические аномалии актиноидов, в том числе и Th [7]. Торий во ВВ летней и зимней атмосферы формирует обширные малоконтрастные ореолы, примерно равные по площади, преимущественно в северной и южной промышленных зонах города (Рисунок).

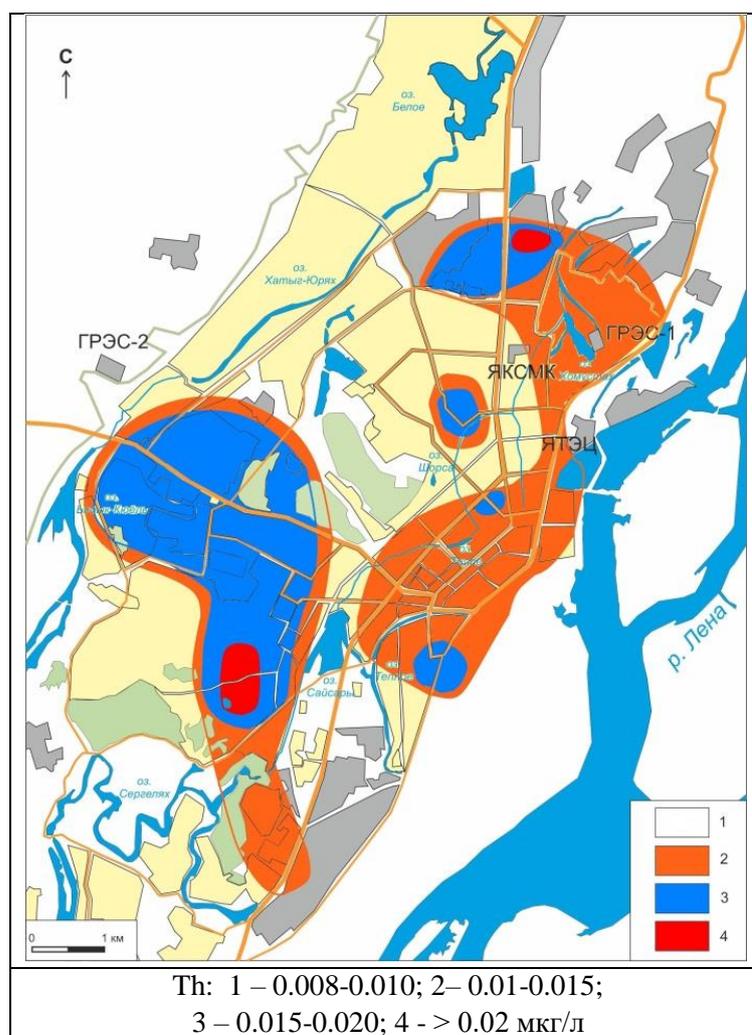


Рисунок – Содержание Th в растворимой фазе снежного покрова.

Среднее содержание Th в компонентах атмосферы и литосферы в районе Якутска представлено в таблице 3.

Таблица 3 – Распределение Th во ВВ летней и зимней атмосферы.

| Элементы | Ед. изм | $C_{\text{мин}}$ | $C_{\text{макс}}$ | $C_{\text{ариф}}$ | $C_{\text{геом}}$ | n |
|-----------------------|---------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----|
| ВВ, лето (пыль) | мг/кг | 3,7 | 10,6 | 5,5 | 5,2 | 10 |
| ВВ, зима (снег) | | 0,05 | 5,8 | 1,45 | 0,81 | 80 |
| Зима, аэрозоли (снег) | нг/л | 0,9 | 25,0 | 7,6 | 6,3 | 80 |
| Почва | мг/кг | - | - | 10,6 | - | 4 |

Примечание: Содержание: $C_{\text{мин}}$ – минимальное; $C_{\text{макс}}$ - максимальное, $C_{\text{ариф}}$ - среднее арифметическое; $C_{\text{геом}}$ среднее геометрическое; n - кол-во проб.

Наблюдается равномерное понижение концентрации Th в системе почвы- ВВ летние - ВВ зимние - аэрозоли и газы (зимние). В зимних ВВ, в водной фазе снега, содержание Th резко понижается из-за очень низкой миграционной способности элемента.

Основная масса Th – около 90% выпадает из атмосферы в теплый период года. Ежесуточное поступление Th из атмосферы в это время составляет в среднем 0,233, максимальные значения 0,934 мг/м²·сутки.

На зимние твердые впадения ВВ (преимущественно фракция PM₁₀) приходится около 11% от общей массы поступления Th из атмосферы на территорию города. Ежесуточное поступление

Th из атмосферы в холодный период на порядок ниже, чем летом и составляет 0,028 мг/м²·сутки.

С аэрозольными и газовыми выпадениями (растворимая фаза снега) из зимней атмосферы поступают минимальные объёмы Th, в среднем $0,9 \cdot 10^{-7}$ мг/м²·сутки (табл. 4).

Таблица 4 – Ежегодное поступление Th из атмосферы

| Активные | Статистические параметры | Летний период. | | Зимний период. Снег | | | | Сумма выпадений |
|----------|--------------------------|------------------------|----|------------------------|----|------------------------|-------------------|-----------------|
| | | Взвешенные вещества | | Пыль | | Аэрозоли, газы | | |
| | | мг/м ² ·сут | % | мг/м ² ·сут | % | мг/м ² ·сут | % | |
| Th | С _{арифм} | 0,233 | 89 | 0,028 | 11 | $0,9 \cdot 10^{-7}$ | $n \cdot 10^{-7}$ | 46,5 |
| | С _{макс} | 0,934 | 95 | 0,053 | 5 | $0,3 \cdot 10^{-6}$ | $n \cdot 10^{-6}$ | 169 |

Общий объем атмосферного поступления Th на территорию города оценивается цифрой около 46,5 мг/м²·год. На участках контрастных аномалий эта величина может возрасти почти в четыре раза, достигая 169 мг/м²·год. Суммарное выпадение Th на территорию города составляет около $n \cdot 10^{-3}$ % от общего объема загрязняющих веществ поступающих из атмосферы.

3. Заключение

Во ВВ приземной атмосферы Якутска формируются техногенные геохимические аномалии макро- и микроэлементов, в том числе и Th, формирующие обширные мало контрастные ореолы преимущественно в промышленных частях города.

ВВ в приземной летней атмосфере полидисперсны и представляют собой совокупность твердых частиц разного размера. В летней атмосфере Th концентрируются преимущественно в пылевой фракции ВВ (PM₁₀₋₁₀₀), в комплексе с группой сидерофильных элементов. Зимние ВВ в основном представлены фракцией PM₁₀.

Специфичными минеральными фазами ВВ коррелирующими с Th, осевшими на почвенный покров в зоне техногенного воздействия, являются: пироксены и амфиболы, суммарная концентрация которых в тяжелой фракции летних ВВ составляет около 60%.

Концентрация Th равномерно понижается в системе: почвы - ВВ летние - ВВ зимние (снег). Основная масса Th – около 89% выпадает из атмосферы в пылевой фазе в теплый период года. Ежегодное поступление Th из атмосферы на территорию города в это время составляет в среднем 0,233 мг/м²·сут. На зимние твердые впадения ВВ приходится всего 11% от общей массы поступления Th из атмосферы. Ежегодное суммарное поступление Th из атмосферы в холодный период на порядок ниже, чем летом 0,028 мг/м²·сут. Общий объем атмосферного поступления Th на территорию города оценивается цифрой в 46,5 мг/м²·год. На участках контрастных аномалий эта величина возрастает в два-три раза. Суммарное выпадение Th на территорию города составляет около $0,6 \cdot 10^{-2}$ % от годового объема поступления загрязняющих веществ из атмосферы.

Основными источниками поступления Th в приземную атмосферу Якутска являются пыление с поверхности почв и выбросы автотранспорта. В меньшей степени - выбросы объектов энергетики и стройиндустрии.

Полученные данные о распределении и содержании Th в городской атмосфере могут быть использованы для оценки путей поступления Th в окружающую среду.

4. Литература

- [1] Geology and mineral resources of Russia. Т. 3. Eastern Siberia (2002). SPb.: VSEGEI, 396 p.
- [2] Makarov V.N. Ecogeochemistry of the environment of a city located in the permafrost zone (on the example of Yakutsk) / V.N. Makarov // Regional Ecology. – 2016. – No. 4 (46). – P. 7-21.

- [3] Podyachev B.P. Geochemical anomalies of noble metals in sedimentary deposits of the Yakut uplift / B.P. Podyachev // Root source-placer system. – Yakutsk: Publishing House of YaNTs SO RAN, 2009. – P. 166-173.
- [4] Vinogradov A.P. Geochemistry of rare and trace chemical elements in soils / A.P. Vinogradov // Geochemistry. – 1962. – No. 7. – P. 555-571.
- [5] Grigoriev N.A. Distribution of chemical elements in the upper part of the continental crust / N.A. Grigoriev. – Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2009. – 382 p.
- [6] Chevychelov A.P. The Contents and Distributions of Natural Radionuclides ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K in Permafrost Soils of Central Yakutia / A.P. Chevychelov, P.I. Sobakin // Journal of Siberian Federal University. Biology. – 2020. – No. 13(1). – P. 109-123. (translated from English).
- [7] Ecogeochemistry of suspended matter in the atmosphere of Yakutsk / V.N. Makarov, N.V. Torgovkin / Sib. Department of the Russian Academy of Sciences, Inst. P.I. Melnikov. – Yakutsk: Publishing House of the Institute of Permafrost Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2021. – 94 p.

БАТАГАЙСКИЙ ПРОВАЛ

Юрий Мурзин

ФГБУН «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН»,
677010, Россия, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36**BATAGAY SINKHOLE**

Yuri Murzin

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36, Permafrost str., Yakutsk, 677010, Russia

Annotation. The Batagay ‘sinkhole’ exposure is located on the south-eastern saddle of Kirgilyakh mountain in the Yana Upland, between the towns of Batagay and Ege-Khaya. The 1:100,000-scale topographic map published in 1965 shows the ‘sinkhole’ as a linear depression 10 m in width and 5 m in depth. By 1969, the depression was slightly larger, retaining its elongated shape. Starting from the 1990s the ‘sinkhole’ has been rapidly expanding and deepening and now measures over 600 m in width and over 4 km in length. The surficial sediment is 60 m thick, underlain by Triassic rocks. The exposed surficial material contains two visibly distinct layers. The upper layer consists of silts which contain ice wedges with a basal cryostructure. The lower layer is composed of sands with an asseive cryo structure. Three factors, anthropogenic, climatic and tectonic, contributed to the development of the Batagay ‘sinkhole’. It is a current thermokarst feature representing a normal evolution process in the region.

1. Введение

В 2018 г. нами были проведены геокриологические исследования в долине р. Батагайки. Был получен интересный материал по Батагайскому «провалу». Обнажение Батагайского «провала» расположено в пределах Янского плоскогорья и находится между посёлками Батагай и Эге-Хая, на юго-восточной седловине горы Киргилях. На топографической карте масштаба 1:100000 издания 1965 г. «провал» показан в виде линейной депрессии шириной 10 м. и глубиной 5 м. В 1969 г. депрессия также носила линейный характер и имела незначительно большие размеры. С 70-х годов прошлого века «провал» начал резко увеличиваться в ширину и глубину, и настоящее время ширина «провала» составляет более 600 м, при длине 4 км.

2. Основной раздел статьи

Исследования, проведённые в Янском плоскогорье, в долинах рек Кючюса, Кипиче и Адычи (притоки реки Яны) показали, что в тонкодисперсных наносах этих рек выделяются два яруса повторно-жильных льдов (ПЖЛ). Верхний ярус ледяных жил, мощность до 20 м развит в склоновых отложениях представленных тёмно-серыми суглинками с базальной криогенной текстурой. В аллювиальных наносах с линзовидной и массивной криогенными текстурами выделяется нижний ярус ПЖЛ [1,2,3,4]. Буровыми работами, на контакте склоновый и аллювиальных отложений, были вскрыты пластовые льды мощностью до 1 м [5].

В разрезе Батагайского «провала» хорошо выражены две толщи рыхлых отложений, имеющих различный состав. Верхняя толща представлена суглинками (всего четыре пачки), разделённых слоистыми супесями. Для этой толщи характерно высокое содержание подземного льда, представленного ледяными жилами с базальной криогенной текстурой. Ниже расположена толща мелкозернистых желтовато-серых, подстилаемых серыми и тёмно-серыми песками. Для этой толщи характерна массивная криогенная текстура (Рис. 1).



Рисунок 1 – Обнажение Батагайского «провала». Верхняя толща представлена суглинками с ледяными жилами и базальной криогенной текстурой. Нижняя толща представлена песками с массивной криогенной текстурой. Фото Мурзина Ю.А.

Батагайский «Провал» дренирует ручей, питающийся водами ископаемого льда и атмосферными осадками. В летний период вода в ручье насыщена большим содержанием тонкодисперсного материала и напоминает суспензию. Ручей впадает в р. Батагай. Вода в реке ниже устья ручья имеет повышенную мутность, и становится малопригодной для питьевого водоснабжения пос. Батагай. (Рис. 2).



Рисунок 2 – Центральная часть Батагайского «провала». Фото Мурзина Ю.А.

Появлению Батагайского «провала» благоприятствовали следующие факторы.

1. Антропогенный. «Провал» расположен не далеко от карьера, в котором добывают песок. Всё началось с того, что в 1937 году на горе Кестер московский геолог П.П. Епифанов открыл месторождение олова и редких металлов. На базе крупнейшего из обнаруженных Епифановым оловоносных месторождений, Эге-Хайского, в 1938 году началось строительство рудника и был заложен рабочий поселок Эге-Хая, где было организовано Управление по строительству олово обогатительного комбината. Уже в 1940 году на руднике добывалось 51,6 тонн олова. В конце 1940 года все строительство на территории Верхоянского района передали в ведение

Дальстрою НКВД, и первым лагерем Янлага стал Эге-Хайский ИТЛ №6. Для нужд поселка и рудника велись активные лесозаготовительные работы в окрестностях поселка Эге-Хая, в том числе и на месте образования «Батагайки». По периметру термокарстовой впадины до сих пор сохранились и заметны пни лиственницы высотой от 30 до 70 см. Вполне вероятно, что активная площадная вырубка леса нарушила естественный экологический баланс и позволила ускорить оттайку сезонно-талого слоя высокольдистых грунтов с образованием вначале глубокого оврага, переросшего со временем в огромный термокарстовый провал с вертикальными стенками.

2. Климатический. По метеостанции Верхоянск, с 1967 по 2010 гг. отмечались заметные климатические изменения. Они сводились к следующему: 1. Более чем на 1° увеличилась среднегодовая температура воздуха. 2. Почти на 20 мм возросла сумма летних атмосферных осадков. В июле 2005 г., в пос. Батагай селевым потоком была разрушена центральная улица. Причиной схода селевого потока явились проливные дожди, продолжающиеся несколько дней (с 25 июля по 30 июля 2005 г). Вода переполнила искусственный водоём, созданный в своё время для технического водоснабжения пос. Аэропорт. Дамбой для водоёма служила примыкающая непосредственно к нему асфальтированная дорога «Батагай-Аэропорт». Справа от дороги резкий обрыв в сторону распадка. Переполнившись, массы воды прорвали перемышку дороги и грязевым потоком ринулись по уклону в сторону п. Батагай. Что и привело к стихийному бедствию (Рис. 3).



Рисунок 3 – В Верхоянском районе, в ночь с 29.07.2005 г. на 30.07.2005 г., на пос. Батагай обрушился селевой поток, который нанёс значительный урон коммуникациям, ЛЭП, жилищным и административным постройкам. Основной удар селевой поток нанёс центральной ул. Ленина. Фото Сорокиной К.М.

3. Тектонический. На Северо-Востоке Якутии, самыми значительными скоростями вздымания (до 20 мм/год) отмечается в Верхоянской горной системе. В феврале 1951 г. в бассейне р. Адычи было отмечено землетрясение силой 7 баллов. В посёлке Батагай интенсивность толчков составила 4 балла[20]. В феврале 2013 г. было отмечено Абыйское землетрясение, интенсивность сотрясений в Батагае достигала 6 баллов [6,7,8].

3. Выводы

В Янском плоскогорье, где располагается Батагайский «провал», несмотря на широкое распространение подземные льдов, близко залегающих к дневной поверхности, развитие термокарста имеет ограниченное распространение. Это, по всей вероятности, обусловлено

низкими температурами горных пород и большими запасами холода в них. Батагайский «провал» – это современное термокарстовое образование, представляющее собой нормальный процесс развития территории.

4. Литература

- [1] Murzin, Yu.A. Permafrost in the Kyuchus River valley // *Priroda*. – 2014. – No. 2. – P. 39-44.
- [2] Murzin, Yu.A. Ground ice in the Kimpiche River basin // *Priroda*. – 2016. – No. 10. – P. 60-67.
- [3] Murzin, Yu.A. Permafrost of the Tuostakh depression // *Priroda*. – 2019. – No. 10. – P. 19-25.
- [4] Murzin, Yu.A. Thermokarst of the eastern Verkhoyansk region // *Vestnik SFVU. Seria "Nauki o Zemle"*. – 2019. – No. 1 [13]. – P. 48-54.
- [5] Murzin, Yu.A., Zhizhin, V.N. Geocryological conditions in the Kisilyakh Ridge intersection with the Adycha River // *Proc. V All-Russian Scientific and Practical Conference (March 31 - April 2, 2015), Geology and Mineral Resources of the North-East of Russia*. – Yakutsk: NEFU, 2015. – P. 299-303.
- [6] Kochetkov, V.M. *Seismicity of Yakutia*. – Moscow: Nauka, 1966. – 92 p.
- [7] Imaev, V.S., Imaeva, L.P., Kozmin, B.M. *Active faults and seismotectonics of North-Eastern Yakutia*. – Yakutsk, 1990. – 138 p.
- [8] Shibaev, S.V., Kozmin, B.M., Petrov, A.F. et al. *Earthquakes in Russia in 2013*. – Obninsk: GS RAS, 2015. – 224 p.

РТУТЬ В ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ ЭКОСИСТЕМАХ РЕГИОНОВ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ: ПРИРОДА, МИГРАЦИЯ, ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ

Сабир Мустафин¹, Галина Анисимова²

1 ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», 450076, Россия, Республика
Башкортостан,

г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32

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

MERCURY IN NATURAL AND MAN-MADE ECOSYSTEMS OF SUBSOIL USE REGIONS: NATURE, MIGRATION, ENVIRONMENTAL RISKS

Sabir Mustafin¹, Galina Anisimova²

1 Ufa University of Science and Technology,

32, Zaki Validi str., Ufa, Republic of Bashkortostan, 450076, Russia

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

Annotation. Mercury as a toxic pollutant of environmental components requires a quantitative assessment of the scale of emission and migration in the process of technogenic transformation of mining regions. The specific features of the concentration of mercury in natural mineral raw materials, commercial products and processing wastes are characterized by the example of mercury-containing copper pyrite deposits in the Urals. Mercury is used as a reliable element-tracer of the evolution of the technogenic system: mineral raw materials - subsoil waste - environmental components - food products - the human organism. An integrated approach is recommended for optimizing forecasting, assessment and management of geological and environmental risks as tools for geological and environmental monitoring of a modern mining engineering system

1. Введение

Минаматская конвенция по ртути ООН (Minamata Convention on Mercury), призванная защищать здоровье людей и окружающую среду от вредного воздействия ртути, предусматривает сокращение производства содержащей ртуть (Hg) продукции, вводит ограничения в горнодобывающую отрасль и производство цемента. Документ действует с 16 августа 2017 г и, к настоящему времени, подписан 137 странами, включая Российскую Федерацию (РФ). Добыча ртутных руд в РФ прекращена в 1992 г., а производство первичной Hg – в 1995 г. Вся Hg, производимая в стране, является продуктом ресайклинга (вторичной ртутью). В РФ снижение использования Hg соответствует общемировой тенденции; потребление Hg на душу населения страны в 2001 г. составляло 1,1 г/год [1]. Месторождения с промышленными запасами Hg известны более чем в 40 странах мира, суммарные мировые ресурсы металла оцениваются экспертами в 715 тыс. т, количественно учтенные запасы составляют 324 тыс. т. Структура распределения, учтённых запасов Hg следующая: Испания - 26%, в Киргизия и Российская Федерация (РФ) – по 13%, Украина – 8%. В рудах месторождений РФ среднее содержание Hg оценивается величиной - 0,453%, которая существенно уступает таковым в рудах Испании (Альмаден – 1,9%), Алжира (Бу Азер – 1,75%) и Киргизии (Хайдаркен – 1%) [1]. Месторождения Hg известны более чем в 40 странах мира, суммарные мировые ресурсы Hg оцениваются в 600 тыс. т, количественно учтенные запасы – в 324 тыс. т; по данным Геологической службы США в 2021 г. в мире было произведено 2300 тонн Hg, что на 190 тонн меньше чем в 2020 г. (2490 т.). Странами-производителями Hg (в тоннах) были: Китай -2000, Таджикистан -170, Мексика – 40, Перу – 30, Норвегия – 20, Кыргызстан – 15; остальные страны вместе получили 11 т. металла [2]. Согласно оценкам ЮНЕП, суммарные глобальные выбросы Hg в атмосферу (антропогенного и естественного происхождения)

составляют 5000–8000 тонн в год. Реализация Проекта ЮНЕП-ГЭФ «Пилотная инвентаризация поступления Hg в окружающую среду в России» позволили оценить общий объём техногенной миграции супертоксиканта в окружающую среду (ОС) РФ в размере 1210 т/год; приоритетным источником эмиссии ртути в ОС является цветная металлургия; структура техногенной эмиссии Hg в ОС следующая (объём в тоннах / доля от общего поступления в процентах): в атмосферу – 36,599/31; в гидросферу – 14,879/68; в педосферу – 562,570/98; аккумулируется в отходах – 416,890/85 [1].

2. Ртуть как полезный компонент и токсичная примесь руд, концентратов и отходов обогащения разнотипных месторождений.

Государственным балансом запасов полезных ископаемых РФ учтено 26 месторождений Hg, в основном собственно ртутных преимущественно киноварного типа и три ртутьсодержащих медно-колчеданных месторождения: Подольское в Республике Башкортостан (РБ), Талганское в Челябинской и Сафьяновское в Свердловской областях (таблица 1).

Таблица 1 – Региональная структура балансовых запасов ртути в РФ [1]

| Месторождение | Геолого-промышленный тип | Доля в запасах, % | Содержание Hg в руде, % |
|---|--------------------------|-------------------|-------------------------|
| Собственно ртутные месторождения | | | |
| Краснодарский край | | | |
| Белокаменное | Кварц-диккитовый | 2,3 | 0,47 |
| Салинское | То же | 2,4 | 0,42 |
| Дальнее | То же | 1,8 | 0,31 |
| Каскадное | То же | 0,1 | 0,14 |
| Республика Сев. Осетия | | | |
| Тибское | Кварц-диккитовый | 1,6 | 0,25 |
| Алтайский край | | | |
| Сухонькое | Карбонатный | 0,6 | 0,24 |
| Республика Алтай | | | |
| Чаган-Узунское | Листвениновый | 7,0 | 0,42 |
| Черемшанское | Карбонатный | 0,1 | 0,50 |
| Кемеровская область | | | |
| Куприяновское | Кварц-диккитовый | 0,2 | 0,32 |
| Республика Тыва | | | |
| Терлигхайское | Полиаргиллитовый | 5,1 | 0,22 |
| Камчатская область | | | |
| Ляпганайское | Опалитовый | 3,5 | 0,63 |
| Олюторское | То же | 1,7 | 1,05 |
| Чемпуринское | То же | 0,7 | 1,07 |
| Респ. Саха (Якутия) | | | |
| Звездочка | Кварц-диккитовый | 6,2 | 1,59 |
| Гал-Хая | То же | 1,1 | 0,60 |
| Северное | То же | 0,4 | 1,09 |
| Среднее | То же | 0,3 | 3,40 |
| Балгикакчан | То же | 0,1 | 1,63 |
| Хабаровский край | | | |
| Ланское | Полиаргиллитовый | 1,2 | 0,52 |
| Чукотский АО | | | |
| Тамватнейское | Листвениновый | 33,1 | 0,70 |
| Западно-Палянское | Кварц-диккитовый | 24,0 | 0,53 |
| Ртутьсодержащие месторождения | | | |
| Республика Башкортостан | | | |
| Подольское | Медно-колчеданный | 4,6 | 0,0025 |
| Челябинская область | | | |
| Талганское | То же | 0,6 | 0,0059 |
| Свердловская область | | | |
| Сафьяновское | То же | 0,2 | 0,0014 |

В рудах медно-колчеданных месторождений Урала содержания Hg варьируют в широком диапазоне (г/т): Учалинского – 20–560, Сибайского месторождения (РБ) – 10–900, Гайского (Оренбургская область) – 1–90 г/т, Узельгинского (Челябинская обл.) – 0,0н–800 г/т. В товарных продуктах обогатительных фабрик (ОФ) горно-обогатительных комбинатов (ГОК) Южного Урала - цинковых концентратах флотации средние содержания Hg составляют (г/т): для Учалинской – 53; Сибайской – 93; Гайской – 65. Основными минералом-концентратом

Hg в рудах является сфалерит, содержащий от 70-250 г/т до 0,5-1,5% примеси токсиканта; блёклая руда теннантит $Cu_{12}As_4S_{13}$ содержит до 3% примеси. Содержание Hg в концентратах Учалинского ГОКа различны (г/т) и последовательно растут в ряду: пиритный – 5-15; медный – 28-41; цинковый – 76-123 [3].

В процессе обогащения медноколчеданных руд при их измельчении образуется высокодисперсная рудничная пыль, содержащая SiO_2 – 3–4%, Cu – 26 мкг/м³; Zn – 74 мкг/м³; Cd – 0,13 мкг/м³; Pb – 1,6 мкг/м³. У флотомашин ОФ Учалинского ГОКа содержания тяжёлых металлов в воздухе рабочей зоны превышают уровни ПДК в 2-3 раза. В составе исследованных проб волос работниц здесь в качестве токсикантов установлены (мг/кг): Hg – 0,6±0,06 (референтные значения 0,05-2,0) и Cd – 0,09±0,01 (референтные значения 0,05-0,25).

На крупнейший в РФ, Челябинский электро-цинковый завод ежегодно поступает порядка 20 т Hg, эмиссия и потери которой (переход в кислоту, шлам, пыль) в процессе получения Zn из концентратов имеют следующую структуру (т): выбросы в атмосферу – 1, 229; шлам – 5,4; серная кислота – 5,0; в канализацию – 0,3; свинцовый кек – 3,0; медный кек – 0,4. Мощными техногенными источниками загрязнения ОС являются ртутьсодержащие отходы добычи и обогащения медноколчеданных руд: 1) некондиционные руды, вскрышные породы, подотвальные, карьерные и шахтные воды, 2) лежалые и текущие хвосты флотации, неиспользуемый пиритный концентрат, фильтраты хвостохранилищ.

Содержания основных загрязнителей ОС в составе вскрышных пород и некондиционных руд медно-колчеданных месторождений, в целом характеризуют данные отношения концентрации металлов в крупнообъёмных отходах добычи, аккумулированных на Северном отвале Сибайского карьера, к соответствующей величине уральского кларка (знаменатель) (%): Cu – 0,01/0,005; Zn – 0,4/0,06; Cd – 0,003/0,00002; Hg – 0,00072/0,000003.

Материал лежалых хвостов флотации ОФ ГОКов Южного Урала сегодня рассматривается как перспективный для ресайклинга вид многокомпонентного техногенного минерального сырья, однако пока что он служит лишь мощным техногенным источником, генерирующим загрязнение ОС старых горнорудных районов. Так в составе 27,67 млн т хвостов Сибайской ОФ содержатся: Cu – 0,20% (запасы 56072,5 т); Zn – 0,5% (135348,8 т); Cd – 0,02% (2435,5т), а в 40,8 млн т хвостов Учалинской ОФ содержатся: Cu – 0,30% (запасы 120396 т); Zn – 0,61% (247389 т); Cd – 0,003% (1163,73т). Минеральный состав представлен (%): пиритом – 57, сфалеритом – 1,1%, халькопиритом – 0,8%, оксидами железа – 2, вторичными сульфидами – 0,2%, нерудными минералами – 38,9%. Важным источником эмиссии Hg в ОС для Южного Урала является зона окисления сульфидных месторождений, так называемые «железные шляпы» представленные мощными залежами бурых железняков. Ярким примером этому служит железная шляпа Учалинского месторождения из 1012 тыс. т бурых железняков которой было извлечено 12113 кг Au, 177469 кг Ag и 1598 кг природной металлической Hg.

Природная амальгама золота по составу близкая к фазе $Au_{0,81}Hg_{0,19}$ ($\rho=17,854$ г/ см³) размерами 0,01-0,1 мм в ассоциации с самородным золотом развита в бурых железняках месторождения Бакр-Узьяк. Для почвы зоны техногенного влияния Учалинского ГОКа установлены следующие соотношения концентраций тяжёлых металлов (отношение содержаний элемента в почвах/в почвообразующих породах) (мг/кг): Cu – 509/325; Zn – 191,5/48,0; Cd – 0,2/0,6; Hg – 0,02/0,06. Эфельные отвалы многочисленных золотоносных россыпей, добыча мелкого и тонкого металла (менее 0,1 мм) из которых, нередко составлявшего основную долю запасов золота на месторождениях Южного Урала, ранее традиционно осуществлялась с помощью технологии амальгамации. В золотилах из техногенных россыпей Авзянского рудно-россыпного района выявлены фазы по структуре близкие к Au_6Hg_5 ($\rho=16,872$ г/см³) и Au_5Hg_8 ($\rho=17,721$ г/см³).

Ртутьсодержащими являются лежалые хвосты золотодобычи Мало-Каранской и Сиратурской амальгамационных фабрик, Тубинской амальгамационной фабрики и др. В хвостах Тубинской золотоизвлекательной фабрики (ЗИФ) аккумулированных в объёме 40000 т содержатся 222,2 т Cu в концентрации 555,6 мг/кг; Zn – 249,3т (623,3 мг/кг), Cd – 0,523 т (1,33 мг/кг); Hg – 6,1 т (15,23 мг/кг). Токсичность 2638800 т лежалых хвостов перколяции – отходов чанового выщелачивания золота цианированием Семёновской ЗИФ (СЗИФ), включённой в список

горячих экологических точек РФ определяют: As – 786,72 мг/кг (2076,0т); Hg – 22,28 (58,8т); Cd – 2,88 мг/кг (7,622т); Cu – 584,2 мг/кг (1541,6т); Zn – 528,01 мг/кг (1393,3т) [4] (рисунок 1).

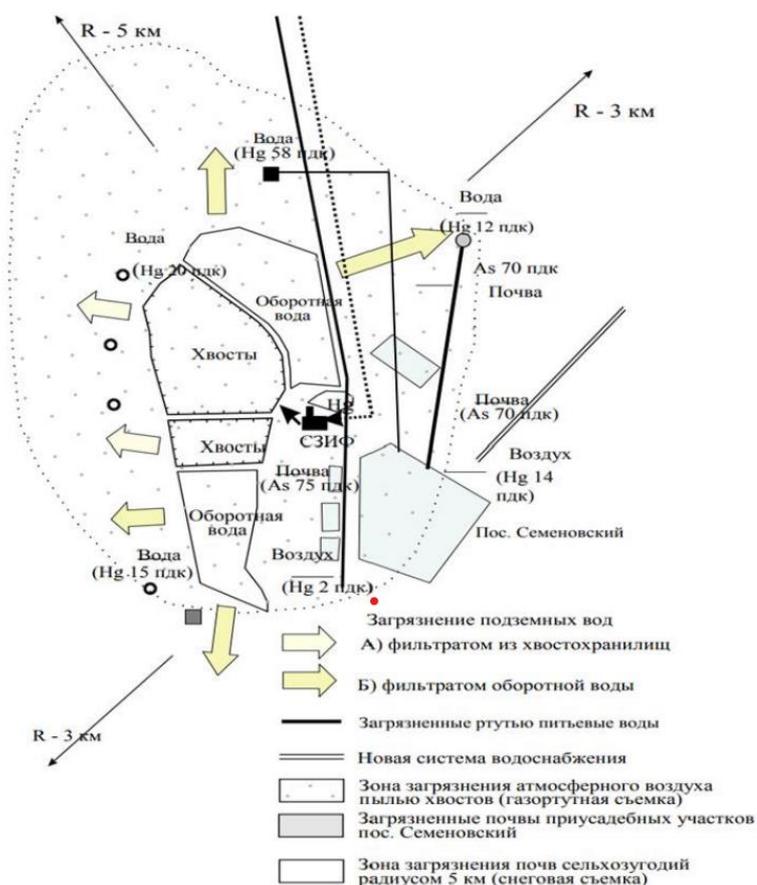


Рисунок 1 – Схема техногенного воздействия Семёновской золотоизвлекательной фабрики (СЗИФ) на компоненты на окружающей среды (воздух, почвы, воды) [4].

Подземные воды также испытывают мощную техногенную нагрузку, на что указывает спектр и величины концентрации основных загрязнителей (мг/дм³): Cu – 0,029; Zn – 0,045; Cd – < 1,0–1,7 мг/кг, Se – 0,4–10,9 мг/кг [5].

Оценка содержания тяжелых металлов в пищевых продуктах местного производства и биосубстратах работников СЗИФ и жителей поселка произведена группой исследователей Уфимского научно-исследовательского института медицины труда и экологии человека. Для определения уровня поступления Hg и других техногенных загрязнителей в организм жителей поселка было исследовано продовольственное сырьё и пищевые продукты местного производства животного и растительного происхождения.

Исследовались продукты, составляющие основной рацион питания местного населения, выращенные на приусадебных участках поселка.

В число отобранных 69 проб различных продуктов питания входили: 11 проб молока, 12 проб масла, 6 проб яиц, 40 проб овощей, представленных капустой, свеклой, морковью, луком. Зерновые культуры (пшеница, овес) и горох для анализа отбирались на полях, прилегающих к санитарно-защитной зоне предприятия.

Уровни концентрации Hg, Cu, Pb, Cd и As в горохе, пшенице, овсе, выращенных на сельскохозяйственных угодьях зоны техногенного влияния СЗИФ различны. В свекле установлены Cd содержания, которого превышают значение ПДК в 1,2 раза и Hg в концентрации превышающей пороговое значение ПДК в 1,1 раза. Для Hg в моркови, капусте, томатах и зерновых установлены концентрации от 0,0026 до 0,0095 мг/кг, что не превышает гигиенические нормы; вместе с тем в четырех пробах картофеля выявлено превышение уровня ПДК от 1,3 до 2,1 раза.

Исследование содержания Hg в продуктах животного происхождения показало, что наиболее загрязненным является коровье молоко. Минимальное содержание Hg определено на уровне 0,0264 мг/кг, что в 5,3 раза выше соответствующих значений ПДК, максимальные же концентрации загрязнителя 0,0439 мг/кг превышают ПДК в 8,8 раза. Содержание Hg в куриных яйцах, значительно ниже значения существующего норматива.

Техногенная нагрузка на ОС региона в зонах воздействия различных предприятий горнорудного комплекса проявляется в загрязнении тяжёлыми металлами ряда продуктов местного производства из рациона питания местного населения.

После закрытия СЗИФ научная группа Уфимского НИИ медицины труда и экологии человека провела исследование концентрации Hg в биосубстратах работников предприятия (128 обследованных) и их детей (16 обследованных); исследованиями были охвачены 21,8 % из 660 жителей поселка; практически все трудоспособное население поселка работает или ранее работало на ЗИФ. Определение уровней содержания Hg в биосредах работников ЗИФ и их детей произведено в следующих объемах (пробы): кровь – 144, моча – 16, волосы – 38, зубы – 9, ногти – 40, слюна – 15, грудное молоко кормящих матерей – 2. Hg обнаружена в крови у всей группы обследованных в концентрациях от 0,00085 до 0,12975 мг/л.

Превышение уровня для населения, не подвергшегося воздействию Hg в производственных условиях (0,005 мг/л) выявлено у 57% обследованных взрослых и 31% детей. Известно, что содержание Hg в волосах в период их формирования прямо пропорционально ее концентрации в крови. У всех обследованных жителей поселка и работников ЗИФ Hg в волосах обнаруживается на уровне значений от 0,0100 до 1,4071 мг/кг при среднем 0,29715 мг/кг. У 100% обследованных работников СЗИФ Hg обнаружена в моче в концентрациях от 0,00103 до 0,0102 мг/л (среднее 0,00442 мг/л). Физиологически допустимый уровень содержания Hg в моче равный 0,005 мг/л не превышен у 68,75% обследованных; на уровне критических значений (0,0075-0,0150 мг/л) токсикант обнаружен у 12,5% обследованных.

В грудном молоке кормящих матерей, проживающих в поселке установлены концентрации Hg в количествах 26,15 и 35,9 мкг/л, что существенно превышает приведенные ВОЗ значения для содержания этого токсиканта в грудном молоке женщин Европы.

Результаты исследований, позволяют использовать Hg в качестве надёжного элемента-трассера для региональной оценки эмиссии и миграции техногенного загрязнения всех компонентов ОС – атмосферы, гидросферы, педосферы, биосферы (включая организм человека) в зонах техногенного воздействия предприятий горнорудного комплекса. В последнее десятилетие при золотодобыче на территории РБ применяются геотехнологии кучного выщелачивания золота (КВ) цианированием и подземного выщелачивания (ПВ) хлоринацией. Оценки воздействия на все компоненты ОС процессов КВ и ПВ, даны применительно к условиям размещения предприятий и составу минерального сырья; одним из приоритетных токсикантов для мониторинга состояния ОС является Hg. Приведённые выше материалы, характеризующие Hg как источник экологических рисков недропользования, могут оказаться полезными при прогнозировании и оценке геолого-экологических рисков как параметров мониторинга в системе горного инжиниринга как традиционных, так и инновационных (КВ, ПВ, бактериальное выщелачивание и др.) технологий освоения как ртутисодержащих, так и собственно ртутных месторождений РФ.

На месторождениях Таймыра и Кольского полуострова разрабатываемых предприятиями ПАО «ГМК «Норильский никель» ежегодно добывается и перерабатывается порядка 18,5–19,8 млн т сульфидных медно-никелевых руд, в составе которых в техногенную миграцию вовлекается Hg среднее содержание которой оценивается в 1 г/т [1].

В рудах месторождений олова Приморского и Красноярского краёв среднее содержание Hg оценивается величиной 0,1 г/т.

В оловянных концентратах месторождений Республики Саха (Якутия) и Забайкалья содержание токсиканта варьируют в широком диапазоне значений от 0,01 до 1,89 г/т, в оловянных концентратах содержащих сульфиды содержания Hg более устойчивы – 0,7–0,8 г/т.

Устойчивые примеси Hg известны в минеральном сырье различных месторождений олова Дальневосточного федерального округа (%): Валькумей (Чукотская АО) от 0,40 до 1,85, в среднем 0,86; Фестивальное (Дальний Восток) – от 1,27 до 2,64, в среднем 1,89; Хрустальное (Приморье) – от 0,98 до 1,87, в среднем 1,34 [3]. ОАО “Новосибирский оловянный комбинат” использует эффективную систему пылеулавливания, позволяющую осадить на фильтрах очистных установок не менее 60% ртути из отходящих газов, однако примерно 5 кг токсиканта всё же поступает в атмосферу.

Выбросы Hg в атмосферу и ее поступление в отходы при добыче и переработке цинка, олова, никеля и меди в РФ по заключению экспертов составили, (в тоннах) [4]: При производстве цинка: Hg в концентратах – 31; эмиссия в атмосферу – 1,9; Hg в твёрдых отходах помимо хвостов – 8,5; сброс в канализацию – 0,2.

При производстве никеля и меди (предприятия “ТМК “Норильский никель”): Hg в рудах – 24,8; Hg в концентратах – 5,9; 179 эмиссия Hg в атмосферу – 3,1; Hg в хвостах – 18,9 При производстве олова: Hg в концентратах – 0,01; эмиссия Hg в атмосферу – 0,005.

3. Выводы

В связи с принятием Минаматской конвенции возрастает актуальность управления экологическими рисками процессов КВ перспективных ртутьсодержащих месторождений золота так называемого «невадийского» или «карлин-типа» в США, КНР, Иране, РФ и др. Для РС(Я) такой мониторинг потребуется при комплексном освоении КВ золото-ртутного месторождения Ключос, руды которого содержат от 130 до 500 г/т Hg [4]. Изложенные в сообщении результаты использования Hg в качестве регионального индикатора оценки геолого-экологических рисков недропользования, охарактеризованного на примере разнотипных минеральных месторождений старых горнорудных районов Южного Урала, рекомендуется использовать для формирования оптимальной системы инструментов для прогнозирования и оценки масштабов и контрастности техногенной трансформации компонентов ОС в других регионах РФ.

При этом, особое внимание следует уделить территориям нового освоения, начало процесса реализации стратегии оптимального недропользования в пределах которых потребует привлечение всех ресурсов системы современного горного инжиниринга для обеспечения стратегии сырьевой безопасности РФ.

Геоэкологические риски, связанные с Hg в составе минерального сырья и товарной продукции, актуальны практически для всех предприятий газо- и угледобычи ТЭК РФ [6].

4. Благодарности

Исследование выполнено за счет государственного задания ИГАБМ СО РАН.

5. Литература

- [1] Романов А.А., Игнатьева Ю.С., Морозова И.А. и др. Ртутное загрязнение в России: проблемы и рекомендации. – М.: АО «НИИ Атмосфера», Центр «ЭкоСогласие», IPEN, 2018. – 104 с.
- [2] Mercury. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2022 – P. 108-109.
- [3] Оценка поступления ртути в окружающую среду с территории Российской Федерации. План действий Совета Арктики по предотвращению загрязнения Арктики (АСАР/ПДСА), Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору в сотрудничестве с Датским Агентством по охране окружающей среды. – ДАООС, Копенгаген, 2005. – 322 с.
- [4] Мустафин С.К., Анисимова Г.С. Геоэкологические проблемы добычи ртути как полезного ископаемого и источника экологических рисков. Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Роль и место мелко- и среднemasштабных геохимических работ в системе геологического изучения недр». Том II. – М.: ИМГРЭ, 2018. – С. 118-119.
- [5] Абдрахманов Р.Ф., Попов В.Г. Геохимия и формирование подземных вод Южного Урала – Уфа: АН РБ, Гилем, 2010. – 420 с.
- [6] Mustafin S.K., Trifonov A.N., Anisimova G.S., Struchkov K.K. Mercury as an indicator of geological and environmental risks in the development of various mineral raw materials // Evolution of Biosphere and Technogenesis (2nd EBT 2021) IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 962 (2022) 012056 IOP Publishing. – DOI:10.1088/1755-1315/962/1/012056.

ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ЗАЛЕГАНИЯ ОСТАТКОВ ЖИВОТНЫХ МАМОНТОВОЙ ФАУНЫ

Екатерина Нестерова¹, Нюргуйана Николаева²

1 ГБУ «Академия наук РС (Я)», пр. Ленина, 33, г. Якутск, 677007, Россия

2 ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН»,
677980, Россия, г. Якутск, ул. Петровского, 2

GEOCRYOLOGICAL CONDITIONS OF OCCURRENCE OF MAMMOTH FAUNA ANIMAL REMAINS

Ekaterina Nesterova¹, Nyurguyana Nikolaeva²

1 Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, 33 Lenin Ave., 677007, Russia

2 FRC "The Yakut Scientific Centre of the SB RAS", 2, Petrovsky str., Yakutsk, 677980, Russia

Annotation. This research represents the materials of the study of the geocryological conditions of the occurrence of mammoth fauna animal remains in the Kolyma River basin. A comparison of the geological components and the taphonomy of the burial of the remains of mammoth fauna animals was carried out.

Геология Колымской низменности имеет сложную структуру, неоднородный рельеф, сложена четвертичными озерно-аллювиальными отложениями, в составе которых преобладают супеси и суглинки [1]. Часть низменности покрыта позднеплейстоценовыми озерно-аллювиальными отложениями, представленными пылеватыми, иногда слоистыми суглинками и супесями зелено-серого и серого цвета с включениями ископаемых льдов. Мощность этих отложений порядка 20-25 м. [2].

На территории бассейна нижнего течения реки Колыма имеются несколько крупных коллекторов остатков животных мамонтовой фауны. Наиболее известным местонахождением мамонтовой фауны в низовьях р. Колыма является Дуваный Яр, которое располагается в нижнем течении бассейна на правом берегу в 40-45 км от устья р. Омолон. Местонахождение представляет собой яр, протяженностью 10 км, обрыв высотой до 65 м. [3]

В этой местности расположена «Омолоно-Анюйская едома», которую прорезает р. Колыма (Рисунок 1). На береговом обрыве местонахождения Дуваный Яр вскрываются мощные разрезы едомной свит, который впервые был описан С.Ф. Биске (1957) [4] и Ю.П. Барановой (1957) [2]. Регулярно на этом местонахождении происходит вытаивание полигонально-жильных льдов (ПЖЛ) [5].

На карте Нижнеколымского улуса (Рисунок 1.) представлены опорные местонахождения этого района - Дуваный Яр, Тумус Яр и Святой нос расположенные на едомной свите вдоль русла рек. По сведению П.А. Лазарева (1987) [5] на местонахождение Дуваный Яр река Колыма размывает возвышенную едомную поверхность берега образуя ряд разобщенных обнажений высотой от 10-15 до 40-45 м. Местами едомная поверхность расчленена вложенными в нее голоценовыми аласными котловинами.

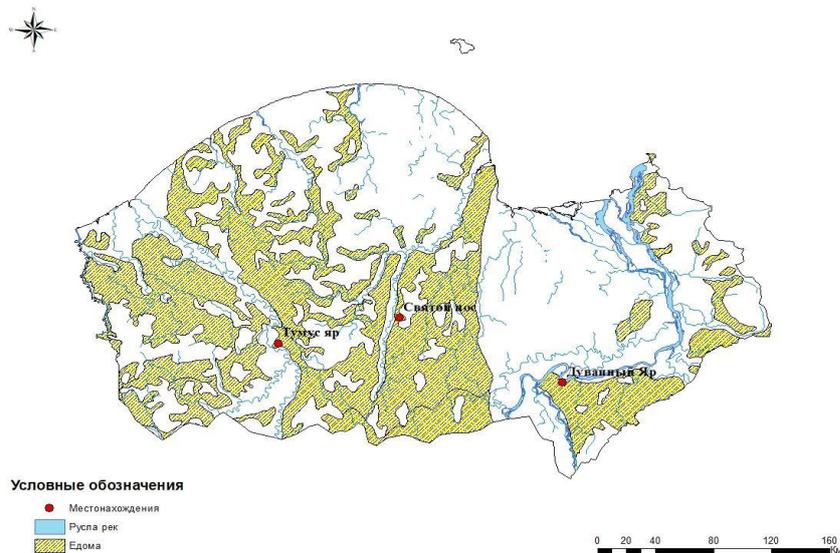


Рисунок 1 – Картограмма распространения Омолано-Ануйской едомы, прорезной р. Колыма в Нижнеколымском улусе Республики Саха (Якутия).

Геологический возраст обнажения относится к концу плейстоцена – голоцена. Так, Каплиной Т.Н. и Ложкиным А.В. (1979) [6] были получены голоценовые даты из разных частей и высоты обнажения Дуванного Яра: из торфяника с глубины 1 м - 3955 ± 80 л.н. (МАГ-161); из псевдоморфозы ледяной жилы, уходящей в таберальные супеси - 6300 ± 60 л.н. (МАГ-156); из разреза 22-метрового аласа в средней части обнажения - 5400 ± 110 л.н. (МГУ-470); из аласа высотой 9-10 м в нижнем конце Дуванного яра, из основания торфяника, лежащего на озерных осадках - 9200 ± 150 л. н. (МАГ-165). По мощному горизонту торфа в нижней части обнажения была получена уверенная радиоуглеродная датировка в $36\,900 \pm 500$ лет (МГУ-469) [6]. Исследование в Верхнеколымском улусе проводилось на местонахождениях Зырянка $65^{\circ}48'39.53''\text{C}$ $150^{\circ}30'0.94''\text{E}$ и Ирелях-Сиене $66^{\circ}11'22.68''\text{C}$ $151^{\circ}41'5.05''\text{E}$ (Рисунок 2).

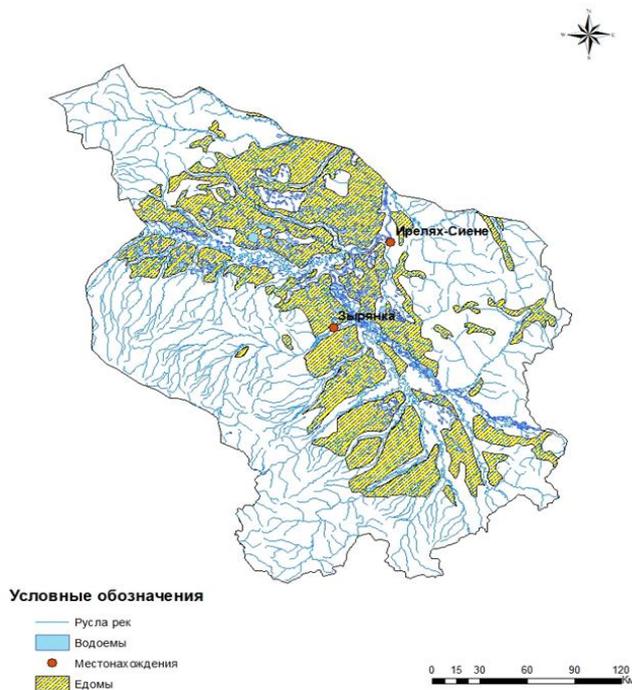


Рисунок 2 – Картограмма распространение едомной свиты и местонахождений мамонтовой фауны Верхнеколымском районе РС (Я).

Общая площадь Верхнеколымского района равняется 69227,3 кв. км., а площадь едомных отложений составляет 18700 кв. км (27 %). Едома или едомные отложения представляют собой массивы и холмы на поверхности ледового комплекса. Существует несколько теорий генезиса перегляциальное образование ледников в момент конденсации переувлажнение воздуха, избыточная влажность, которая попадала в зону низких температур. В этих условиях и формировался ледовый комплекс. Ледовые комплексы это ультральдистые толщи, включающие огромные массы полигонально-жильных и сегрегационных льдов. Многими исследователи не раз было доказано, что именно едомы (едомные отложения) являются показателями наличия в них остатков мамонтовой фауны [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13].

Местонахождение мамонтовой фауны р. Зырянка в Верхнеколымском районе расположено на правом берегу в 30 км, выше по течению от устья одноименной реки (Рисунок 2). Основная часть находок представлена в виде костных остатков, что связано с мощностью распространения ПЖЛ на территории района, сложной геологией и неоднородным рельефом (Рисунок 3). На этом местонахождения были обнаружены костные остатки следующих представителей мамонтовой фауны: *Mammuthus trogontherii*, *Mammuthus trogontherii chosaricus*, *Mammuthus primigenius fraasi*, *Equus sp.*, *Coelodonta antiquitatis*, *Bison sp.*, *Rangifer tarandus*, *Alces sp.*, *Panthera leo spelaea*, *Canis lupus*, *Gulo gulo*. Так же здесь были обнаружены экскременты *Mammuthus sp.*, *Alces alces*, *Rangifer tarandus* [14].

По сравнению с находками остатков животных мамонтовой фауны низовья Колымы имеются различия по степени сохранности палеонтологического материала.



Рисунок 3 – ПЖЛ на обнажении правого берега местонахождения р. Зырянка.

Сингенетические ПЖЛ на местонахождении Зырянка высотой в 15-20 м протяженностью в 950 м расположены вдоль реки (Рисунок 3). Рост сингенетических повторно жильных льдов на местонахождении Зырянка зависит от осадконакопления песчано-суглинистых и торфяных отложений аккумулятивных элементов рельефа. Циклично накапливаются через осадки, которые подвергаются морозобойному растрескиванию и растут вверх внешне выглядя как вложенные друг в друга конусы [15]. Широкое распространение и мощность ПЖЛ определяются характером пойменного режима и осадконакопления на аллювиальных равнинах, а также от климатических и тектонических воздействий [16].

Летом временами происходит межень, и река Зырянка становится маловодной, при паводках происходит кратковременный подъем уровня воды. Все эти процессы благоприятно воздействуют на естественную эрозию береговой линии в результате чего происходит естественная оттайка остатков животных мамонтовой фауны.

Таким образом, бассейн р. Колыма является важным регионом в плане изучения животных мамонтовой фауны, природной среды их обитания, условий формирования массовых скоплений остатков ископаемой фауны и закономерностей их захоронения в разных геологических горизонтах.

Литература

- [1] Korzhuev S.S. Karst of Yakutia // Types of karst in the USSR. – M.: Science, 1965. – P. 67-72.
- [2] Baranova Yu.P. Geomorphological outline of the eastern part of the Kolyma lowland // Materials on geology and minerals of the North-East of the USSR. – Magadan, 1957. – No. 11. – P. 208-222.
- [3] Kaplina T.N., Lozhkin A.V. Age of alas deposits in the Primorskaya lowland of Yakutia // Izvestiya AN SSSR. Geological series. – 1979. – No. 2. – P. 69-76.
- [4] Biske S. F. Quaternary deposits of the Kolyma lowland // Materials on geology and minerals of the North-East of the USSR. – Magadan, 1957. – No. 11. – P. 68-81.
- [5] Lazarev P. A., Tomskaya A. I. Mammals and biostratigraphy of the late Cenozoic of Northern Yakutia – Yakutsk: Publishing House of YaF SO AN SSSR, 1987. – 170 p.
- [6] Kaplina T. N., Giterman R. E., Lakhtina O. V. et al. // Bulletin of the commission for the study of the Quaternary period. – 1978. – No. 48. – P. 49-65.
- [7] Tomirdiario S. V. Loess-ice formation of Eastern Siberia in the Late Pleistocene and Holocene – M.: Nauka, 1980. – 185 p.
- [8] Kotov A.N. Alasny and ice complexes of deposits of Northwestern Chukotka (East Siberian Sea coast) // Cryosphere of the Earth. – 1998. – T. 2. – No. 1. – P. 11-18.
- [9] Lozhkin A.V., Trumpe M.A., Poluyan A.I. et al. Radiocarbon dating of Upper Quaternary deposits of northeast Asia and Alaska // Evolution of climate and vegetation of Beringia in the Late Cenozoic. – Magadan: SVKNII FEB RAS, 1995. – P. 169-184.
- [10] Sukhodrovsky VL The role of thermokarst in the formation of the relief of the northern accumulative plains // Geomorphology at the turn of the XXI century. IV Shchukin readings (works). – M.: Publishing House of Moscow State University, 2000. – P. 468-471.
- [11] Soloviev P.A. Alas thermokarst relief of Central Yakutia. Guide – Yakutsk: Institute of Permafrost Science SB RAS, 1973. – 47 p.
- [12] Romanovsky N.N. Formation of polygonal-vein structures. – Novosibirsk: Science, 1977. – 216 p.
- [13] Velichko A.A. Natural process in the Pleistocene – M.: Nauka, 1973. – 256 p.
- [14] Cheprasov M. Yu. New locations of mammoth fauna and Paleolithic sites in the basin of the middle course of the Kolyma River / Cheprasov, T. F. Obade, S. E. Grigoriev, G. P. Novgorodov, V. A. Marareskul // Bulletin North-Eastern Federal University. M.K. Ammosov. – 2015. – No. 6 (50). – P. 53-68.
- [15] Koronovskiy N.V. General geology: textbook – M.: KDU, 2018. – 528 p.
- [16] Popov A.I. Underground ice – M.: Publishing house of Moscow State University, 1965. – Issue. 1. – P. 7-39.

ХИМИЧЕСКИЙ И ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ ПОДЗЕМНЫХ ЛЬДОВ ЦЕНТРАЛЬНО-ЯКУТСКОЙ РАВНИНЫ И ЗАПАДНОГО ВЕРХОЯНЬЯ

Мария Павлова, Василий Лыткин

ФГБУН «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН»,
677010, Россия, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36

CHEMICAL AND ISOTOPE COMPOSITION OF GROUND ICE IN THE CENTRAL YAKUT PLAIN AND THE WESTERN VERKHOYAN'E

Maria Pavlova, Vasilii Lytkin

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36, Permafrost str., Yakutsk, 677010, Russia

Annotation. This paper presents the results chemical and isotopic composition of ground ice located in six key areas within the Central Yakut Plain and Western Verkhoyan'e. Three main types are identified – ice wedges, tabular ground and textural ice, which formed in the Upper Pleistocene-Holocene time. According the data were determined, that ground ice are ultra- and moderately fresh, it is characterized by neutral and slightly acid reactions of the geochemical environment, predominance of hydrocarbonate magnesium or magnesium-calcium composition. The lightest isotope composition is characteristic of tabular ground ice of the Karginsky age (MIS 3), the heaviest isotopic composition of the Holocene textural ice of the valley of the Dyanyshka river. Also, the features of the occurrence of ground ice and morphometric characteristics of the ice wedges are given.

1. Введение

Одни из наиболее распространенных природных льдов холодных регионов являются подземные льды, которые отличаются большим разнообразием форм, строения, происхождения и условий залегания. Они встречаются повсеместно в областях распространения многолетне- и сезонномерзлых пород и имеют мощности от нескольких десятков сантиметров до сотен метров. Много десятилетий исследователей интересуют вопросы генезиса и условия формирования подземных льдов для решения которых используется ряд методов, например, такие как химический и изотопный анализы. Химический состав позволяет отразить гидрохимические обстановки времени их образования или промерзания, а также является одним из ключевых критериев для восстановления палеофациальных компонентов при палеогеокриологических реконструкциях [1]. Изотопный состав используется для выявления генезиса льдов, условий и оценки температур их формирования [2,3,5,6,8,10].

2. Материалы и методы

В 2021-2022 годах нами проведены исследования различных типов подземных льдов на шести ключевых участках в пределах Центрально-Якутской равнины – долина р. Виллой в нижнем течении, долина р. Буотама, окрестности п. Верхний Бестях, долина р. Линде и Западного Верхоянья – долина рек Ундюлюнг и Дяньшка. Отмечены три основных типа – повторно-жильные (ПЖЛ), текстурные и пластовые льды. Описание и отбор образцов выполнен согласно общепринятой методике, подробно изложенной в работах [3,9,10].

Определение физико-химических показателей и макрокомпонентов (22 образца) проведен методами титриметрии и капиллярного электрофореза в аккредитованной лаборатории подземных вод и геохимии криолитозоны института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (ИМЗ СО РАН), г. Якутск. Величина общей минерализации охарактеризована согласно классификации С.Л. Шварцева [7]. Для графического представления результатов химического состава и дальнейшего анализа использована диаграмма Пайпера (Рисунок 1).

Анализ изотопного состава ($\delta^{18}\text{O}$, δD) 71 образца выполнен в совместной Российско-Германской (ИМЗ-AWI Potsdam) лаборатории при ИМЗ СО РАН методом лазерной абсорбционной ИК-спектроскопии на анализаторе Picarro L2140i, оснащенного системой WS-CRDS (Wavelength Scanned – Right Down Spectroscopy). Статистическая обработка результатов включала в себя оценку дейтериевого эксцесса d_{exc} и основных статистических характеристик стандартными способами, построение графиков в координатах $\delta^{18}\text{O}$ / δD , сравнение с данными глобальной (ГЛМВ), расчет средних значений и стандартного отклонения. Результаты представлены на Рисунке 2.

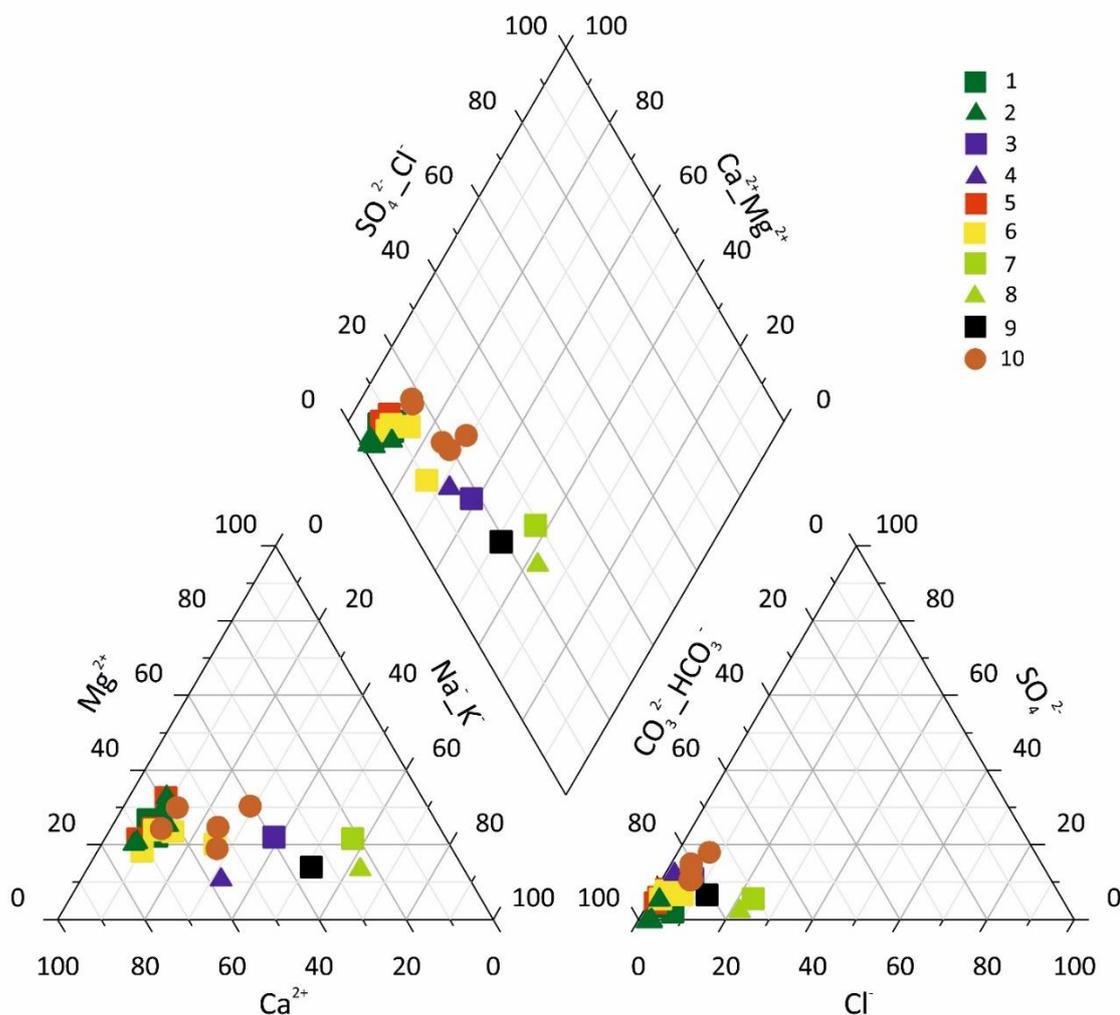


Рисунок 1 – Диаграмма Пайпера состава подземных льдов: 1 – ПЖЛ и 2 – текстурные льды долины р. Буотама; 3 – ПЖЛ и 4 – текстурные льды долины р. Ундюлонг; ПЖЛ долины р. Виллой; 5 – отобранные в 2021 г. (разрез Унглоудэ) и 6 – отобранные в 2016 г.; 7 – ПЖЛ и 8 – текстурные льды долины р. Дянышка; 9 – ПЖЛ 75-метровой террасы р. Линде; 10 – пластовые льды разреза Верхний Бестях.

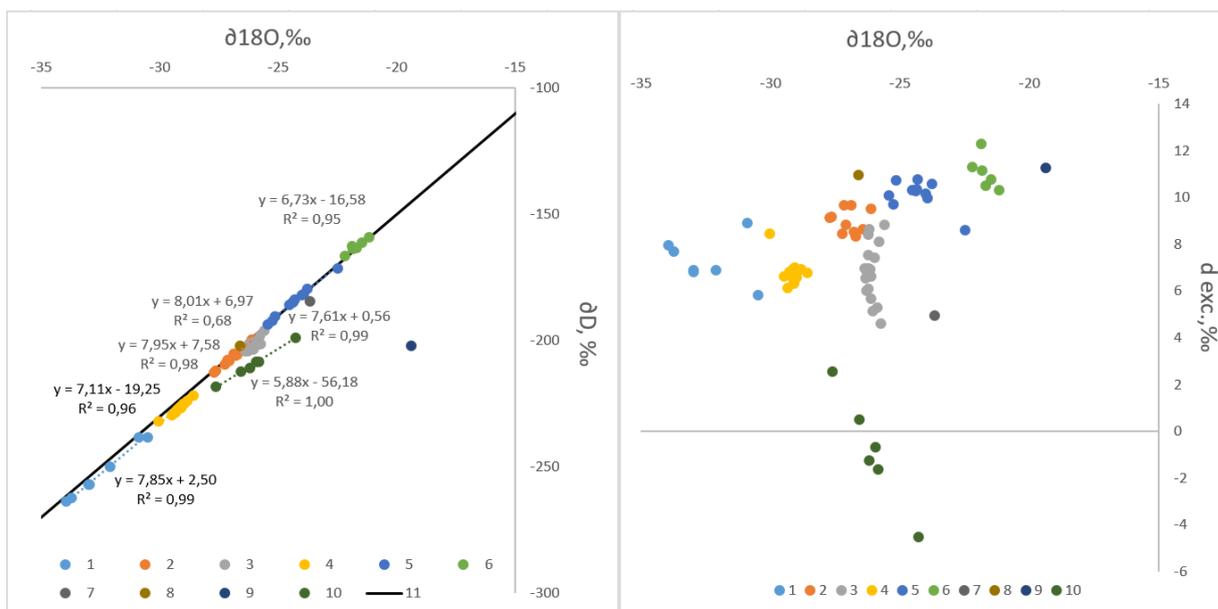


Рисунок 2 – Соотношение стабильных изотопов в различных типах подземного льда $\delta^{18}\text{O}/\delta\text{D}$ и $\delta^{18}\text{O}/d_{\text{exc}}$: 1 – пластовые льды разреза Верхний Бестях; 2 – ПЖЛ и 3 – текстурные льды долины р. Буотама; 4 – ПЖЛ долины р. Виллой, отобранные в 2021 г. (разрез Унглюндэ); 5 – ПЖЛ и 6 – текстурные льды долины р. Ундюлюнг; 7 – ПЖЛ 75-метровой террасы р. Линде; 8 – ПЖЛ и 9 – текстурные льды долины р. Дяньшжа; 11 – ПЖЛ долины р. Виллой, отобранные в 2016 г.; 12 – Линия Крейга (ГЛИМВ).

3. Результаты

Долина р. Ундюлюнг. В пределах 7-10-метровой первой надпойменной террасы р. Ундюлюнг в толще едомных отложений вскрыты сингенетические активные ПЖЛ видимой мощностью 80 см. Ширина их варьируется от 30 см в верхней части до 10 см в нижней. От жил отходят деформированные шпиры льда с прослоями текстурного льда, представленного суглинком средним темно-серым с сизоватым оттенком сильно насыщенного органическим детритом и остатками древесных растений. Снизу-вверх расстояние между шпирями уменьшается: в нижней части составляет в среднем 10 см, в средней части – от 5 до 3 см и ближе кровле – доли мм или сливается воедино. Расстояние между соседними жилами варьируется от 15 до 20 м. Возраст вмещающих отложений ПЖЛ, по данным радиоуглеродного датирования остатков древесной растительности – МРІ-189 (506/1 м) – 870 ± 130 , МРІ-188 (506/1,5 м) – 860 ± 120 , МРІ-188 (506/4 м) – 1400 ± 120 , отнесен к позднему голоцену [4].

Отобрано и исследовано на химический (2 образца) и изотопный (ПЖЛ – 11, текстурный лёд – 6) анализы. На основании полученных данных установлено, что для ПЖЛ отмечается нейтральная реакция геохимической среды ($\text{pH} = 7,04$) и гидрокарбонатный кальциево-магниевый состав, для текстурных льдов – слабокислая ($\text{pH} = 6,27$) и гидрокарбонатный кальциевый состав. По показателю общей жесткости ПЖЛ и текстурные льды определяются как очень мягкие (0,230 и 0,750 мг-экв/л); по величине общей минерализации – ультрапресные (24,2 и 89,5 мг/дм³), но значения минерализации текстурного льда в 3,7 раз выше, чем у ПЖЛ, которое связано с повышением содержания кальция, магния, натрия, калия и гидрокарбонатной группы. Изотопный состав ПЖЛ (11 проб) варьируется: $\delta^{18}\text{O}$ от -25,44 до -23,92 ‰, δD от -193,43 до -181,4 ‰, d_{exc} от 9,71 до 10,76 ‰; текстурные льды (6 проб), по сравнению с ПЖЛ, имеют более тяжелый состав – $\delta^{18}\text{O}$ от -22,20 до -21,16 ‰, δD от -166,26 до -159,04 ‰, d_{exc} от 10,31 до 12,27 ‰. Дейтериевый эксцесс указывает, что при образовании льдов в долине р. Ундюлюнг преобладали конденсационные процессы.

В пределах ключевого участка «**Верхний Бестях**» вскрыта залежь каргинских пластовых льдов (МРІ 173 (510/12 м) – 42160 ± 4535) [4], залегающая в нижней части 12 м разреза верхнечетвертичных отложений в 3 км от пос. Верхний Бестях Хангаласского улуса. Залежь приурочена к кровле кембрийских известняков и перекрыта сверху мерзлыми песками и

супесями мощностью около 8 м. По результатам анализа 6 образцов установлено, что пластовые льды характеризуются нейтральной реакцией геохимической среды ($pH = 6,89-7,10$), окислительными условиями ($Eh = 341-385$), характерен гидрокарбонатный кальциево-магниевый состав. По показателю общей жесткости определяются как мягкие (1,028-2,37 мг-экв/л), по величине общей минерализации – как ультра- и умеренно пресные (81,6-225,6 мг/дм³). По толще пластовых льдов сверху вниз наблюдается увеличение жесткости и минерализации. Изотопный состав (7 проб) варьируется: $\delta^{18}O$ от -33,95 до -30,49 ‰, δD от -263,66 до -238,08 ‰, d_{exc} от 5,81 до 8,88 ‰.

Долина р. Буотама. В разрезе 7-10-метровой террасы р. Буотама в нижнем течении вскрыта толща высокольдистых суглинков, расчлененных выдержанной решеткой позднеголоценовых сингенетических ПЖЛ толщиной до 1 м. Химический анализ выполнен для 8 образцов, отобранных из ПЖЛ и текстурных льдов. На основании полученных данных установлено, что льды характеризуются нейтральной реакцией геохимической среды ($pH = 6,87-7,09$), гидрокарбонатным кальциево-магниевым составом, умеренно пресные (131,7-525,5 мг/дм³). По показателю общей жесткости ПЖЛ определяются как мягкие (1,110-1,581 мг-экв/л), текстурные льды – умеренно жесткие и жесткие (4,426-6,323 мг-экв/л). Изотопный состав ПЖЛ (10 проб) варьируется: $\delta^{18}O$ от -27,70 до -26,44 ‰, δD от -212,50 до -202,89 ‰, d_{exc} от 8,32 до 9,66 ‰; текстурных льдов (18) – $\delta^{18}O$ от -26,37 до -25,59 ‰, δD от -203,97 до -195,93 ‰, d_{exc} от 4,61 до 8,81 ‰.

Долина р. Вилюй. В верхней части 65-метровой цокольно-аккумулятивной террасы р. Вилюй в нижнем течении вскрыта позднеплейстоценовая едомная толща отложений, включающая ПЖЛ. Пачка представлена суглинками и супесями пылеватыми оглеенными мощностью от 4 до 8 м, пронизанные решеткой вертикальных ледяных жил толщиной до 2-3 м и глубиной проникновения до 6-8 м. Расстояние между жилами 10-12 м. Вмещающие отложения имеют признаки криотурбации и насыщены большим количеством органического детрита с мелкими обломками древесины. Возраст отложений относится к сартанскому периоду верхнего неоплейстоцена (радиоуглеродная датировка МРІ-195 (545_30 см) – 23630±550) [4].

На основании анализа трех образцов ПЖЛ, установлено, что льды характеризуются слабокислой реакцией химической среды ($pH = 6,32-6,51$), гидрокарбонатным кальциево-магниевый составом. По показателю общей жесткости определяются как мягкие (пробы 210-13,15 = 2,293 и 210-23 = 1,647 мг-экв/л) и умеренно жесткие (проба 210-1,2 = 3,650 мг-экв/л), по величине общей минерализации – умеренно пресные (129,0-291,3 мг/дм³). Изотопный состав ПЖЛ (16 проб) варьируется: $\delta^{18}O$ от -30,04 до -28,58 ‰, δD от -231,86 до -221,83 ‰, d_{exc} от 6,32 до 8,45 ‰.

Долина р. Линде. Повторно-жильные льды в пределах 75-метровой террасы р. Линде вскрыты в 5 метрах от уреза. Возраст вмещающих отложений отнесет к МИС 3 (радиоуглеродная дата МРІ-212 (558/+15 м) – > 50 000). Льды (1 проба) характеризуются слабокислой реакцией химической среды ($pH = 6,17$), как очень мягкие (жесткость составляет 0,141 мг-экв/л) и ультрапресные (27,1 мг/дм³), гидрокарбонатным кальциево-натриевым составом. В пробе отмечается повышенное содержание ионов аммония (NH_4^+) – 1,0 и нитратов (NO_3^-) – 6,0 мг /л. Изотопный состав (1 проба): $\delta^{18}O = -23,66$ ‰, $\delta D = -184,33$ ‰, $d_{exc} = 4,95$ ‰.

Долина р. Дяньшка. Повторно-жильные и текстурные льды (2 пробы), вскрытые в пределах долины р. Дяньшка отнесены по предварительным данным к МИС 1. Они характеризуются нейтральной реакцией химической среды ($pH = 6,74$ и $6,55$), как очень мягкие (0,075 мг-экв /л) и ультрапресные (12,4 и 13,8 мг/дм³), гидрокарбонатно-хлоридным магниевом-натриевым (ПЖЛ) и гидрокарбонатно-хлоридным натриево-кальциево-магниевым (текстурные льды) составом. Изотопный состав ПЖЛ: $\delta^{18}O = -26,60$ ‰, $\delta D = -201,81$ ‰, $d_{exc} = 10,95$ ‰. Изотопный состав текстурного льда: $\delta^{18}O = -19,38$ ‰, $\delta D = -143,78$ ‰, $d_{exc} = 11,25$ ‰.

4. Выводы

Таким образом, на основе полученных данных отмечено, что выделенные типы подземных льдов (пластовые, повторно-жильные, текстурные) поднеплейстоценового-голоценового

возраста имеют, в общем, схожие геохимические обстановки формирования на исследованных участках. Низкая минерализация и преобладание гидрокарбонатов свидетельствует о преобладании атмосферных осадков, участвующих в формировании льдов как верхнеплейстоценового, так позднеголоценового времени. Повышенное содержание ионов аммония (NH_4^+) и нитритов (NO_3^-) в пробах ПЖЛ, отобранных в пределах 75-метровой террасы р. Линде показывает, что образование льдов происходило в закрытой непроточной системе при процессах бактериального разложения органических веществ растительного или животного происхождения.

На основе анализа изотопного состава следует, что наиболее легким составом обладают пластовые льды каргинского возраста, наиболее тяжелым – голоценовые текстурные льды долины р. Дянышка. Прослеживается закономерность, чем древнее льды, тем имеют более облегченный состав, за исключением ПЖЛ 75-м террасы р. Линде (МИС-3), но возможно, из-за других условий и источников их формирования. Анализ дейтериевого эксцесса указывает, что при образовании льдов в долине р. Линде, р. Вилюй, Верхнего Бестяха, текстурных льдов р. Буотама преобладали испарительные процессы формирования, а в долине р. Ундюлюнг, р. Дянышка и ПЖЛ р. Буотама преобладали – конденсационные.

5. Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам Института Мерзлотоведения СО РАН Л.Ю. Бойцовой, О.В. Шепелевой, Н.В. Торговкину, Г.И. Шапошникову, А.В. Васильевой за помощь в выполнении аналитических работ.

Исследование проведено за счет НИОКТР 122011800064-9 «Строение и ключевые этапы эволюции континентальной криолитозоны в неоплейстоцене и голоцене»

6. Литература

- [1] Vasil'chuk, Yu.K. Geochemistry composition of ground ice in the Russian Arctic // Arctic and Antarctic. – 2016. – № 2. – P. 99-115.
- [2] Vasil'chuk, Yu. K. The isotopic and oxygen composition of underground ice (the Experience of paleogeocryological reconstruction). – Moscow: RAS Publishing House, 1992. – Vol. 1. – 420 p.
- [3] Vasil'chuk, Yu.K., Vasil'chuk, A.K. Isotope Ration in the Environment. Part 1. Stable isotope geochemistry of natural ice. Textbook. – Moscow: Moscow University Press, 2011. – 228 p.
- [4] Galanin, A.A., Shaposhnikov, G.I., Pavlova, M.R., Vasil'eva, A.N., Lytkin, V.M., Kuz'mina, S.A. ^{14}C -age and isotopic composition (^{18}O , D) of some genetic types of ground ice in the Central Yakutia // Proceedings of Second All-Russian conference with international participation «Geochronology of the Quaternary period: instrumental methods for dating the latest deposits». 19-22 April 2022. – Moscow, 2022. – P. 22.
- [5] Dereviagin, A. Yu., Chizhov, A.B., Meyer, H. Winter temperature conditions of Laptev sea region during the last 50 thousand years in the isotopic records of ice wedges // Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]. – 2010. – Vol. XIV. – № 1. – P. 32-40.
- [6] Papina, T.S., Malygina, N.S., Eirikh, A.N., Galanin, A.A., Zheleznyak M.N. Isotopic composition and sources of atmospheric precipitation in Central Yakutia // Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]. – 2017. – Vol. XXI. – № 2. – P. 60-69.
- [7] Shvartsev, S.L. Obshchay gidrogeologiya [General hydrogeology]. – Moscow: Nedra, 1996. – 424 p.
- [8] Boereboom, T., Samyn, D., Meyer, H., Tison, J.L. Stable isotope and gas properties of two climatically contrasting (Pleistocene and Holocene) ice wedges from Cape Mamontov Klyk, Laptev Sea, northern Siberia // The Cryosphere. – 2013. – Vol. 7. – P. 31-46.
- [9] Hoefs J. Stable isotope geochemistry. – Berlin: Springer-Verlag, 1997. – 201p.
- [10] Meyer, H., Opel, T., Laepple, T., Dereviagin, A.Y., Hoffman, K., Werner, M. Long-term winter warming trend in the Siberian Arctic during the mid-to late Holocene // Nature Geoscience. – 2015. – Vol. 8 (2). – P. 122-125.

**РЕСУРСЫ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СТОЧНЫХ ОЗЕР НА ТЕРРИТОРИИ
РАСПРОСТРАНЕНИЯ НАД- И МЕЖМЕРЗЛОТНЫХ ТАЛИКОВ В
ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ (НА ПРИМЕРЕ ОЗ. ЮНЮГЕСТЯХ)**

Надежда Павлова¹, Людмила Лебедева¹, Владимир Ефремов¹, Василий Огонеров¹, Иван Христофоров¹, Иван Горохов¹, Анна Полубелова²

1 ФГБУН «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН»,
677010, Россия, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36

2 ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова»,
677000, Россия, г. Якутск, ул. Белинского, 58

**RESOURCES AND CHEMICAL COMPOSITION OF OPEN LAKES IN THE
SUPRA- AND INTER-PERMAFROST TALIK AREAS IN CENTRAL YAKUTIA
(WITH AN EXAMPLE OF THE LAKE YUNYUGESTYAH)**

Nadezhda Pavlova¹, Lyudmila Lebedeva¹, Vladimir Efremov¹, Vasily Ogonerov¹, Ivan Khristoforov¹,
Ivan Gorokhov¹, Anna Polubelova²

1 Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36, Permafrost str., Yakutsk, 677010, Russia

2 North-Eastern Federal University, 58, Belinsky str., Yakutsk, 677000, Russia

Annotation. The geocryological and hydrogeological conditions of the Lake Yunyugestyakh and its drainage basin are considered. The results of hydrometric and hydrochemical studies of the lake and the stream flowing from it for 2007-2022 are presented. It is revealed that the resources of the lake consist of inter-permafrost and supra-permafrost components of the groundwater flow. From the end of June-July to February, the lake is mainly fed by the supra-permafrost groundwater of the seasonal thaw layer and subaerial taliks. In March-April, their drainage into the lake is restricted by the frozen ground surrounding the lake. In May-June, snowmelt and precipitation replenish water reserves primarily of subaerial taliks. Therefore, the flow of supra-permafrost water from the drainage basin into the lake and the lake talik is limited. The inter-permafrost waters discharge to the Lake Yunyugestyakh all year round that is confirmed by the perennial flow of the stream. During the observation period, the general trend towards a reduction in the flow of the stream corresponds to a reduction in groundwater reserves of subaerial supra-permafrost taliks of the Bestyakh terrace. Seasonal variability of mineralization and trace element concentration in the lake water also indicates a varying degree of supra-permafrost and inter-permafrost waters contribution to the lake water supply throughout the year.

1. Введение

В Центральной Якутии на правобережной средневысотной надпойменной бестяхской террасе р. Лена в песчаных отложениях широко распространены водоносные горизонты с пресными подземными водами, приуроченные к субаэральным над- и межмерзлотным таликам [1, 2]. Подземные воды межмерзлотных таликов изучены, в основном, в области их субаэральной разгрузки [3-6]. Большинство источников межмерзлотных вод расположены у подножия бестяхской террасы, где они зимой формируют наледи. Вместе с тем, на этой террасе имеются озера без следов усыхания. Из некоторых из них вытекают ручьи, причем поверхностный сток происходит круглогодично, а их химический состав близок с подземными водами, разгружающимися в основании террасы. Изученность таких озер и их связи с подземными водами над- и межмерзлотного стока до настоящего времени остается крайне низкой.

Целью исследований являлось изучение сточного озера Юнюгестях, мерзлотно-гидрогеологических условий его котловины и водосборной площади. Для этого по фондовым материалам были изучены разрезы скважин, пробуренных ранее на этой территории, собраны и

проанализированы результаты гидрометрических и гидрохимических исследований озера и вытекающего из него ручья за 2007-2022 гг. В 2022 г. измерены расходы ручья в марте и сентябре, для химических анализов отобраны пробы воды из озера и ручья в зимний, летний и осенний периоды. В марте и октябре для определения морфологии дна водоема выполнены георадарные исследования. При характеристике надмерзлотных вод использованы фондовые материалы, а также результаты гидрохимического опробования скважины, пробуренной на водосборной площади озера осенью 2022 г. Для изучения уровня режима озера в годовом цикле проанализированы результаты ежедневных измерений высоты столба воды в месте полыньи, формирующейся у истока ручья Юнюгестях. Замеры проводились с помощью датчика автоматической регистрации уровня воды с октября 2019 г. по октябрь 2022 г.

2. Мерзлотно-гидрогеологические условия территории

Оз. Юнюгестях расположено в области сплошного распространения многолетнемерзлых пород, мощность которых изменяется от 180 до 420 м. Озеро имеет округлую форму, размеры его зеркала около 0.54 x 0.67 км. По результатам дешифрирования аэрофотоснимков разных лет (1946, 1952, 1971, 2005-2022 гг.) площадь акватории оз. Юнюгестях практически не зависит от водности года и составляет около 0,33 км². Глубина водоема в центральной части 2.0-2.5 м. Дно его выровнено за счет садки органогенного ила, мощность которого вблизи берега 0.3-1.0 м, а в наиболее глубоководных местах достигает 6 м. Озерную котловину окружает лиственнично-березовый лес 30-150 метровым кольцом, за ним распространен редкий сосновый лес со следами пожаров. Вытекающий из оз. Юнюгестях одноименный ручей зимой, даже в сильные морозы, не замерзает, несмотря на довольно низкую температуру его воды (0-0.5°C). В месте его истока сохраняется полынья, протяженность которой в отдельные годы достигает 50 м. Ниже по течению ручья формируется наледь. Руч. Юнюгестях является притоком р. Менда.

На водосборной площади озера мощность слоя сезонного протаивания пород изменяется от 3 м на выположенных песчаных склонах до 1.5 м в озерной котловине. Пески зоны аэрации имеют очень низкую влажность, которая в верхней части разреза составляет 2-6%, лишь у подошвы слоя сезонного протаивания она увеличивается до 10-20%. На участках, покрытых сосновым редколесьем, широко распространены над- и межмерзлотные талики мощностью до 4-10 м. Так, по фондовым материалам Института мерзлотоведения СО РАН, в июне 1958 г. при бурении скважины в 400 м от оз. Юнюгестях под мерзлыми породами с глубины 5.5 м вскрыты водонасыщенные талые пески. В сентябре 2022 г. на водосборной площади озера георадарными исследованиями выявлены надмерзлотные талики мощностью до 6-10 м к северу и востоку от озерной котловины. При заверочном бурении скважины на геофизическом профиле, в 300 м к северо-востоку от озера, вскрыты талые водонасыщенные пески в интервалах глубин 5,5-7.5 м и 9.6-16 м, разделенные многолетнемерзлыми породами.

Под оз. Юнюгестях развит межмерзлотный напорно-фильтрационный талик. В 2004 г. при бурении скважины глубиной 100 м в 5 м от уреза озера геологами Якутской поисково-съемочной экспедиции вскрыты многолетнемерзлые пески мощностью 24 м. Под ними залегают талые водонасыщенные гравийно-галечниковые отложения до глубины 37 м, постилающиеся кембрийскими известняками. Уровень подземных вод четвертичного водоносного горизонта установился на глубине 1.5 м, а кембрийского на 0.8 м выше поверхности земли. Такое соотношение уровней свидетельствует о перетекании подземных вод из кембрийских отложений в четвертичный водоносный горизонт и опосредованное питание ими озера.

3. Результаты исследований и их обсуждение

Исходя из мерзлотно-гидрогеологических условий территории, в формировании ресурсов озера предполагается участие подземных вод надмерзлотного и межмерзлотного стока.

Питание оз. Юнюгестях надмерзлотными водами, стекающими с водосборной площади, начинается в конце июня-июле, лишь после того, когда глубина сезонного протаивания пород в озерной котловине достигает 1.0-1.5 м. Ограниченное поступления талых снеговых и

надмерзлотных вод в водоем в мае-начале июня подтверждается самыми низкими уровнями воды озере и ручье в это время (Рисунок 1). В дальнейшем до конца августа, приток в озеро надмерзлотных вод вкупе с процессами испарения вызывают колебательное изменение положения зеркала воды с амплитудой около 5 см. Устойчивое повышение поверхности водоема с сентября до конца февраля свидетельствует о продолжающемся стоке надмерзлотных вод в озеро. Затем, после промерзания сезонноталого слоя пород в прибрежной части озерной котловины, уровень воды в озере и ручье постепенно понижается до июля. Диапазон внутригодовых колебаний уровня воды в период 2019-2022 гг. составил 34-41 см.

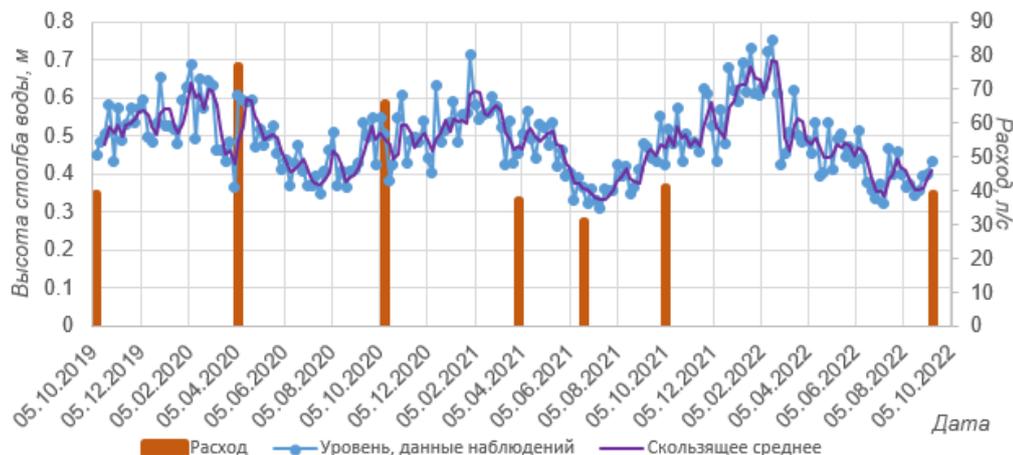


Рисунок 1 – Изменение уровня и расхода воды руч. Юнгестях в месте его истока из озера в 2019-2022 гг.

Количественные данные о зимнем стоке воды из озера имеются с 2010 гг. С этого времени до 2018 г. в конце марта-начале апреля расход ручья колебался в пределах 53-68 л/с. В 2019-2022 гг. отмечалось сокращение поверхностного стока до 37-39 л/с. Исключение составил 2020 г., когда расход воды в ручье достиг 77 л/с.

В период 2007-2021 гг. в конце сентября-начале октября величина поверхностного стока руч. Юнгестях изменялась от 39 до 91 л/с. Максимальные осенние расходы (91 и 87 л/с) воды были в 2007 и 2014 гг., после предыдущих аномально влажных лет: в период 2006-2007 гг. и 2013 гг. сумма летних атмосферных осадков составила 252-247 и 317 мм соответственно при норме 176 мм. В эти же годы в гидрогеологических скважинах, обрудованных для наблюдений за водообильностью надмерзлотных и межмерзлотных субэкранных таликов на бестяхской террасе, зафиксировано повышение уровня воды на 1-3 м. Минимальные величины поверхностного стока руч. Юнгестях (39-41 л/с) были в последние три года. В целом, в период наблюдений общая тенденция к сокращению стока в ручье осенью согласуется со сработкой запасов подземных вод субэкранных надмерзлотных таликов бестяхской террасы (Рисунок 2.).

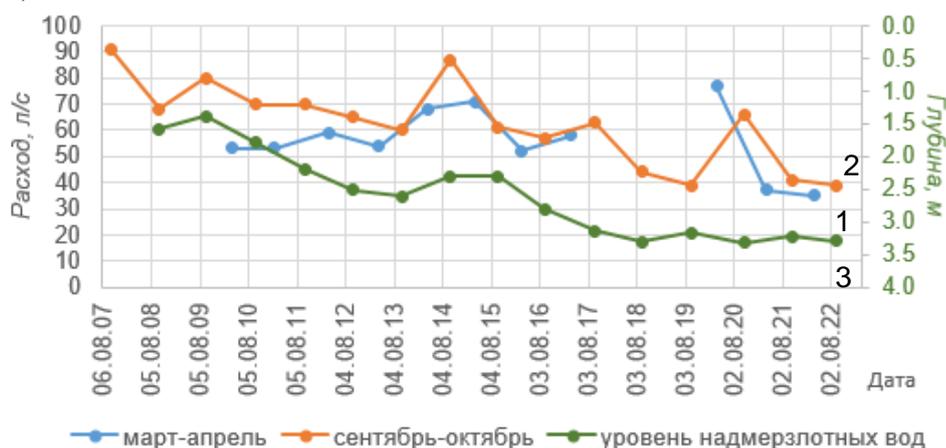


Рисунок 2 – Изменение расхода воды в руч. Юнгестях зимой (1) и осенью (2) и глубины залегания надмерзлотных грунтовых вод в скважине 53 осенью (3) в 2007-2022 г.

По химическому составу все опробованные воды принадлежат гидрокарбонатному классу (Рисунок 3б). Суммарное содержание в них хлорид- и сульфат-ионов не превышает 4 мг-экв.% от суммы главных анионов. Исключением являются надмерзлотные воды сезонноталого слоя и надмерзлотных субэаральных таликов, в них доля хлорид-ионов может достигать 7-14 мг-экв.%, а сульфат-ионов 3-9 мг-экв.%. Эти надмерзлотные воды ультрапресные, с минерализацией 0.02-0.03 г/дм³, смешанные по катионному составу, с содержанием фтора менее 0.3 мг/л и стронция до 0.04 мг/л. Реакция водной среды изменяется от слабокислой до нейтральной (рН 5.6-7.1).

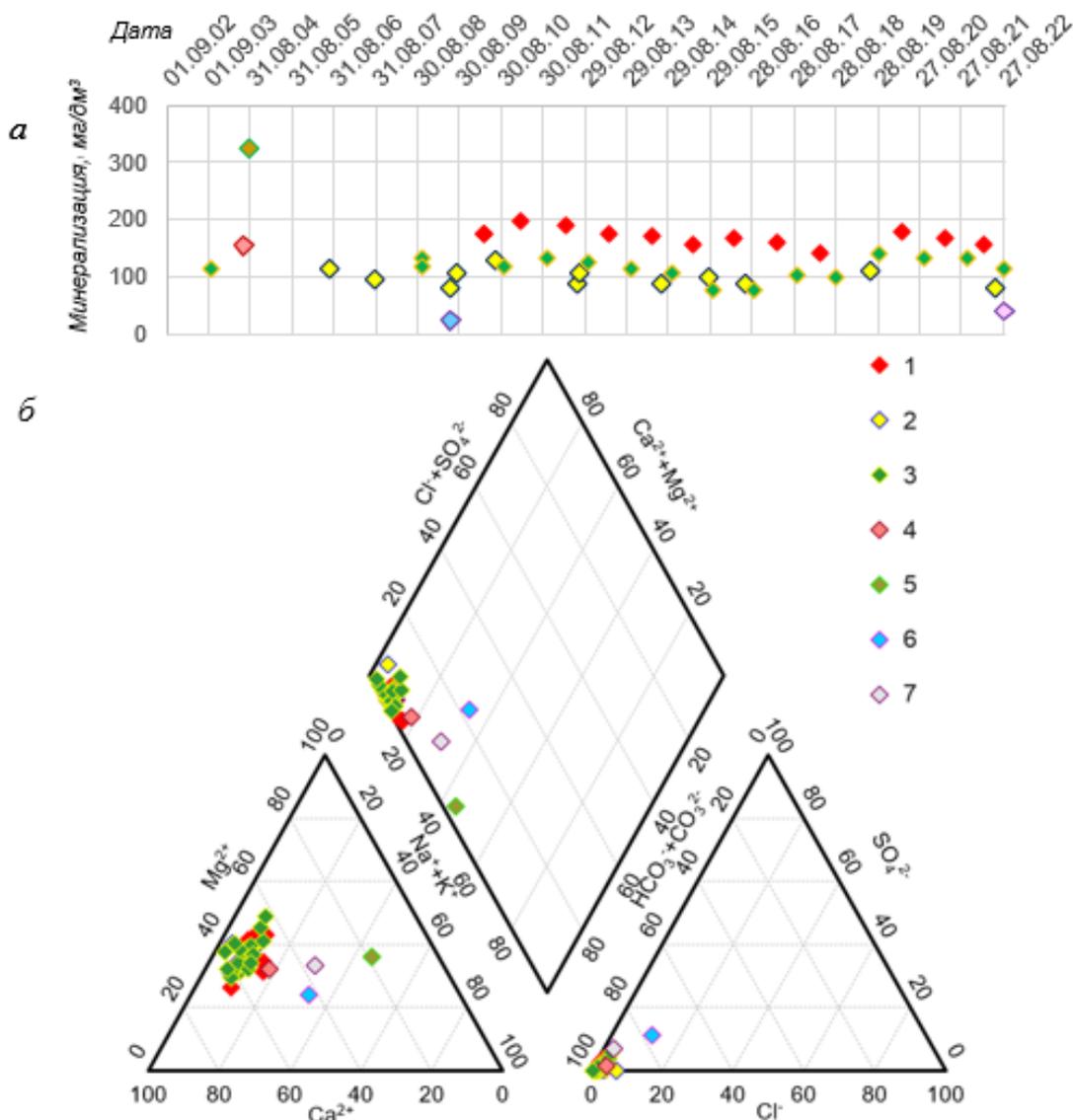


Рисунок 3 – Изменение минерализации (а) и химический состав (б) поверхностных и подземных вод, участвующих в формировании стока руч. Юногестях: 1–3 – руч. Юногестях: 1 – март-апрель, 2 – июнь-август, 3 – сентябрь-октябрь; 4–5 - подземные воды подозерного талика: 4 – четвертичного водоносного горизонта, 5 – кембрийского водоносного горизонта; 6–7 – надмерзлотные воды: 6 – субэарального талика, 7 – сезонноталого слоя.

Подземные воды в подозерном талике наиболее минерализованы из всех опробованных. В кембрийском водоносном горизонте сумма растворенных веществ в воде составляет 0.33 г/дм³, в ее катионном составе преобладают ионы натрия (47 мг-экв.% от суммы главных катионов) и магния (36 мг-экв.%), содержится фтор и стронций в количестве 1.7 и 6.06 мг/л соответственно. Вода имеет слабый запах сероводорода. Температура ее на изливе из скважины 0.4°C. Подземные воды четвертичного водоносного горизонта в субэаральном талике имеют

минерализацию 0.15 г/дм³, в их составе преобладают ионы кальция (50-56 мг-экв.%) и магния (32-36 мг-экв.%), на долю натрия приходится около 17 мг-экв.%, концентрация фтора равна 0.4 мг/л, а стронция 0.22 мг/л. По величине водородного показателя подземные воды подозерного талика слабощелочные (рН 7.8-8.1).

В озере и ручье, вытекающем из него, минерализация воды изменяется по сезонам года. В конце зимы она составляет 0.14-0.20 г/дм³, летом – 0.08-0.10 г/дм³, а осенью равна 0.10-0.14 г/дм³. Соотношение главных катионов в поверхностных водах близко к водам четвертичного водоносного горизонта, развитого под озером. В зимний период отмечается небольшой рост содержания натрия и калия, в результате их доля в формировании состава воды суммарно составляет до 8-16 мг-экв.%, против 4-12 мг-экв.% летом и осенью. Колебания концентраций характерны и для фтора и стронция: зимой содержание этих элементов в поверхностных водах изменяется в пределах 0.5-0.9 и 0.15-0.35 мг/л соответственно, а летом и осенью уменьшается до 0.3-0.6 и 0.04-0.28 мг/л соответственно.

По величине водородного показателя вода в озере зимой слабокислая и нейтральная (рН 6.2-7.7). Летом и осенью с ростом температуры воды увеличивается ее щелочность до 7.9-9.4. В щелочной среде нарушается карбонатное равновесие и до 20-30 мг-экв.% гидрокарбонатов переходит в карбонаты. При этом выпадение в осадок карбонатов кальция и магния, а также проточность озера определяют относительно постоянную минерализацию воды в нем в теплое время года, несмотря на интенсивные процессы испарения с зеркала водоема. На гидрогенную аккумуляцию кальция в прибрежной части водоема косвенно указывает растительность (венерин башмачок *Cypripedium calceolus* и *Cypripedium macranthon*), произрастающая вблизи истока ручья, которая предпочитает хорошо увлажненные щелочные богатые кальцием почвы. Вполне вероятно, что формированию большой мощности донных отложений озера также способствуют процессы выпадения в осадок солей на физико-химическом барьере.

4. Заключение

Таким образом, ресурсы оз. Юногестях складываются из надмерзлотной и межмерзлотной составляющих подземного стока. Основное питание озера подземными водами сезонноталого слоя и надмерзлотных субаэральных таликов происходит в период с конца июня-июля по февраль. В марте-апреле их стоку в водоем препятствуют мерзлые породы озерной котловины. В мае-июне снеготалые воды и атмосферные осадки, выпадающие на водосборную площадь, инфильтруются в осушенную часть субаэральных таликов, восполняя их запасы. Поэтому поступление надмерзлотных вод с окружающей территории в озеро и подозерный талик задерживается.

Разгрузка межмерзлотных вод в оз. Юногестях происходит круглогодично и подтверждается непрерывающимся стоком ручья. О разной степени участия надмерзлотных и межмерзлотных вод в питании водоема в течение года свидетельствует сезонная изменчивость величины минерализации и содержания фтора и стронция в поверхностных водах. Преобладающая роль в формировании химического состава поверхностных вод принадлежит надмерзлотным водам четвертичных отложений. Участие подземных вод кембрийских отложений в питании оз. Юногестях проявляется зимой в повышенных концентрациях микроэлементов (стронция, фтора) в водных пробах из ручья и озера.

Принимая во внимание постоянно существующий напорный режим в подозерном талике, высокую водообильность его пород, часть межмерзлотного стока из кембрийского водоносного горизонта, вероятно, проходит транзитом и разгружается в долинах близлежащих водотоков.

Озеро-источник Юногестях не является исключением для территории исследований. Аналогичные условия гидравлической связи подземных и поверхностных вод можно ожидать в южной части бестяхской террасы и на других водоемах, из которых сток осуществляется круглогодично.

5. Благодарности

Исследование поддержано грантом РНФ и Якутского научного фонда № 22-17-20040.

6. Литература

- [1] Boitsov, 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. – P. 46–62.
- [2] Shepelev, V.V., Suprapermafrost water in permafrost zone. – Novosibirsk: Geo, 2011. – P. 169.
- [3] Anisimova, N.P. Cryological–Hydrogeochemical Features of the permafrost zone. – Novosibirsk: Nauka, 1981. – 153 p.
- [4] Anisimova, N.P. Pavlova, N.A., Hydrogeochemical studies of permafrost in Central Yakutia. – Novosibirsk: Geo, 2014. – P. 189.
- [5] Pavlova, N.A., Kolesnikov, A B., Efremov, V.S., and Shepelev, V.V. Groundwater Chemistry in Intrapermafrost Taliks in Central Yakutia // Water Resources, 2016, Vol. 43, No. 2, pp. 353–363.
- [6] Gagarin, L.A., Bazhin, K.I., Olenchenko, V.V., Ogonerov, V.V., Wu Qingbai. Revealing potential thermosuffosional soil loosening sites along A-360 Lena Federal Highway, Central Yakutia // Earth's Cryosphere. – 2019. – Vol. 23. – No. 3. – P. 61-68.
- [7] Pavlova, N.A., Shepelev, V.V., Galanin, A.A. and Efremov, V.S. Groundwater hydrochemistry of suprapermafrost–intrapermafrost flow in their discharge areas in Central Yakutia // Water Resources. – 2020. – Vol. 47. – No. 4. – P. 581-590.

ИЗМЕНЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ ЗАМЕРЗАНИЯ ОТТАИВАНИЯ

Владимир Попов

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

CHANGES IN CONCENTRATION IN BOTTOM SEDIMENTS UNDER INFLUENCE OF CLIMATIC FREEZING AND THAWING CYCLES

Vladimir Popov

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

Annotation. The results of a computational experiment on modeling the dynamics of concentration growth in the bottom layer of a tailing dump are presented. This growth is caused by the concentration of the solution due to the displacement of the ice-solution phase transition boundary. An increased concentration leads to an increase in the absorption of salts by bottom sediments. This fact may lead to a change in the stable state of the base of the tailings dams.

1. Введение

Разработка рудных месторождений на территории РС(Я) и других территориях сходных по климатическим условиям обуславливает строительство и эксплуатацию накопителей отходов обогащения (хвостохранилищ). Технологии строительства хвостохранилищ должны обеспечивать их длительное существование в замкнутом режиме, обеспечивающем отсутствие поступления токсичных веществ в окружающую среду [1]. Большое теоретическое и практическое значение имеет изучение длительной деформации дамб хвостохранилищ в районах сезонной мерзлоты под действием циклов замораживания-оттаивания и перераспределения концентрации солей, что является основной механической проблемой, непосредственно стоящей при строительстве хвостохранилищ в холодных районах [2]. В институте ИГДС СО РАН (г. Якутск) разработаны научно-практические подходы позволяющие определить конструктивные и технологические параметры, обеспечивающие твердомерзлое состояние отходов на протяжении длительного временного интервала. Эти подходы основаны и апробированы с помощью разработанных математических моделей процессов тепло-влаги и концентрационного переноса с учетом химических реакций в природно-технических комплексах, включающем тело ограждающей дамбы, толщу накопленных отходов золотоизвлекательной фабрики и массив горных пород в основании хвостохранилища, на различных интервалах времени эксплуатации [3].

2. Основной раздел

Для выявления закономерностей динамики фазовых границ, химизма и учета разномасштабности процессов теплопереноса в дамбах и в отложениях хвостохранилищ в целом расчеты проводились на одномерной модели. Результаты одномерных расчетов использовались как исходные данные для двухмерной модели. В качестве исходных данных задавались климатические характеристики, соответствующих районов РС (Я). При консервации хвостохранилища на поверхности отходов формируют защитный, изолирующий от внешних природных воздействий, экран из грунтов и почвы, который предотвращает развитие процессов выветривания и обеспечивает их твердомерзлое состояние.

В данной статье определены механизмы и представлены математические модели для количественной оценки тепловых и массообменных процессов в основании комплекса хвостохранилища, включающем тело ограждающей дамбы, толщу накопленных отходов объекта горного производства, на длительном интервале времени [3].

Перераспределение влаги и растворенных веществ в отложениях хвостов при циклах замораживания-оттаивания и накопление талой воды на границе раздела замерзания-оттаивания могут привести к нарушению устойчивости и прорыву дамб в районах вечной мерзлоты.

Математическая модель процесса тепломассопереноса в хвостохранилище включает рассмотрение процессов в жидкой фазе отходов в следующей последовательности: рассматривается задача промерзания жидкой фазы и связанное с перемещением границы лед-раствор концентрирование растворенного компонента в жидкой (не промерзшей части). Допускается существование (появление) дефекта в гидроизоляционном слое дна хвостохранилища на участке примыкания к борту. Проникновение раствора повышенной концентрации за пределы защитных гидроизоляционных слоев приводит к деградации мерзлотного водоупора и выносу отходов в основание защитных дамб. Геометрические характеристики области одномерного процесса тепломассопереноса в объеме хвостохранилища представлены на рисунке 1.

На верхней границе области и поверхности раствора действует конвективный теплообмен с воздушной средой с температурой T_{cp} соответствующей годичному тренду. Для потоков влаги и концентрации эти границы непроницаемы. На нижней границе - постоянные значения температуры и отсутствие потоков растворенных веществ. Математическое моделирование динамики тепловых, влажностных и концентрационных полей в массиве ограждающих хвостохранилище, осуществлялось на основе численного решения уравнений тепло и массообмена с соответствующими краевыми условиями. На рисунке 2 представлен результат процесса накопления концентрационных изменений в донном отложении хранилища.

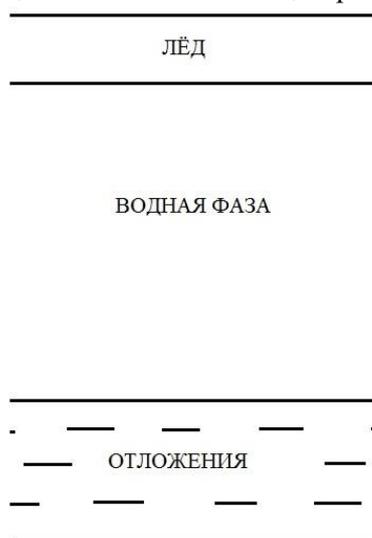


Рисунок 1 – Область моделирования.

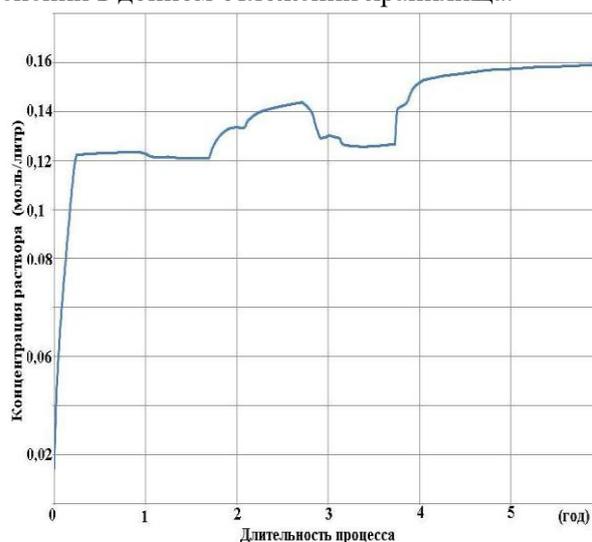


Рисунок 2 – Динамика концентрационных изменений в донных отложениях.

3. Выводы

Экстремальный рост концентрации отходов в придонном слое (ложе) может привести к деградации мерзлотного водоупора, изменение механических параметров обеспечивающих устойчивость оснований дамб хвостохранилищ и выходу отходов в окружающую среду

4. Литература

- [1] Shestakov V.M. Osnovy gidrogeologicheskikh raschetov pri filtracii iz hranilisch promyshlennykh stokov. – Moscow, 1961. – 101 p.
- [2] Jiayu Jin, Shiwang Li, chenguang Song, Xinlei Zhang & Xiangfeng Lv. Ageing deformation of tailings dams in seasonally frozen soil areas under freeze-thaw cycles // Scientific reports 9. – 2019. – 15033. – URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51449-6>.
- [3] Popov V.I. An approximate method for solving problems of heat and mass transfer during freezing of moisture in rocks of the permafrost zone // GIAB / V.I. Popov, A.S. Kurilko. – 2018. –No. 12. – P. 57-64. – DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-57-64.

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ГАЗОГИДРАТОВ В ПРОЦЕССЕ РЕАЛИЗАЦИИ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ВОДОПОЛИМЕРНОМУ ЗАВОДНЕНИЮ НЕФТЯНЫХ ОТОРОЧЕК НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЯКУТИИ

Альберт Портнягин, Изабелла Иванова
ФГБУН ФИЦ «ЯНЦ СО РАН» «Институт проблем нефти и газа СО РАН»,
677007, Россия, г. Якутск, ул. Автоторожная, 20

STUDY OF THE POSSIBILITY OF FORMATION OF GAS HYDRATES IN THE PROCESS OF IMPLEMENTATION OF MEASURES ON WATER-POLYMER FLOODING OF OIL RIM OF OIL AND GAS FIELDS OF YAKUTIA

Albert Portnyagin, Isabella Ivanova
Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, 20, Avtodorozhnay str., Yakutsk, 677007, Russia

Annotation. The results of DTA - studies of thermodynamic and kinetic characteristics of the formation of natural gas hydrates in the systems "formation water - porous medium - polymer solution" are presented. Commercially available polymer samples were used in the experiments: 1) polyacrylamide (PAA); 2) sodium carboxymethyl cellulose (Na-CMC) and 3) polyethylene glycol (PEG)). It has been shown that during hydrate formation in the "porous medium - polymer solution" systems, the PEG solution exhibits the properties of a kinetic inhibitor, the Na-CMC solution exhibits the properties of a thermodynamic inhibitor, and the PAA solution exhibits the properties of a kinetic promoter.

1. Введение

Нефтяные залежи Юго-Западной Якутии, относятся к трудноизвлекаемым запасами этого ресурса. Низкие пластовые температуры и давления, высокая минерализация подстилающих вод, локализация нефти в виде нефтяных оторочек и наличие газовой шапки, все эти факторы отягощают добычу нефти на этих месторождениях. Без внедрения методов увеличения нефтеотдачи, при эксплуатации месторождения в режиме истощения, коэффициент извлечения нефти (КИН) таких залежей не превышает 10-15% [1]. Наиболее распространенным методом разработки нефтяных оторочек нефтегазовых месторождений является разработка посредством бурения горизонтальных скважин, продуктивная часть которых распространяется по нефтенасыщенному пласту параллельно его залеганию на значительные расстояния [2]. Особенно хорошо горизонтальное бурение зарекомендовало себя на месторождениях с большой анизотропией фильтрационно-емкостных свойств нефтенасыщенных пород вызванной наличием непроницаемых прослоек гравелитов, алевролитов и аргиллитов [3]. Применение горизонтальных скважин увеличивает площадь охвата нефтеизвлечения за счет вовлечения в разработку изолированных участков продуктивного пласта, вследствие чего применение горизонтального бурения способно повысить КИН нефтяных оторочек до 30%. Однако, наряду с положительными сторонами, у данного метода есть объективные недостатки. Основными из них являются: дороговизна строительства скважин, а также проявление локальных прорывов газа или подстилающих вод в скважину происходящие по причине расположения горизонтальной части скважины вблизи зон водонефтяного (ВНК) или газонефтяного контакта (ГНК) приводящих к лавинообразному росту загазовывания и обводнения добываемой продукции. С целью борьбы с прорывами в скважину газа из газовой шапки месторождения широко применяется барьерное заводнение, осуществляемое высоковязкими растворами полимеров, которые распространяются вдоль ГНК и препятствуют языковидному вклиниванию газа в нефтенасыщенные слои, а также способствуют вытеснению нефти к нефтедобывающим скважинам и выравниванию фронта вытеснения.

Применение водополимерного заводнения на нефтегазовых месторождениях Юго-Западной Якутии может привести к риску образования гидратов в зоне газонефтяного контакта, так как рассматриваемые месторождения характеризуются аномально низкими пластовыми температурами и давлениями, удовлетворяющими термодинамическим условиям образования газогидратов. Поэтому исследование процессов образования гидратов природного газа в пористой среде в растворах полимеров являются актуальными и своевременными.

2. Основной раздел вашей статьи

Исследование процессов образования газогидратов проводили методом дифференциального термического анализа на экспериментальной установке, схема которой представлена на рис. 1. Объектами исследования являлись гидраты природного газа, полученные в образцах монодисперсного кварцевого песка с размером зерен $0,4 \div 0,3$ мкм, который увлажняли пресной водой и растворами полимеров.

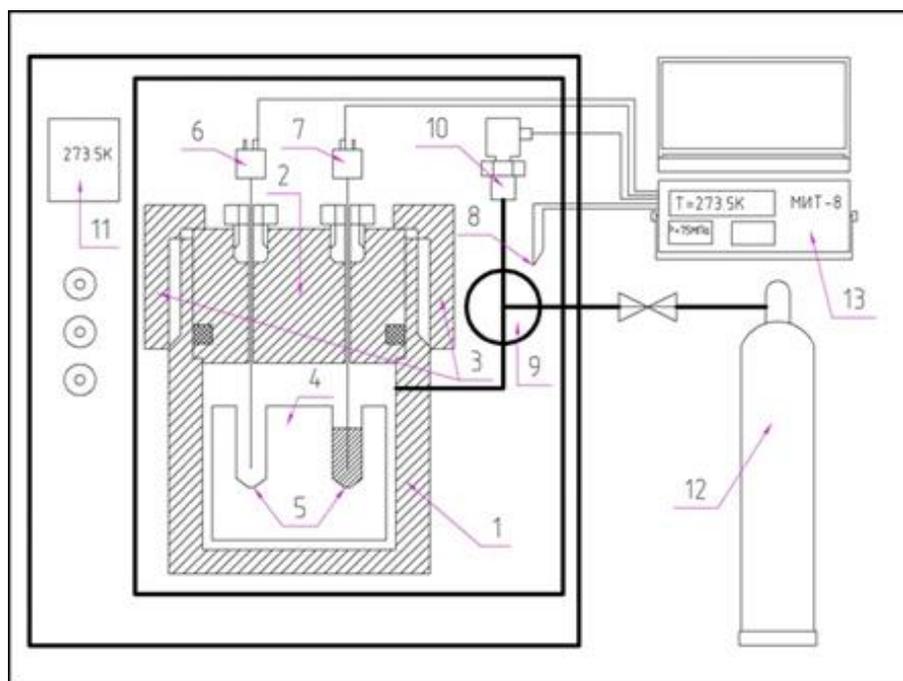


Рисунок 1. Схема установки для исследования гидратов методом ДТА

1, 2 и 3 - стакан, крышка и запирающая скоба камеры высокого давления; 4 - измерительная ячейка с интегрированными в нее кюветами (5) из инертного полимера; 6, 7 и 8 - термопары КТХА; 9 - заправочный порт; 10 - датчик давления МИДА; 11 - воздушный термостат - инкубатор «MIR - 256» фирмы Sanyo (Япония); 12 - баллон с компримированным природным газом; 13 - прецизионный многоканальный измеритель температуры «МИТ - 8» с подключенным к нему ЭВМ.

В качестве газа-гидратообразователя использовался природный газ Средневилюйского газоконденсатного месторождения (ГКМ). В составе газа преобладает метан (93% мол.).

Методика проведения эксперимента и состав газа-гидратообразователя аналогичны описанным в работе [4] за исключением начального давления газа в измерительной ячейке при 20°C , которое в данной работе составляло 13 МПа.

Скорости охлаждения системы в процессе гидратообразования и нагрева в процессе диссоциации получаемых гидратов составляли 3 и $4^{\circ}/\text{час}$, соответственно.

Степень переохлаждения системы (ΔT) определяли как разность температур между точкой начала гидратообразования (А) и точкой (В) соответствующей равновесной температуре этого процесса.

Количество газа (Δn_g , моль), поглощенного в процессе гидратообразования, рассчитывали по формуле [5]:

$$\Delta n_g = V_C \left[\left(\frac{P_c}{zRT} \right)_0 - \left(\frac{P_c}{zRT} \right)_t \right],$$

где V_C - свободный объем камеры, м³; P_c - давление газа в камере в данный момент времени, Па; z - коэффициент сжимаемости газа; R - универсальная газовая постоянная, Дж/моль·К; T - температура в камере в данный момент времени, К.

Скорость гидратообразования рассчитана как отношение нормированного по воде количества поглощенного газа в процессе гидратообразования к времени, затраченному на этот процесс [6].

Степень превращения воды в гидрат (W_h , %) определена по формуле [5]:

$$W_h = \frac{\Delta n_g \cdot n \cdot 100\%}{n_w},$$

где Δn_g – количество газа, связавшегося в гидрат, моль; n – гидратное число для гидрата природного газа структуры КС-II $n=5,67$ [7]; n_w – количество воды в начальный момент времени, моль.

3. Результаты и их обсуждение

Известно, что подавляющее число растворов полимеров являются кинетическими ингибиторами процесса гидратообразования, которые увеличивают степень переохлаждения системы и снижают скорость этого процесса. Представленные в данной работе растворы полимеров также относятся к кинетическим ингибиторам гидратообразования, как отдельно, так и в смесях с другими полимерами, например, с поливинилпирролидоном. Известно [8], что при образовании газогидратов в пористой среде с пресной водой происходит изменение кинетических параметров процесса (скорости образования гидратов и степени переохлаждения системы), а также смещение равновесных условий гидратообразования в область низких температур и высоких давлений. Следовательно, можно предполагать, что пористая среда будет влиять на термодинамические и кинетические характеристики процессов гидратообразования и в растворах полимеров.

Исследование процессов образования гидратов природного газа Средневилюйского ГКМ в растворах ПАА, Na-КМЦ и ПЭГ в пористой среде показало, что по сравнению дистиллированной водой, равновесные условия образования гидратов в растворах Na-КМЦ смещаются в область низких температур на 0,9-2,9°С (рис. 2). При этом, с увеличением концентрации полимера в растворе его ингибирующее действие увеличивается, так максимальным ингибирующим действием обладает раствор Na-КМЦ с концентрацией 7 г/л. В отличие от растворов Na-КМЦ, равновесные условия гидратообразования в пористой среде с растворами ПАА и ПЭГ всех концентраций смещены в область повышенных температур на 0,2-0,9°С, что свидетельствует о слабовыраженных промотирующих свойствах растворов ПАА и ПЭГ по сравнению с дистиллированной водой (см. рис. 2). Следовательно, в пористой среде раствор Na-КМЦ проявляет свойства термодинамического ингибитора, а растворы ПАА и ПЭГ являются промоторами гидратообразования. Однако, выраженной зависимости равновесных условий гидратообразования от концентрации растворов этих полимеров установить не удалось.

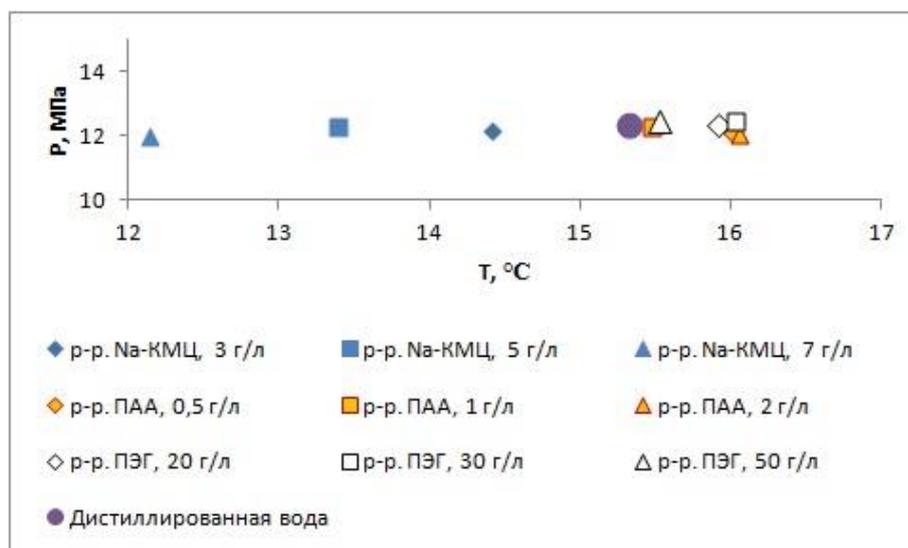


Рисунок 2 – Равновесные условия образования гидратов природного газа в системе «пористая среда – дистиллированная вода / раствор полимера».

Известно, что процесс гидратообразования сопровождается переохлаждением системы, которое необходимо для инициирования образования зародышей кристаллов гидрата. Под понятием степень переохлаждения системы понимается разность между равновесной температурой гидратообразования и температурой среды, в которой происходит процесс образования гидратов. В свою очередь, степень переохлаждения во многом зависит от условий охлаждения системы, состава и свойств газонасыщенных пород [8, 9]. Так как во всех экспериментах диапазон изменения температуры, скорость охлаждения, а также характеристики пористой среды были одинаковыми, поэтому определяющим фактором, влияющим на величину переохлаждения системы, будут являться природа и состав среды гидратообразования.

Изучение переохлаждения системы в процессе образования гидратов природного газа в растворах Na-KMЦ, ПАА и ПЭГ в пористой среде показало, что для инициирования гидратообразования в этих системах необходимо приложить меньше энергии, чем при образовании гидратов в дистиллированной воде (табл. 1). Установлено, что степень переохлаждения системы и скорость образования гидратов в большей степени зависят от природы полимера, чем от его концентрации. Так, если для растворов Na-KMЦ величины переохлаждения несколько ниже этого параметра в дистиллированной воде на 0,34-1,47°C, то для растворов ПАА и ПЭГ величина степени переохлаждения снижается на 4,53-1,94 и 3,43-2,97°C, соответственно. Следует отметить, что с увеличением концентрации растворов ПАА и ПЭГ степень переохлаждения увеличивается, тогда как для растворов Na-KMЦ четкой концентрационной зависимости не наблюдается (см. табл. 1).

Скорость образования гидратов в растворах ПАА и Na-KMЦ в пористой среде с минимальной концентрацией полимера выше скорости образования гидратов в дистиллированной воде на 78,6 и 32,9% соответственно, а скорость образования гидратов в растворах ПЭГ с концентрацией 30 г/л на 14,8% ниже (см. табл. 1). При этом, с увеличением концентрации полимера в растворе скорость гидратообразования пропорционально снижается и становится меньше скорости образования гидратов в дистиллированной воде. Если для растворов Na-KMЦ и ПЭГ увеличение концентрации полимера приводит к снижению скорости гидратообразования на 39,4 и 54,0%, соответственно, то для раствора ПАА эта величина составляет 67,8%.

Таблица 1 – Кинетические параметры образования гидратов природного газа в системе «пористая среда – дистиллированная вода / растворы ПАА, Na-КМЦ, ПЭГ»

| Полимер | Концентрация полимера, г/л | Степень переохлаждения (ΔT), °C | Скорость ГО нормированная по воде), $\cdot 10^{-4}$ моль/с | Степень превращения воды в гидрат (W_h), % |
|-----------------------|----------------------------|---|--|--|
| Дистиллированная вода | 0 | 10,78 | 0,365 | 31,44 |
| | 0,5 | 6,25 | 0,652 | 46,89 |
| ПАА | 1 | 7,33 | 0,505 | 46,08 |
| | 2 | 8,84 | 0,210 | 45,73 |
| | 3 | 10,16 | 0,485 | 13,31 |
| Na-КМЦ | 5 | 10,44 | 0,343 | 11,58 |
| | 7 | 9,31 | 0,294 | 10,64 |
| | 20 | 7,35 | 0,311 | 6,61 |
| ПЭГ | 30 | 7,65 | 0,202 | 6,24 |
| | 50 | 7,81 | 0,143 | 5,23 |

Установлено, что степень превращения воды в гидрат в растворах полимеров в пористой среде также как степень переохлаждения и скорость гидратообразования, во многом зависит от природы полимера и в меньшей степени от его концентрации. Так, наличие ПАА в среде гидратообразования приводит к значительному увеличению степени превращения воды в гидрат на 45,4-49,1% в зависимости от его концентрации (табл. 1). Тогда как в растворах Na-КМЦ и ПЭГ этот параметр снижается на 66,2-57,6 и 83,3-79,0% соответственно, по сравнению с дистиллированной водой. Во всех системах с увеличением концентрации раствора полимера степень превращения воды в гидрат снижается.

Таким образом, на основе проведенных исследований, можно сделать вывод о том, что в пористой среде растворы Na-КМЦ в диапазоне концентраций от 3 до 7 г/л выступают в роли термодинамических ингибиторов, поскольку смещают равновесные условия гидратообразования по термической шкале в область низких температур. Присутствие Na-КМЦ в среде гидратообразования незначительно влияет на скорость гидратообразования и степень переохлаждения системы, однако приводит к существенному снижению степени превращения воды в гидрат. Растворы ПАА и ПЭГ незначительно смещают равновесные условия гидратообразования в область высоких температур, однако на кинетические характеристики гидратообразования эти полимеры влияют по-разному. Так, в пористой среде при гидратообразовании в растворах ПАА с концентрациями от 0,5 до 2 г/л снижается степень переохлаждения системы, значительно увеличиваются степень превращения воды в гидрат и скорость гидратообразования, что вкуче указывает на свойства кинетического промотора гидратообразования этого полимера. В растворах ПЭГ (20-50 г/л) наоборот, степень переохлаждения системы снижается, но степень превращения воды в гидрат и скорость гидратообразования уменьшаются. Поэтому, растворы ПЭГ можно отнести к кинетическим ингибиторам.

Таким образом, при гидратообразовании в системах «пористая среда – раствор полимера» раствор ПЭГ проявляет свойства кинетического ингибитора, раствор Na-КМЦ – термодинамического ингибитора, а раствор ПАА – кинетического промотора.

4. Благодарности

Работа выполнена в рамках бюджетного проекта № 122011100157-5 с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН и гранта №13.ЦКП.21.0016.

5. Литература

- [1] Буракова С. В. Проблемы освоения тонких нефтяных оторочек газоконденсатных залежей Восточной Сибири (на примере ботубинской залежи Чаяндинского НГКМ). С. В. Буракова, Д. В. Изюмченко, И. И. Минаков, и др. // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». – 2013. – № 5(16). – С. 124-133;
- [2] Муслимов, Р.Х. Пути повышения эффективности использования горизонтальных скважин для разработки нефтяных и нефтегазовых месторождений // Георесурсы. – 2016. – Т. 18. – № 3. – С. 146-153;
- [3] Вализада Б. А., Очередыко Т. Б. Применение горизонтальных скважин для повышения эффективности разработки месторождений на примере залежей 302-303 Ромашкинского месторождения // Отраслевые научные и прикладные исследования: Науки о земле. – 2017. – № 4. – С. 226-249;
- [4] Kalacheva L.P., Ivanova I.K., Portnyagin A.S. Equilibrium conditions of the natural gas hydrates formation in the pore space of dispersed rocks // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 666. – No. 4. P. 042062. – DOI:10.1088/1755-1315/666/4/042062;
- [5] Linga P., Daraboina N., Ripmeester J.A., Englezos P. Enhanced rate of gas hydrate formation in a fixed bed column filled with sand compared to a stirred vessel // Chemical Engineering Science. – 2012. – Vol. 68. – P. 617-623;
- [6] Tian Y., Li Y., An H., Ren J., Su J. Kinetics of methane hydrate formation in an aqueous solution with and without kinetic promoter (SDS) by spray reactor // Journal of Chemistry. – 2017. – Vol. 5208915. – 5 p. – DOI:10.1155/2017/5208915;
- [7] Истомина В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях – Москва: Недра, 1992. – 236 с.;
- [8] Чувиллин Е.М., Перлова Е.В., Махонина Н.А., Якушев В.С. Фазовые переходы воды в газонасыщенных грунтах // Геология и геофизика. – 2002. – Т. 43. – №7. –С. 685-693;
- [9] Манаков А. Ю., Пеньков Н. В., Родионова Т. В., Нестеров А.Н., Фесенко Е.Е. Кинетика процессов образования и диссоциации газовых гидратов // Успехи химии. – 2017. – Т. 86. – №9. – С. 845-869. DOI 10.1070/RCR4720.

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА МИКРОСТРОЕНИЕ ПРОМЕРЗАЮЩИХ ПОЧВ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

Татьяна Романис^{1,2}, Марина Лебедева²

1 ФГБУН «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН»,
677010, Россия, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36

2 ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт имени В.В. Докучаева»,
119017, Россия, г. Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 2

THE EFFECT OF TEMPERATURE CHANGES ON FREEZING SOILS MICROMORPHOLOGICAL FEATURES: THEORY AND PRACTICE

Tatiana Romanis^{1,2}, Marina Lebedeva²

1 Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36, Permafrost str., Yakutsk, 677010, Russia

2 Dokuchaev Soil Science Institute, Pyzhyovskiy lane 7 building 2, Moscow, 119017, Russia

Annotation. We have considered the theoretical aspects of diagnostic cryogenic micromorphological features. Despite the difference in temperature, humidity and material, the researchers described the same diagnostic micromorphological features. We decided to study the difference in the shape and composition of cryogenic signs in the soils of the thermal tract, which differ in the duration of stay in the frozen state. The soils of the hydrothermal zone, in comparison with long-freezing soils, have a specific set of micromorphological features - the coprolites of earthworms (*Eisenia nordenskioldi*) characteristic of "warm" soils, a high proportion of cracked sand grains - a sign of frequent phase transitions of water during freezing-thawing. Cryogenic microstructure and circular separation of sand particles, which identify soils under cryogenic influence, are diagnosed only in long-term freezing soils. Thus, despite the frequent freezing of soils, the main cryogenic signs of microstructure do not depend on the frequency of freezing-thawing and are formed under specific conditions of cryogenic exposure. These materials show that a detailed study of the microstructure of cryogenic soils, taking into account the freezing conditions and the profile of cryogenic textures formed in the frozen state, is promising for clarifying the diagnostic value of the micromorphological features.

1. Введение

Микроморфологические исследования строения горизонтов почв – это часть иерархического подхода для диагностики почвообразовательных процессов. К 90-м годам XX века фактического материала, констатирующего особенности микростроения почв, стало так много, что стало возможным описание микроморфотипов для почв разных природных зон [1]. В рамках данной работы мы рассмотрим теоретические аспекты диагностики особенностей микростроения почв, связанных с криогенным воздействием.

2. Основные результаты

Для промерзающих почв специфика изучения микростроения во многом свелась к тому, что исследователи диагностируют набор от тонкоплитчатой или линзовидной до ооидной агрегации. В России почвоведы скептически отнеслись к объяснению механизмов формирования микроструктур теми же криогенными механизмами, что и поверхностные формы, к примеру, сортированные каменные кольца, оставляя многие механизмы формирования особенностей криогенного микростроения почв под вопросом [2]. В зарубежной литературе развитие диагностических критериев влияния процессов промерзания-оттаивания на микростроение почв и отложений связано с работами Б. Ван Влиет-Ланое (Brigitte Van Vliet-Lanoë) [3]. Она понимает промерзание в почвах как низкотемпературное иссушение грунта с возникновением трещин усыхания/усадки в еще незамерзшем материале [3]. И в этом кроется

противоречие с процессами, происходящими в природе и объединяемыми под общим названием «криогенез». Криогенез объединяет все физические процессы, связанные как с изменениями температуры, так и с процессами льдовыделения при промерзании, и усадки при протаивании. То есть изменение в профиле почв структуры под действием криогенеза сильно зависит от водного режима, движения фронта промерзания, минерального состава материала, частоты фазовых переходов воды. А эти параметры сильно отличаются на всей территории, где были отмечены «криогенные эффекты в микростроении почв».

На настоящий момент времени для диагностики криогенеза общеприняты такие микроморфологические признаки как тонко- и микроплитчатая, мелкозернистая, ооидная структуры, сортировка материала внутри агрегатов (круговая организация песчаных зерен, ооиды – круглые агрегаты, по периметру покрытые кутаной из оптически ориентированной глины), специфически трещиноватые зерна песчаной размерности. Эти признаки наблюдаются в широком диапазоне условий промерзания в современных почвах и практически не зависят от аридности климата и длительности пребывания профиля почвы в мерзлом состоянии. Возникает справедливый вопрос: какое сочетание параметров криогенного воздействия формирует столь одинаковые признаки в разных типах почв и только ли они характеризуют пребывание почв в мерзлом состоянии? Легче всего это проверить в зонах гидротермальной активности, находящихся в высоких широтах.

Такой природной лабораторией стало термальное урочище Пым-Ва-Шор (67°09' с.ш., 60°51' в.д.), расположенное на территории Большеземельской тундры в зоне островного распространения мерзлых толщ. Урочище представляет собой лог, по склонам которого круглый год стекают 8 ручьев с температурой 27-29 °С, впадая на дне лога в ручей Пым-Ва-Ю. Зону отепляющего воздействия на почвы формируют лишь 4 источника из восьми. В зоне выхода гидротерм почвы на глубине корнеобитаемого слоя (глубина 0.2 м) промерзают на две недели, в то время как корнеобитаемый слой почв прилегающей территории находится в мерзлом состоянии в течении 7 месяцев.

Для основных разрезов прогретых и длительно промерзающих почв почвообразующая порода – переотложенные делювиально-солифлюкционными процессами флювиогляциальные песчаные отложения с включениями девонских известняков из подстилающих пород. Изучено микростроение двух разрезов, испытывающих тепловое воздействие гидротерм (1-2013 – серогумусовая глинисто-иллювирированная глееватая остаточно-карбонатная и 2-2013 – глеезем перегнойный остаточно-карбонатный). На участке с зональными климатическими параметрами изучено два разреза: 6-2013 и в долине урочища – 8-2013. 6-2013 отличается от 8-2013 подстиланием известняками на глубине 30 см, почвообразование идет в перекрывающем их мелкоземе. В этих разрезах диагностирован тип почвы подбур оподзоленный иллювиально-железистый, несмотря на различия в гранулометрическом составе и глубине подстилания карбонатными породами.

Сравнительный анализ особенностей микростроения почв выделил ряд общих и специфических микроморфологических свойств. Основные различия в органогенных горизонтах связаны с характером органического вещества – разным соотношением слаборазложенных, углефицированных тканей и мелких сильно разложенных растительных остатков со следами их биогенной переработки. Высокое биогенное оструктурирование червями отмечено для разреза 1-2013 (наиболее сухом в зоне современного гидротермального воздействия), в котором органическое вещество представлено микродисперсным гумусом, тесно связанным с глиной. В разрезе 2-2013 характерны все признаки почвенного гидроморфизма - преобладание слаборазложенных и углефицированных тканей и микропризнаки современной активной подвижности железа - зоны обезжелезнения чередуются с железистыми новообразованиями (стяжениями, кольцами, ореолами). В свою очередь, органогенные горизонты промерхающих в течении 7 месяцев почв (разрезы 8-2013 и 6-2013) характеризуются широким разнообразием растительных остатков - от свежих до углефицированных, характерны микропризнаки переработки растительных тканей клещами. Оструктурирование минерального материала

срединных горизонтов в разрезах 6-2013 и 8-2013 происходит преимущественно за счет криогенного воздействия с формированием ооидов, линзовидной структуры, плитчатой структуры. На фоне криогенного оструктурирования доля трещиноватых песчаных зерен в составе крупных фракций ниже, чем в почвах под термальным влиянием.

3. Выводы

Почвы гидротермальной зоны по сравнению с длительно промерзающими почвами имеют специфический набор микропризнаков – характерные для «теплых» почв копролиты дождевых червей (*Eisenia nordenskioldi*), высокую долю трещиноватых песчаных зерен в составе крупных фракций – признак частых фазовых переходов воды при промерзании-оттаивании. При этом криогенное оструктурирование и круговая сепарация песчаных частиц, по которым выявляют почвы, находящиеся под криогенным воздействием, диагностированы лишь в длительно промерзающих почвах. Таким образом, формирование основных криогенных микроструктур в профиле почв не зависит от частоты промерзания-оттаивания, но формируются при длительно промерзании почвенного профиля. Эти материалы показывают, что детальное изучение микростроения криогенных почв с учетом условий промерзания и формирующихся в мерзлом состоянии профиля криогенных текстур перспективно для уточнения диагностического значения признаков микростроения.

4. Литература

- [1] Gerasimova M.I., Gubin S.V., Shoba S.V. Micromorphology of soils in natural zones of the USSR. – Pushchino: Pushchino Center of the Russian Academy of Sciences, 1992. – 212 p. (translate in English)
- [2] Kosheleva I.T. Micromorphology of tundra soils as a possible indicator of their genesis // Izv. Academy of Sciences of the USSR. Ser. Geography. – 1958. – No. 3. – P. 25-30.
- [3] Stoops G., Marcelino V., Mees F. (ed.). Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths. // Elsevier. – 2018. – 1002 p.

**РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ ГИДРОХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ОЗЕР
г. ЯКУТСК**

Алена Руфова

ГБУ «Академия наук РС (Я)», пр. Ленина, 33, г. Якутск, 677007, Россия

**RETROSPECTIVE ANALYSIS OF THE HYDROCHEMICAL COMPOSITION OF
THE YAKUTSK**

Alena Rufova

Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, 33 Lenin Ave., 677007, Russia

Annotation. A retrospective analysis of the hydrochemical conditions of the largest lakes in Yakutsk (Beloe, Khatyng-Yuryakh, Ytyk-Kuel, Sergelyakh, Saysary) was carried out in accordance with a registered database covering the period from 1985 to 2021. The studied lakes are mainly sodium bicarbonate with increased mineralization and moderately hard water. The main contribution to the total volume of cations is made by Na^+ and Ca^{2+} , HCO_3^- and Cl^- anions. They also demonstrate a decrease in mineralization with a low value of approximation reliability. The variation of water hardness values directly depends on the content of Ca^{2+} and Mg^{2+} cations and hydrocarbonates. The average value of suspended materials is significantly higher than the existing Maximum Concentration Limit (MCL), the change in their content in each lake is individual, the highest was found in Beloe, Saysary and Khatyng-Yuryah lakes. Mineralization and hardness of water are the most significant factors in the formation of the hydrochemical conditions. The established mechanisms are characteristic of the whole sample, which reflects the nature of formation of the hydrochemical conditions of urban lakes. The trace element composition is characterized by an increase in Zn and Cu concentrations.

1. Введение

Во всем мире, особенно в развивающихся странах, из-за урбанизации, роста населения и промышленного развития огромное экологическое давление оказывается на водную среду озер, что приводит к ее загрязнению и ухудшению экологических функций. Эти процессы с развитием техногенного воздействия закономерно ухудшают качество городских озерных экосистем и на территории столицы одного из самых крупных регионов РФ – г. Якутска, где городские озера подвергаются сильному заилению, зарастанию и обмелению, что вызывает необходимость организации постоянного мониторинга за качеством гидрохимического состава озерных экосистем [1-6]. При этом их исследование и изучение необходимо основывать на последовательном ретроспективном анализе различных данных – морфометрических, литологических, гидрохимических, гидробиологических и т.д.

Целью работы является изучение временных вариаций гидрохимического состава и оценка качества озерных вод г. Якутск. Актуальность решения поставленной задачи обусловлена, с одной стороны, экологическими проблемами городских водных ресурсов, с другой – вопросами социально-экономического развития города.

2. Методика исследования и фактический материал

Объектом исследования послужили озера, расположенные в пределах селитебной территории города Якутск – 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.

Гидрохимический материал является результатом компиляции опубликованных, фондовых и авторских материалов, охватывающих период с 1985 по 2021 гг. Проведена интеграция данных всех организаций, проводивших исследования городских озерных вод и сопоставимых по

методам химического анализа. В общую выборку вошли данные по 786 пробам и 3252 элемент/определениям. Из общей выборки 32% – это непосредственно авторские данные. Гидрохимическое опробование проведено с 2009 по 2021 гг. в летний период времени с мая по сентябрь с отбором проб раз в месяц в первую его декаду. Всего отобрано и проанализировано 250 проб поверхностных озерных вод.

Химико-аналитические работы проводились в лабораториях НИИПЭС СВФУ им. М.К. Аммосова и ИГАБМ СО РАН. Используются общепринятые методы исследования поверхностных природных вод на основании утвержденных ГОСТов с определением основных показателей химического состава воды. Анализ контрольных проб проведен в Центральной геологической лаборатории АО «Якутскгеология». Оценка состояния водоемов по гидрохимическому составу проведена с использованием классификации О.А. Алекина.

Схемы, диаграммы, графики сделаны в программе MS Excel. Описательная статистика выполнена в программе Statistica 10.

3. Результаты исследований

Озера города Якутск характеризуются преимущественно гидрокарбонатно-натриевым составом, повышенной минерализацией и умеренно-жесткой водой (таблица 1).

Таблица 1 – Усредненная характеристика интегральных показателей и органического загрязнения озерных вод г. Якутск.

| Показатель, ед. Изм. | Количество проб, n | Белое, n=112 | Хатынг-Юрях n=148 | Ытык-Кюель n=121 | Сергелях n=256 | Сайсары n=149 | Среднее геометрическое | ПДКкб |
|--|--------------------|--------------|-------------------|------------------|----------------|---------------|------------------------|-------|
| pH | 651 | 8,37 | 7,93 | 7,84 | 8,08 | 8,34 | 8,11 | - |
| Жесткость, мг-экв/л | 786 | 4,30 | 4,13 | 3,58 | 3,27 | 4,04 | 3,84 | 7,00 |
| Минерализация, мг/дм ³ | 786 | 527,10 | 428,12 | 368,93 | 308,95 | 478,74 | 415,03 | 1000 |
| Взвешенные вещества, мг/ дм ³ | 69 | 14,39 | 7,27 | 14,65 | 6,41 | 6,06 | 8,23 | 0,75 |
| Нефтепродукты, мг/ дм ³ | 548 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,01 | 0,03 | 0,02 | 0,30 |
| Фенолы, мг/ дм ³ | 518 | 0,0006 | 0,0008 | нпо | нпо | 0,0008 | 0,0007 | 0,001 |
| АПАВ, мг/ дм ³ | 518 | 0,002 | 0,002 | нпо | 0,001 | 0,003 | 0,002 | 0,500 |

В целом для озерных вод суммарный объем катионов составляет 128,41 мг/дм³, основной вклад вносит Na⁺, Ca²⁺ и Mg²⁺ (таблица 2). Сумма анионов составляет 328,30 мг/дм³ с доминированием HCO₃⁻ и Cl⁻. Колебания гидрохимических показателей, в том числе HCO₃⁻ и Cl⁻ в значительной степени связаны с проточностью городских озер.

Озера подпитывались через малые реки, такие как Шестаковка и Мархинка, от основной водной артерии – реки Лена. Обычно в речной воде содержание HCO₃⁻ и Cl⁻ бывает в разы больше, чем у озерной [7]. И в годы, когда осуществлялось зарегулирование большого и малого кольца городских озер, их пополнение за счет речного стока вносило существенное изменение в гидрохимический состав озерных вод. Ретроспективный анализ показал, что с середины 90-х гг. XX в. в озерах Якутска отмечается уменьшение содержания основных катионов и анионов в воде, что, соответственно, приводит к снижению суммы минеральных веществ.

За весь период наблюдений прослеживается тенденция снижения минерализации озерных вод с невысокой величиной достоверности аппроксимации, что не вполне закономерно при увеличивающемся антропогенном прессе на озерные экосистемы в пределах селитебной территории. В отдельные годы отмечаются пики с максимальным значением - 1987 и 2004 гг. – 820,03 и 770,87 мг/дм³ соответственно. Повышение минерализации в эти годы происходит за счет ее увеличения в водах озер Сайсары (1467,11 мг/дм³) и Ытык-Кюель (1295,00 мг/дм³). Вместе с тем, выявлены участки прослеживаемой слабой закономерностью, где минерализация

воды уменьшается при увеличении температуры воздуха в теплый период времени с невысокой величиной аппроксимации $R^2=0,3-0,4$ (рисунок 1).

Таблица 2 – Усредненная характеристика катионно-анионного состава озерных вод г. Якутск.

| Показатель, ед. изм. | Количество проб, n | Белое, n=112 | Хатынг-Юрях, n=148 | Ытык-Кюель, n=121 | Сергелях, n=256 | Сайсары, n=149 | Среднее геометрическое | ПДКкб |
|-----------------------------------|--------------------|--------------|--------------------|-------------------|-----------------|----------------|------------------------|-------|
| Ca^{2+} , мг/ дм ³ | 786 | 26,54 | 32,58 | 28,57 | 25,44 | 27,43 | 28,01 | 40 |
| Mg^{2+} , мг/ дм ³ | 786 | 33,00 | 25,38 | 20,84 | 21,21 | 30,30 | 25,70 | 50,0 |
| Na^+ , мг/ дм ³ | 786 | 99,56 | 72,43 | 49,68 | 47,42 | 77,61 | 66,68 | 200 |
| K^+ , мг/ дм ³ | 786 | 11,59 | 8,55 | 4,77 | 5,84 | 6,51 | 7,09 | - |
| NH_4^+ , мг/ дм ³ | 786 | 0,98 | 0,76 | 0,44 | 0,35 | 0,63 | 0,59 | 1,50 |
| Ba^{2+} , мг/ дм ³ | 303 | 0,02 | 0,03 | 0,23 | 0,02 | 0,002 | 0,02 | 0,7 |
| Sr^{2+} , мг/ дм ³ | 651 | 0,17 | 0,20 | 0,20 | 0,15 | 0,26 | 0,19 | 7 |
| Li^+ , мг/ дм ³ | 283 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | нпо | 0,02 | 0,03 |
| HCO_3^- , мг/ дм ³ | 786 | 260,37 | 264,80 | 272,79 | 203,33 | 262,25 | 251,33 | - |
| Cl^- , мг/ дм ³ | 786 | 85,69 | 76,71 | 30,62 | 32,26 | 83,82 | 55,87 | 350 |
| NO_2^- , мг/ дм ³ | 786 | 0,23 | 0,04 | 0,04 | 0,03 | 0,13 | 0,07 | 3,3 |
| SO_4^{2-} , мг/ дм ³ | 786 | 29,49 | 19,59 | 16,88 | 14,07 | 21,11 | 19,61 | 500 |
| NO_3^- , мг/ дм ³ | 786 | 0,97 | 0,21 | 1,56 | 0,13 | 1,16 | 0,54 | 45,0 |
| PO_4^{3-} , мг/ дм ³ | 786 | 0,78 | 0,49 | 0,75 | 0,33 | 0,44 | 0,53 | 3,50 |
| F^- , мг/ дм ³ | 651 | 0,40 | 0,31 | 0,51 | 0,25 | 0,31 | 0,35 | 1,50 |

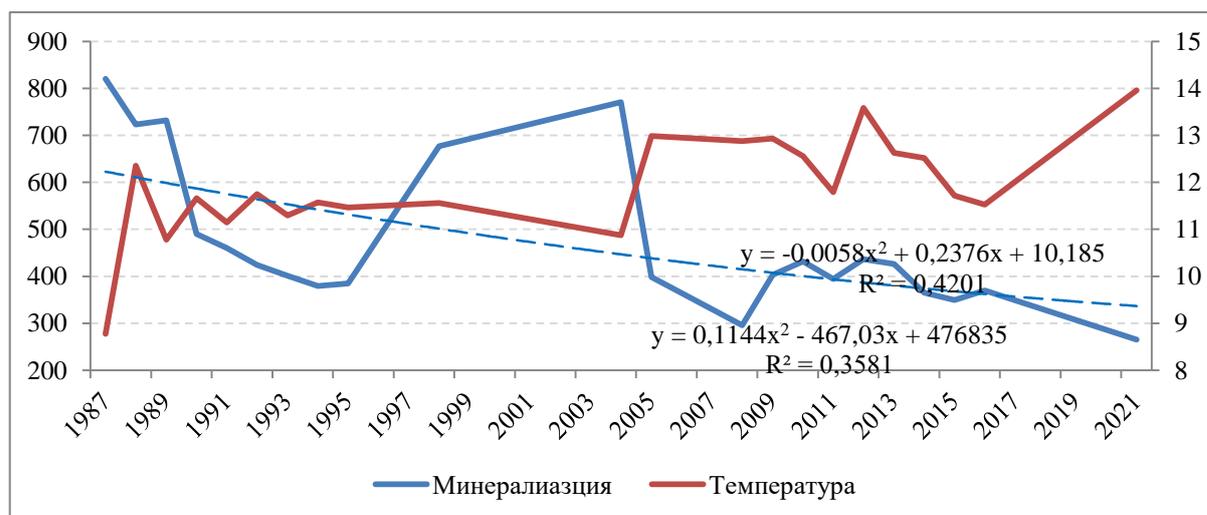


Рисунок 1 – Многолетняя динамика изменения показателей минерализации и температуры воздуха в озерных водах г. Якутск, мг/дм³.

Отмечено четыре временных отрезка 3-5 летним периодом – это с 1990 по 1995 гг., с 1999 по 2004 гг., 2006 по 2009 гг. и 2016 по 2021 гг.

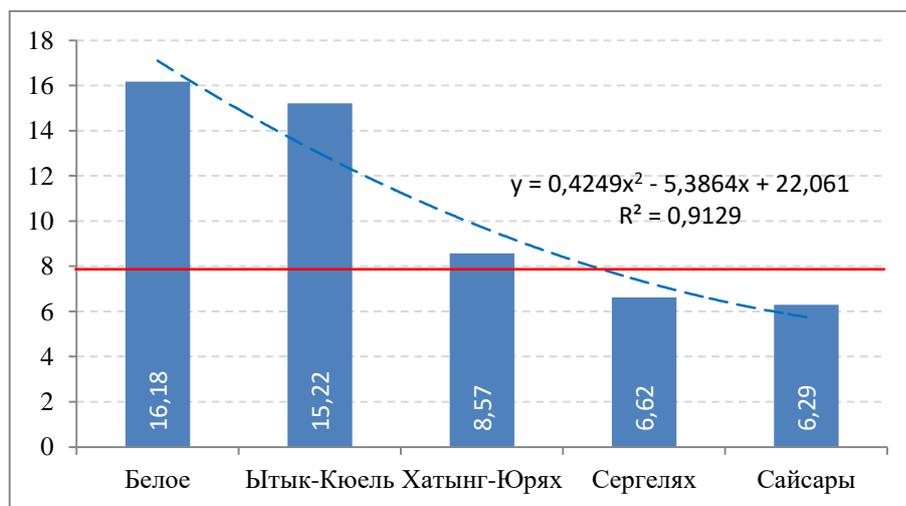
Реакция водной среды (рН) исследуемых озер в основном слабощелочная. Максимальное увеличение щелочности озерных вод наблюдалось в 2002 и 2003 г. в это время средняя величина рН достигала 8,7 и 8,8. Повышение рН, возможно, связано с небольшим количеством атмосферных осадков в предыдущие годы (180-190 мм в 2001 и 2002 гг.) и, соответственно, с малым поступлением ионов водорода [2].

Выявлена относительно слабая зависимость минерализации от рН, описанная при помощи робастной регрессии. Повышенная минерализация воды в озерах в отдельные периоды исследования могла способствовать большому разбросу данных [8]. Тем не менее, несмотря на

существование экстремальных значений минерализации, группируемых по pH ближе к нейтральной (6,9 – 7,7) и слабощелочной (7,9 – 8,7), основная выборка подчиняется законам линейного распределения [9] и характеризует озерные воды Якутска как среднеминерализованные и слабощелочные.

По величине общей жесткости воды озера являются умеренно жесткими с вариациями значений от 2,48 до 5,79 мг-экв/дм³. Резкие колебания отмечаются в конце 80-х гг. и в середине 2000-х гг., в остальное время показатель колеблется достаточно в узком диапазоне, достоверность подтверждается относительно не высокой величиной аппроксимации ($R^2=0,6$). Озерная вода обычно имеет меньшую жесткость, чем речная, поскольку она разбавляется в значительной степени атмосферными осадками и талыми водами, которые, как правило, бывают более мягкими [7, 10]. Общеизвестно, что вариация значений жесткости воды напрямую зависят от содержания основных катионов, в частности Ca^{2+} , Mg^{2+} , а также гидрокарбонатов. Наибольшее влияние на уровень жесткости озерных вод оказывает количество катионов Ca^{2+} , несколько в меньшей степени – Mg^{2+} . Анионы HCO_3^- также оказывают влияние на жесткость воды, однако их вклад значительно меньше.

Взвешенные вещества – это один из уникальных интегральных показателей состояния поверхностных вод, которые находятся в воде в твёрдом состоянии и включают в себя глиняные частички, песок, ил, суспендированные частицы, имеющие органическое и неорганическое происхождение. Оценка состояния взвешенных веществ в озерах г. Якутска приведена на основании анализа изменений содержания взвешенных веществ за теплый период времени (рисунок 2). На вариации содержания взвешенных веществ влияют различные факторы: смена сезонов года, поступление сточных вод с поверхности, таяние снега, запыленность территории.



Условные обозначения:

— - среднее содержание взвешенных веществ в озерных водах г. Якутск

Рисунок 2 – Динамика содержания взвешенных веществ в воде озер г. Якутск за теплый период времени, мг/дм³.

Среднее геометрическое значение содержания взвешенных веществ, которое можно принять за условно фоновое, равно 8,23 мг/дм³, что значительно выше существующих ПДК для водных объектов культурно-бытового назначения. Согласно СанПиН в водных объектах рыбохозяйственного значения при содержании в межень более 30 мг/дм³ природных взвешенных веществ допускается увеличение содержания их в воде в пределах 5%. Наиболее высокое содержание взвешенных веществ обнаружено в озерах Белое, Сайсары и Хатынг-Юрях.

Изменения содержания взвешенных веществ в каждом озере носит индивидуальный характер, но ни в одном водоеме колебания значений не носили линейный характер. Это значит, что

нарушены природные закономерности, когда, например, относительно высокие содержания взвешенных веществ фиксируются в период весенне-летнего и осеннего половодья, а далее наблюдается закономерный спад.

Посредством анализа данных на основе ковариационной матрицы произошло сокращение числа переменных, описываемых гидрохимический состав озерных вод, из 25 до 13, среди которых проведена классификация взаимосвязей на основе величины коэффициентов переменных. Ведущими факторами являются жесткость и минерализация, основные катионы (Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+) и анионы (SO_4^{2-} и Cl^-). В качестве подчиненного фактора выступают взвешенные вещества и ион F^- .

Основным результативным признаком при учете вариаций гидрохимического состава озерных вод является основные ионы в следующей последовательности: Na^+ , NH_4^+ , SO_4^{2-} , Mg^+ , Cl^- и K^+ . Значимая доля в факторном анализе принадлежит минерализации и жесткости воды. Установленные закономерности характерны в целом для всей выборки, что отражает специфику формирования гидрохимического режима городских озер. Остальные можно отнести в группу случайных факторов.

Анализ микроэлементного состава озерных вод выявил наличие водорастворимых форм Ni , Mn , Co , Cr , Zn , Cu , $Fe_{общ}$ и Mo (таблица 3).

В отдельные годы наблюдаются снижение содержания некоторых микроэлементов. За все время наблюдений As и Hg в озерных водах не зафиксировано. При рассмотрении микроэлементов, как факторов загрязнения озерных вод, фиксируются повышенные концентрации $Fe-Cr-Cu-Mo-Zn$. Распределение их носит не равномерный характер, подчеркивающий индивидуальность каждого рассматриваемого озера. Но даже по анализу средних значений проявляется отражение природных факторов в формировании микроэлементного состава озерных вод – доминирование элементов группы железа, а также меди и цинка, привносимые в озера с почвенным материалом или пылью.

Таблица 3 – Усредненная характеристика микроэлементного состава озерных вод г. Якутск.

| Показатель, ед. изм. | Количество проб, n | Белое, n=112 | Хатынг-Юрях, n=148 | Ытык-Кюель, n=121 | Сергелях, n=256 | Сайсары, n=149 | Среднее геометрическое | ПДК _{кб} |
|---------------------------------|--------------------|--------------|--------------------|-------------------|-----------------|----------------|------------------------|-------------------|
| $Fe_{общ}$, мг/дм ³ | 483 | 0,34 | 0,27 | 0,81 | 0,27 | 0,39 | 0,38 | 0,30 |
| Pb , мг/дм ³ | 283 | 0,004 | нпо | 0,02 | 0,01 | 0,004 | 0,007 | 0,01 |
| Ni , мг/дм ³ | 283 | нпо | 0,003 | нпо | нпо | нпо | 0,003 | 0,02 |
| Mn , мг/дм ³ | 283 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,1 |
| Co , мг/дм ³ | 283 | нпо | нпо | нпо | 0,0005 | 0,0008 | 0,0006 | 0,100 |
| Cr , мг/дм ³ | 313 | 0,001 | 0,0005 | 0,0004 | 0,0003 | 0,0004 | 0,0005 | 0,5 |
| Cu , мг/дм ³ | 313 | 0,001 | 0,002 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 1,000 |
| Zn , мг/дм ³ | 283 | 0,08 | 0,04 | 0,04 | 0,02 | 0,12 | 0,07 | 1,00 |
| As , мг/дм ³ | 283 | нпо | нпо | нпо | нпо | нпо | нпо | 0,01 |
| Hg , мг/дм ³ | 68 | нпо | нпо | нпо | нпо | нпо | нпо | 0,0005 |
| Mo , мг/дм ³ | 353 | 0,0007 | 0,0005 | 0,0005 | 0,0002 | 0,0004 | 0,0004 | 0,250 |

Примечание: нпо – ниже предела обнаружения анализа.

4. Заключение

Гидрохимический режим городских озер Якутска формируется под влиянием природных факторов, вместе с тем увеличение антропогенного воздействия привносит свои изменения в химический состав поверхностных вод. Основными загрязнителями, осложняющими эколого-геохимическое состояние озерных вод Якутска, являются взвешенные вещества, $Fe_{общ}$ и Pb . С 2014 года фиксируется загрязнение озерных вод, характеризующееся аномально высокими содержаниями взвешенных веществ (превышение ПДК_{кб} от 8 до 20), что соответствует

сильному загрязнению. Легкая степень загрязнения по $Fe_{\text{общ}}$ отмечается на озерах Ытык-Кюель, Белое и Сайсары. Такая же степень загрязнения по Pb наблюдается на озере Ытык-Кюель. Остальные водоемы – Хатынг-Юрях и Сайсары на данный момент, можно отнести к незагрязненным.

Приведенные примеры показывают, что ретроспективный анализ имеющихся результатов наблюдений озерных вод позволяет установить тенденции изменения качества воды. Дальнейший мониторинг поспособствует более точной оценке тенденций изменения качества воды, роли различных факторов и выполнить прогноз на ближайшую перспективу.

5. Литература

- [1] Anthropogenic dynamics of the natural environment of the areas of urban settlements in Central Yakutia (on the example of the city of Yakutsk) (1985-1989): research report (concluding). Yakut scientific center SB AS USSR; hands Kirillin A.D.: performer. Savvinov D.D. – Yakutsk, 1989 – 151 p. – No. GR 01.86.0104387. – Inv. No. 02.9.10013384.
- [2] Makarov V.N., Sedelnikova A.L. Ecogeochemistry of urban lakes of Yakutsk. – Yakutsk: IMZ, 2016. – 207 p.
- [3] Ecological and limnological certification of lakes within the city of Yakutsk (1990-1995): research report (concluding). YGU; hands Zhirkov I.I. – Yakutsk, 1995. – 131 p. – No. GR 01.90.004831.
- [4] Transformation of the ecosystem in the process of urbanization of permafrost spread events (2009-2013): research report (final). NEFU; supervisor: Savvinov D.D. – Yakutsk, 2013. – 98 p.
- [5] Y.B. Legostaeva, A.A. Rufova. Analysis of the hydrochemical conditions of the largest lakes of Yakutsk // Arctic and subarctic natural resources. – 2022. – Vol. 4. – P. 572-591.
- [6] Gabyshev V.A., Gabysheva O.I. On the study of the influence of heavy metals on the development of phytoplankton in the lakes of Yakutsk and its environs // Natural resources of the Arctic and Subarctic. – 2020. – 25(4). – P. 81-91.
- [7] Chistyakov G.E. Water resources of the rivers of Yakutia. – M: Science, 1964. – 256 p.
- [8] Mackin J. W. Robust analysis of linear models. Statistical Science. – 2004. – 9(4). P. 562-570.
- [9] Strutz, T. Data Fitting and Uncertainty A practical introduction to weighted least Squares and Beyond. – Lipsia: Springer. – 2016. – 2.
- [10] Rivers and lakes of Yakutia. Rep. ed. V.I. Ageev. – Yakutsk: Bichik, 2007. – 136 p.

**ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ПОЧВ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕР
ГОРОДА ЯКУТСКА**

Наталья Сивцева

ГБУ «Академия наук РС (Я)», пр. Ленина, 33, г. Якутск, 677007, Россия

**ELEMENTAL COMPOSITION OF SOILS AND BOTTOM SEDIMENTS OF LAKES OF
YAKUTSK CITY**

Natalya Sivtceva

Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, 33 Lenin Ave., 677007, Russia

Annotation. The distribution of macro- and microelements in the main urbanized environments of the city of Yakutsk was studied, using the example of 5 lakes. The concentrations of 35 chemical elements in coastal soils and bottom sediments were determined using atomic absorption spectrometry and induction coupled plasma mass spectrometry. It has been established that the values of the concentrations of heavy and toxic metals in the studied samples of bottom sediments are close to the background levels, and the levels of the total indicator of soil pollution are classified as hazardous. A high degree of relationship between the concentrations of elements in the soil and in bottom sediments was found.

1. Введение

Почвенный покров представляет собой важнейшую часть водосборной территории, влияющую на формирование качества воды водных объектов, а также состав их донных отложений [1]. Последние, являясь аккумуляторами различных органических и неорганических соединений, служат источником вторичного загрязнения ими водных масс, а также фактором накопления токсических веществ, включая тяжелые металлы, в гидробионтах [2; 3]. Геохимический состав отложений находится в прямой зависимости от концентрации металлов в почвах бассейна [4]. В процессе миграции металлов в системе водосбор-озеро происходят изменения химических форм их нахождения, наблюдается аккумуляция отдельных элементов на геохимических барьерах в зависимости от обстановок миграции [5; 6]. В условиях антропогенной нагрузки на водосбор аномалии тяжелых металлов в почвах сопровождаются депонированием их в донных отложениях водоемов, находящихся с ними в геохимическом сопряжении [7].

Цель работы – изучение распределения макро- и микроэлементов в основных урбанизированных средах города Якутска, на примере 5 озер.

2. Материал и методы исследования

Произведен отбор образцов почв, и донных отложений из пяти озер города Якутска – Белое, Сергелях, Сайсары, Ытык-Кюель и Хатын-Юрях. Всего было отобрано 5 проб почв и 10 проб донных отложений. В отобранных пробах определены физико-химические свойства и микроэлементный состав общепринятыми в почвоведении методами. Анализ микроэлементного состава установлен с помощью атомной абсорбционной спектроскопии (ААС) и масс-спектрометрии с индукционно связанной плазмой (ИСП-МС). Для характеристики перераспределения элементов по геохимическому сопряжению рассчитан коэффициент латеральной дифференциации (коэффициент местной миграции) химических элементов. Он рассчитывается как отношение среднего содержания валовой формы элемента в донных отложениях к его среднему содержанию в почвах.

3. Результаты исследований

В работе приводятся результаты изучения распределения физико-химических свойств и содержания макро- и микроэлементов (Cd, Pb, Co, Cu, Ni, Zn, Cr, Mn, Fe) в почвах и донных отложениях озер г. Якутска, расположенных на территории города. Почвы и донные отложения

озер характеризуются сходным гранулометрическим составом, в основном имеют супесчаный характер. Реакция среды водной вытяжки почв характеризовалась слабощелочной и щелочной рН ($pH_{\text{сред.}}=7,4$), в донных осадках реакция среды более кислая и имеет нейтральную и слабощелочную реакцию ($pH_{\text{сред.}}=6,9$). Накопление органического вещества в озерных отложениях обычно коррелирует с содержанием гумуса в почвах водоразделов, поскольку значительная его часть поступает в водоемы аллохтонным путем в результате эрозионного смыва верхних органогенных горизонтов. В эвтрофированных озерах, отличающихся повышенной биологической продуктивностью, довольно весомый вклад в накопление органического углерода вносят фитопланктон и высшая водная растительность. Накопление органического вещества в исследуемых объектах варьирует в широком диапазоне концентраций от 0,05-14,03%, но имеют общую тенденцию по озерам (Таблица 1).

Таблица 1 – Средние значения физико-химических свойств почв и донных отложений

| | рН | | Сорг,% | | Фосфор, мг/кг | | сумма анионов | |
|---------------|-------|-------|--------|-------|---------------|--------|---------------|-------|
| | почва | донка | почва | донка | почва | донка | почва | донка |
| Оз.Белое | 7,7 | 7,1 | 0,05 | 0,22 | 86,5 | 126,5 | 1,22 | 1,31 |
| Оз.Сергелях | 7,1 | 6,9 | 7,34 | 14,03 | 117,75 | 18,5 | 3,74 | 12,37 |
| Оз.Сайсар | 7,0 | 6,6 | 2,23 | 3,15 | 435,61 | 317,71 | 1,84 | 4,05 |
| Оз.Ытык-Кюель | 8,1 | 6,8 | 3,41 | 2,14 | 191,75 | 99,5 | 3,48 | 1,49 |
| Оз.Хатын-Юрях | 7,4 | 7,3 | 1,4 | 1,05 | 261,84 | 128,5 | 2,99 | 0,59 |

Содержание органического вещества в почвах достигает максимум на озере Сергелях 7,3% и на Белом озере 0,5%, среднегеометрическое достигает 1,3%. В донных осадках озер содержание органического вещества в среднем достигает 1,85% с максимумом на озере Сергелях 14% и минимум на Белом озере – 0,2% что объясняется характером почвенного материала.

Содержание фосфора в почвах варьирует от 86,5 мг/кг на Белом озере, до 435,6 мг/кг в озере Сайсары, в среднем достигает 186 мг/кг, что характеризуется как высокое содержание. В донных отложениях среднее содержание подвижного фосфора – повышенное и достигает 99 мг/кг. Максимальные содержания фосфора в донных отложениях озера Сайсары (317,7 мг/кг) и минимум (18,5 мг/кг) в озере Сергелях. Характер распределения фосфора по озерам в почвах и донных отложениях идентично, за исключением озера Белое, где фосфор в донных отложениях выше, чем в почвах.

Анализ водной вытяжки выявил неравномерный характер растворимых солей в почвах и донных отложениях. Так, в почвах преобладает хлоридное и хлоридно-сульфатное засоление, а в донных отложениях – сульфатное и сульфатно-хлоридное.

Расчет суммы токсичных солей (СТС) выявил неравномерное распределение по точкам исследования (Рисунок 1). Причём среднее содержание СТС в почвах достигает 0,11%, максимальные содержания СТС наблюдаются на озерах Ытык-Кюель и Сергелях достигая 0,26% и 0,22% соответственно.

В донных отложениях СТС в среднем достигает 0,09% с максимумом содержания в озерах Сергелях и Сайсары по 0,45% и 0,24% соответственно.

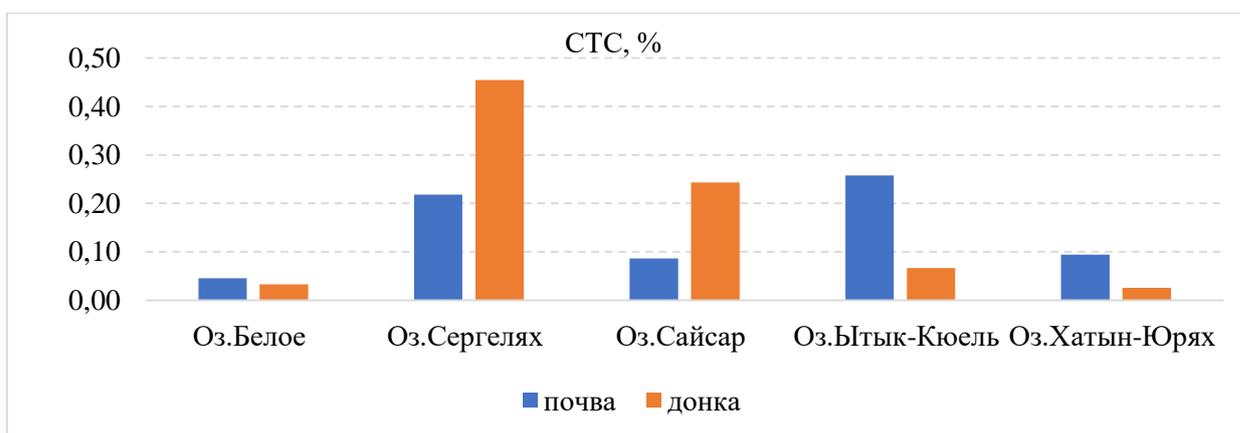


Рисунок 1 – Распределение суммы токсичных солей по точкам наблюдения.

Определение основных оксидов установил следующий ряд накопления: $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{CaO} > \text{K}_2\text{O} > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{Na}_2\text{O} > \text{MgO} > \text{TiO}_2 > \text{P}_2\text{O}_5 > \text{MnO}$. Всего было определено 10 оксидов, представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Содержание элементов в моль/100 г почвы

| | | Si | Al | Ti | Fe | Mn | Ca | Mg | Na | K | P |
|-------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| почвы | Оз.Белое | 0,595 | 0,240 | 0,003 | 0,028 | 0,001 | 0,057 | 0,020 | 0,056 | 0,056 | 0,001 |
| | Оз.Сергелях | 0,837 | 0,209 | 0,004 | 0,035 | 0,001 | 0,089 | 0,023 | 0,054 | 0,048 | 0,003 |
| | Оз.Сайсар | 0,582 | 0,251 | 0,004 | 0,027 | 0,001 | 0,063 | 0,016 | 0,059 | 0,060 | 0,002 |
| | Оз.Ытык-Кюель | 0,643 | 0,241 | 0,003 | 0,029 | 0,001 | 0,062 | 0,021 | 0,061 | 0,056 | 0,001 |
| | Оз.Хатын-Юрях | 0,624 | 0,247 | 0,004 | 0,032 | 0,001 | 0,067 | 0,022 | 0,060 | 0,058 | 0,001 |
| донка | Оз.Белое | 1,017 | 0,236 | 0,004 | 0,030 | 0,001 | 0,056 | 0,019 | 0,061 | 0,054 | 0,001 |
| | Оз.Сергелях | 0,751 | 0,218 | 0,004 | 0,066 | 0,001 | 0,092 | 0,026 | 0,051 | 0,044 | 0,003 |
| | Оз.Сайсар | 0,749 | 0,249 | 0,002 | 0,022 | 0,000 | 0,050 | 0,014 | 0,066 | 0,061 | 0,001 |
| | Оз.Ытык-Кюель | 0,562 | 0,253 | 0,002 | 0,014 | 0,000 | 0,041 | 0,011 | 0,070 | 0,063 | 0,000 |
| | Оз.Хатын-Юрях | 0,497 | 0,257 | 0,003 | 0,025 | 0,001 | 0,054 | 0,018 | 0,067 | 0,062 | 0,001 |

Валовые формы 25 микроэлементов были определены на масс-спектрометре с индукционно связанной плазмой, расчет содержания некоторых элементов в мг/кг представлен в таблице №3. Обнаружены небольшие различия содержания валовых форм Co, Cr и Cu в донных отложениях по сравнению с почвами. В почвенных пробах содержание кобальта в 2 раза выше, чем в донных отложениях, по остальным элементам существенных различий по содержанию не установлено, что свидетельствует об интенсивном выносе из почв и аккумуляции в донных отложениях изученных элементов, кроме вышеуказанных. Содержание большинства исследуемых металлов в почвах и донных отложениях озер не превышает установленных региональных фоновых нормативов.

Таблица 3 – Содержание элементов в мг/кг (валовые формы)

| | | Ba | Co | Cr | Cu | Ga | La | Nb | Sc | Sr | V | Y | Zn | Zr |
|-------|---------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|-------|
| почвы | Оз.Белое | 895 | 5,1 | 49,6 | 19,1 | 11,7 | 24,2 | 4,6 | 8,8 | 422,7 | 36,8 | 16,5 | 64,8 | 113,9 |
| | Оз.Сергелях | 758,6 | 7,5 | 55,9 | 29,9 | 8,3 | 27,4 | 5,8 | 8,6 | 396,6 | 41,8 | 20,7 | 107 | 96,6 |
| | Оз.Сайсар | 873,2 | 7,8 | 49,3 | 26,5 | 3,7 | 35,3 | 4,4 | 8,5 | 368,1 | 39,7 | 17,8 | 91 | 118,7 |
| | Оз.Ытык-Кюель | 868,8 | 7,6 | 52,2 | 18,4 | 5 | 41,8 | 9,4 | 8,5 | 400,4 | 39,2 | 18 | 82,7 | 103,7 |
| | Оз.Хатын-Юрях | 843,9 | 10,5 | 54,3 | 26 | 9 | 36,9 | 8,7 | 9 | 385,5 | 44,2 | 19 | 75,1 | 96,1 |
| донка | Оз.Белое | 858,4 | 6,4 | 46 | 12,5 | 13,9 | 30,1 | 9,6 | 9 | 409,1 | 38,8 | 19,7 | 57,1 | 75,8 |
| | Оз.Сергелях | 662,1 | 17,8 | 67,3 | 38 | 4,9 | 39,9 | 10,8 | 11,5 | 340,3 | 56,4 | 19,9 | 186 | 124,4 |
| | Оз.Сайсар | 896,3 | 2 | 39,1 | 28,2 | 8,1 | 32 | 4,6 | 6,2 | 376,3 | 35,6 | 14,1 | 62,9 | 95,3 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|-------|-----|------|------|-----|------|-----|-----|-------|------|------|------|-------|
| Оз.Ытык-Кюель | 906,6 | 0,4 | 31,1 | 15,2 | 6,9 | 28,8 | 5,7 | 5,3 | 355,5 | 23,1 | 12,8 | 47,9 | 95,1 |
| Оз.Хатын-Юрях | 950 | 4,6 | 41,8 | 13,5 | 6,1 | 32,3 | 9,1 | 7,2 | 395,5 | 31,2 | 15,2 | 112 | 110,2 |

Среди геохимических показателей, характеризующих перераспределение элементов по геохимическому сопряжению, широко применяется коэффициент латеральной дифференциации (коэффициент местной миграции) химических элементов. Он рассчитывается как отношение среднего содержания валовой формы элемента в донных отложениях к его среднему содержанию в почвах. Судя по значениям коэффициента латеральной дифференциации (рисунок 2), Nb, La, Ga и Ba выносятся из почв и аккумулируются в донных отложениях.

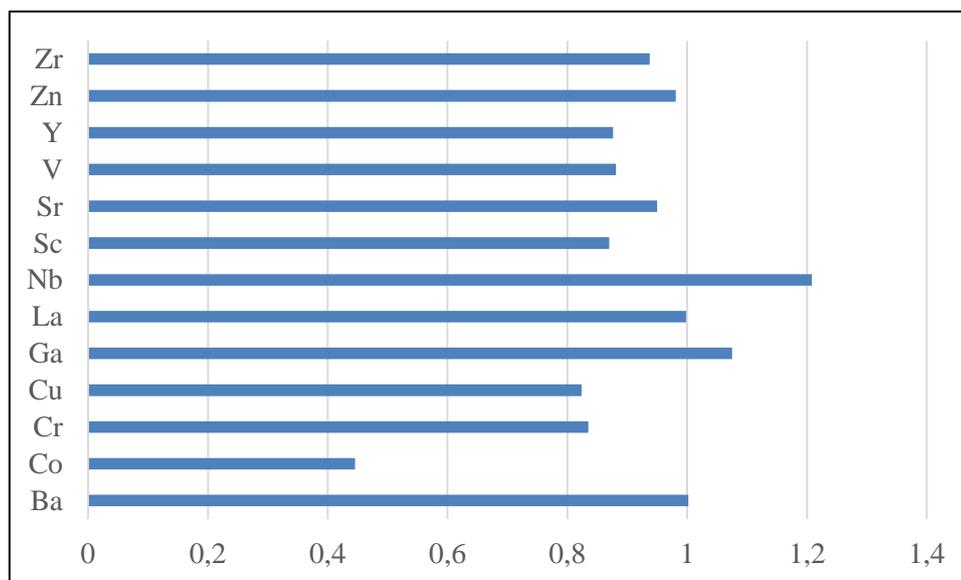


Рисунок 2 – Коэффициент латеральной дифференциации (L) металлов в системе почва – донные отложения.

Интенсивного накопления остальных элементов в донных отложениях по сравнению с почвами не происходит, что, видимо, обусловлено биогенным вкладом данных элементов в органическое вещество как в почвах, так и в донных отложениях. Кроме того, это может быть связано с подвижностью металлов в донных отложениях.

4. Выводы

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы: донные отложения характеризуются более кислой реакцией среды ($pH=6,9$), чем пробы почв ($pH=7,4$). Распределение органического вещества неравномерно и в среднем достигает 1,3-1,8%. Содержание фосфора в почвах немного выше (186 мг/кг), чем в донных отложениях (99 мг/кг).

Определение основных оксидов установил следующий ряд накопления: $SiO_2 > Al_2O_3 > CaO > K_2O > Fe_2O_3 > Na_2O > MgO > TiO_2 > P_2O_5 > MnO$. Из валовых форм микроэлементов по коэффициенту латеральной дифференциации установлена аккумуляция Nb, La, Ga и Ba в донных отложениях выносимые из почв.

5. Литература

- [1] Galiulina R.V., Galiulina R.A., Wozniak V.M. Distribution of benz (a) pyrene, arsenic and heavy metals in the soil-plant-water-bottom sediments system//Agrochemistry. – 2009. – № 3. – P. 66-70.
- [2] Dauwalter V.A., Kashulin N.A. Halkophilic elements (Hg, Cd, Pb, As) in Lake Umbozero, Murmansk Region//Water resources. – 2010. – Vol. 37. – № 4. – P. 461-476.

- [3] Ivanov D.V., Khasanov R.R., Malanin V.V., Lawnov V.V. Spatial distribution of metals in bottom sediments of the Kuibyshev reservoir//Water: chemistry and ecology. – 2015. – № 4 (82). – P. 81-86.
- [4] Aleksandrova A.B., Ivanov D.V., Valiev V.S., Malanin V.V., Khasanov R.R., Marasov A.A. Heavy metals in the soils of the river basins of Tatarstan//Geology, geography and global energy. – 2018. – № 2 (69). – P. 118-129.
- [5] Lawnov V.V., Ivanov D.V., Lawnova A.V., Kochetkova M.Yu. Malanin V.B., Haidarov A.A. Spatial and temporary transformation of bottom sediments of reservoirs of the Middle Volga//Water resources. – 2007. – Vol. 34. – № 5. – P. 573-581.
- [6] Ivanov D.V., Ziganshin I.I., Osmelkin E.V. Regional background concentrations of metals in bottom sediments of lakes of the Republic of Tatarstan//Scientific notes of Kazan State University. Ser. Natural sciences. – 2010. – Vol. 152. – Prince 1. – P. 185-191.
- [7] Aleksandrova A.B., Ivanov D.V., Valiev V.S., Ziganshin I.I., Malanin V.V., Shamaev D.E., Khasanov R.R. Metal content and distribution in the system soil - lake bottom sediments of the volgamesha interfluve // Bulletin of the Academy of sciences of the republic of Bashkortostan. – 2019. – № 4 (96). – P. 39-47.

ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО МИКРОРАЙОНИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ Г. ЯКУТСКА

Рустам Туктаров¹, Сергей Шibaев¹, Альбина Куляндина^{1,2}

1 Якутский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба» РАН,
677000, 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

FEATURES OF SEISMIC MICROZONING OF THE TERRITORY OF YAKUTSK

Rustam Tuktarov¹, Sergey Shibaev¹, Albina Kulyandina^{1,2}

1 Yakutsk branch of the Federal Research Center "Unified Geophysical Survey" RAS, 39 Lenina ave.,
Yakutsk, 677000, Russia

2 North-Eastern Federal University, 58, Belinsky str., Yakutsk, 677000, Russia

Annotation. In this paper, we consider a study by the method of seismic stiffness, which was created by the Soviet seismologist S. Medvedev, where the increment in seismic intensity is calculated by comparing the reference soils and the studied ones. The object of the study is a school for 990 places in the city of Yakutsk. As a result of the study, seismic increments from 0.3 to 1 point were obtained using the seismic stiffness method.

1. Введение

Проведение сейсмического микрорайонирования на застраиваемых территориях является важным мероприятием входящих в инженерно-геологические изыскания. Основная задача сейсмического микрорайонирования оценить величину сейсмической опасности для определенной территории. Величина сейсмической опасности зависит от современной тектонической активности и ее связи с произошедшими эпицентрами землетрясений в радиусе 200 км во временном интервале, а также от сейсмических свойств грунтов на исследуемой площадке. Последнее может сильно отличаться в пределах одного города, села, микрорайона, квартала. Например, две площадки строительства, расположенные в одном населенном пункте, одна из которых расположена на рыхлых песчаных грунтах, а другая на скальных грунтах, по сейсмическим свойствам будут сильно отличаться, что в конечном итоге повлияет на оценку сейсмической опасности исследуемых участков. Рыхлые песчаные грунты относятся к III категории по сейсмическим свойствам, согласно СП. 14.13330.2018, которые с большей вероятностью будут терять несущую способность при воздействии возможного землетрясения, нежели скальные грунты, которые относятся к грунтам I категории и являются более устойчивыми к сейсмическим воздействиям, и, следовательно, более благоприятные для возведения зданий и сооружений. При землетрясении 11.09.1927 г. в г. Ялте наибольший ущерб получили здания и сооружения, расположенные вдоль набережной, построенные на насыпных грунтах с приповерхностным расположением грунтовых вод [1]. Официальные данные говорят о 3 погибших человек и частичного разрушения более 70 % жилого фонда [2].

Неправильная оценка сейсмической опасности может в будущем привести к разрушениям не только конкретных зданий, но и целых городов. Например, в результате Нефтегорского землетрясения, магнитудой 7,6, произошедшее на о. Сахалин в 1995 г., погибло около 2000 человек, разрушив при этом поселок Нефтегорск полностью. Сейсмические воздействия 6 февраля 2023 г. на юге Турции унесли жизни около 55000 человек. Бесспорно, такого огромного количества жертв удалось бы избежать, если бы возводимые объекты строились со строгим учетом всех строительных норм и правил. Например, в городе Эрзинь в провинции Хатай, также находившимся в зоне тех землетрясений, фатальных обрушений зданий, человеческих жертв и даже простых травм не было, поскольку мэр этого города очень тщательно следил за соблюдением норм сейсмостойкого строительства [3]. Поэтому перед

строительством зданий, домов и сооружений в сейсмических районах, необходимо правильно оценить сейсмическую опасность застраиваемой территории.

Проблемами сейсмостойкого строительства и сейсмической опасности на территории г. Якутска и прилегающих территорий посвящены работы сотрудников ЯФ ФИЦ ЕГС РАН и других организаций: Петров А. Ф., Суханов В. И., Шибяев С.В., Козьмин Б.М., Тимиршин К.В., Имаева Л.П., Имаев В.С. Петров С.Б, Банщикова О.И.

В настоящей работе будет рассмотрено исследование методом сейсмических жесткостей (МСЖ), где приращение сейсмической интенсивности рассчитывается путем сравнения эталонных грунтов и исследуемых.

2. Результаты исследований

Метод сейсмических жесткостей, предложенный более 50 лет назад известным советским сейсмологом С.В. Медведевым, базируется на весьма ограниченном наборе исходных данных с использованием осреднений и аналогий в части характеристик грунтов. Нормативные документы, регламентирующие выполнение работ по сейсмическому микрорайонированию: РСН 60-86 и РСН 65-87; СП 14.13330.2014; СП 269.1325800.2016; СП 283.1325800.2016; СТО 95 12022-2017. Все перечисленные нормативы являются действующими, однако распространяются на разные типы объектов.

Интенсивность сейсмических воздействий (фоновая сейсмичность) для объектов строительства принимают на основе комплекта карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (ОСР-2015). Данный комплект карт включает 4 типа: карта А - предназначена для проектирования объектов массового строительства, карты В,С – предназначены для проектирования объектов повышенной ответственности, D – атомные объекты. Степень сейсмической опасности, согласно СП 14.13330.2018, соответствует 6-10 баллам шкалы MSK-64 и вероятности возможного превышения 10% (карта ОСР-2015-А), 5% (карта-ОСР-2015-В), 1% (карта-ОСР-2015-С) (или 90%, 95%, и 99% непревышения) расчетной сейсмической интенсивности в течение 50 лет.

В соответствии с картами общего сейсмического районирования территории РФ (ОСР-2015), сейсмическая опасность территории г. Якутска определена в 6 (Карта-А), 7 (Карта-Б) и 8 баллов (карта С) для средних грунтовых условий. Средние грунтовые условия по сейсмическим свойствам – это грунты II категории. Сейсмическая жесткость грунта – важнейшая сейсмическая характеристика грунтовой толщи, равная произведению плотности грунта на скорость распространения в слое сейсмических волн [4]. Категории грунтов определяют по скоростям упругих (продольных V_p и поперечных V_s) сейсмических волн и по сейсмическим жесткостям.

В свою очередь скорости сейсмических волн очень сильно зависят от температуры грунтовых толщ. Например, в толще твердомерзлого мелкопесчаного грунта с температурой ниже $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ поперечные сейсмические волны (V_s) будут проходить со скоростью 1150 м/с, в то же время, в аналогичном грунте, с положительной $t > 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, скорость $V_s = 320$ м/с (таблица 1). Т.е. скорость падает в три раза, вследствие падения скорости сейсмическая жесткость грунта - соответственно тоже уменьшается, и влечет за собой увеличения приращения балльности на данном участке исследований.

В большинстве случаев бурение скважин в рамках инженерно-геологических изысканий в г. Якутске происходит в зимний период. Летом, когда приповерхностные грунтовые толщ имеют пониженную сейсмическую жесткость из-за изменения температур в сторону увеличения, грунты имеют менее благоприятные сейсмические свойства. Грунты с пониженной сейсмической жесткостью будут испытывать более сильные сотрясения, чем грунты, обладающие большей сейсмической жесткостью. Поэтому очень важно оценить приращение сейсмической балльности при наиболее неблагоприятных грунтовых условиях (период максимальной оттайки).

Оценка приращений сейсмической интенсивности по методу сейсмических жесткостей проводился на объекте «Школа на 990 мест, квартал «Воинская часть» ГО Город Якутск» путем

сравнения значений сейсмических жесткостей изучаемых и эталонных грунтов с учетом влияния обводненности разреза и возможных резонансных явлений, согласно РСН 65-87, была рассчитана по формуле:

$$(1) \Delta I = \Delta I_c + \Delta I_B + \Delta I_{рез},$$

Где ΔI – суммарное приращение сейсмической интенсивности (в баллах) относительно исходной (фоновой) балльности, принимаемой для района исследований в соответствии с РСН 60-86; ΔI_c – приращение сейсмической интенсивности за счет разницы сейсмических жесткостей грунтов на изучаемом и эталонном участках; второе ΔI_B – приращение сейсмической интенсивности за счет ухудшения сейсмических свойств грунтов при их обводнении; третье $\Delta I_{рез}$ – за счет возможного возникновения резонансных явлений при резком различии сейсмических жесткостей в покрывающей рыхлой и подстилающей скальной толще грунтов изучаемого разреза.

Приращение сейсмической интенсивности за счет резонансных явлений $\Delta I_{рез}$ не рассчитывалось, поскольку в разрезах скважин не обнаружено однородных слоев песчаных, глинистых или крупнообломочных грунтов с содержанием песчано-глинистого заполнителя более 30%, подстилаемых скальными породами, характеризующимися значительно большими по сравнению с покрывающими отложениями значениями сейсмической жесткости. Поскольку в разрезах скважин не обнаружены грунтовые воды, приращение сейсмической интенсивности за счет ухудшения сейсмических свойств грунтов при их обводнении $\Delta I_B = 0$.

Приращение сейсмической интенсивности за счет различия грунтовых условий ΔI_c определялось по формуле:

$$(2) \Delta I_c = 1,671g \frac{V_s \rho_s}{V_i \rho_i},$$

где V_s, V_i и ρ_s, ρ_i – соответственно средневзвешенные значения скоростей и плотностей для расчетной толщи грунтов и эталонного участка. В качестве эталонного грунта на основании сравнения физико-механических и сейсмических свойств выбраны пески со скоростями продольных сейсмических волн $V_p = 1300$ м/с и скоростями поперечных сейсмических волн $V_s = 700$ м/с, плотностью 2 г/см³. Разрез скважины и пример графика приращений сейсмической жесткости за счет различий грунтовых условий на рисунке 1,2.

Таблица 1 – Скорости прохождения поперечных сейсмических волн в разрезе скважины №5 на площадке «Школа на 990 мест, квартал «Воинская часть» ГО «Город Якутск».

| Грунт | Глубина, м | Плотность, т/м ³ | Vs, м/с | |
|--|---------------|--------------------------------|--------------|---------------|
| | | | при t > 1 °С | при t < -3 °С |
| Песок мелкий, до глубины 2.5 м темно-желтого цвета, с прослоем пылеватыми средней крупности толщиной до 5-8 см, ниже темно-серого цвета, с редкими включениями органических веществ. Грунт до глубины 2.5 м сыпучемерзлый, ниже твердомерзлый, с массивной криогенной текстурой | 0-3 | 1,86 | 320 | 1150 |
| Песок средней крупности желто-серого цвета, до глубины 14 м с прослоями песков мелких толщиной до 5-6 см и редкими | 4-15 | 1,88 | 359 | 1200 |

3. Выводы

Приращение сейсмической интенсивности по методу сейсмической жесткости (МСЖ) может сильно различаться в зависимости от температурного режима грунтов. Исследуемые грунты на объекте «Школа на 990 мест, квартал «Воинская часть» ГО «Город Якутск» по фактическим данным (в зимний период) имеют скорости поперечных сейсмических волн свыше 1150 м/с (I категория грунтов по сейсмическим свойствам, согласно СП 14.133300.2018, интенсивность сейсмических событий нужно уменьшать на один балл). В летний период скорости могут понизиться до 320 м/с до глубины 6 метров (лежат на границе II и III категории грунтов по сейсмическим свойствам, согласно нормативному документу, требуется увеличивать сейсмичность на 1 балл). Таким образом, в неблагоприятный летний период приращение балльности по сейсмическим жесткостям может составлять от 0.3 до 1 балла за счет понижения сейсмической жесткости грунтовой толщи исследуемого объекта строительства. В данной работе рассматривался один из методов по расчету сейсмических жесткостей (МСЖ), согласно СП 14.133300.2018, РСН 60-86.

4. Литература

- [1] Медведев С.В. Инженерная сейсмология. – М.: Госстройиздат, 1962. – 284 с.
- [2] <https://krymania.ru/krymskoe-zemletryasenie-1927-goda/>
- [3] news.ru/near-east/v-turcii-mer-obyasnil-pochemu-v-ego-gorode-nikto-ne-pogib-pri-zemletryasenie/
- [4] https://www.faufcc.ru/upload/methodical_materials/mp29_2018.pdf

ПРИМЕНЕНИЕ TERRSET ДЛЯ СОСТАВЛЕНИЯ КАРТЫ НАЗЕМНОГО ПОКРОВА БАТАГАЙСКОГО ТЕРМОЦИРКА НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ

Александра Черепанова, Андрей Шепелев
ФГБУН «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН»,
677010, Россия, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36

TERRSET APPLICATION FOR LAND COVER MAPPING OF THE BATAGAY CRATER BASED ON SATELLITE IMAGES

Alexandra Cherepanova, Andrei Shepelev
Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36, Permafrost str., Yakutsk, 677010, Russia

Annotation. The functional capabilities of Geographic Information Systems allow to process geospatial big data to research natural and human systems in more efficient way, as well as for modeling and predicting their state over time. In the complex monitoring of the activity of all processes occurring on the territory remote methods are widely used, which do not require an annual field works and expeditions, but at the same time, they are distinguished by high accuracy of the results and contribute to a better understanding and definition.

1. Введение

Батагайский термоцирк расположен между посёлками Батагай и Эге-Хая, на юго-восточной седловине горы Киргилях в бассейне реки Яна в Верхоянском улусе на северо-востоке Якутии [1]. Он начал формироваться еще в конце 60-х годов прошлого столетия. На топографической карте масштаба 1:100 000 издания 1965 г показана линейная депрессия небольших размеров. С 70-х годов она начала резко увеличиваться в ширину и глубину, а к настоящему времени имеет сложную, причудливую форму. Его появлению и дальнейшему развитию благоприятствовали многие факторы:

- техногенная деятельность человека, обусловленная вырубкой леса для промышленного использования;
- заметные климатические изменения, такие как повышение среднегодовой температуры воздуха и увеличение количества летних атмосферных осадков
- особенность тектонического строения территории.

С каждым годом термоцирк расширяется на 15–20 м в год при общей длине 2000 м и ширине 850 м [2]. Увеличение его формы будет происходить динамически постоянно до тех пор, пока весь подземный лед не вытаят. В результате причинно-следственных связей сформируется новый крупный объект в структуре ландшафта с отличительными сукцессионными признаками и морфологическим обликом [3].

2. Результаты и обсуждение

Под наземным покровом (англ. land cover) в данной работе понимается модель земной поверхности, которая состоит из реально существующих объектов, структурированных согласно потребностям исследователя. Наземный покров используется для описания материала, покрывающего поверхность земли.

Имеется огромное количество методик картографирования типов наземного покрова средствами геоинформационных технологий, анализа геосистем, автоматизированного картографирования.

Настоящее исследование было сосредоточено на выявление изменений наземного покрова за 5 лет с использованием методов дистанционного зондирования и визуальной интерпретации. Классификация наземного покрова была выполнена с использованием неконтролируемой

классификации (кластеризации) по спутниковым снимкам 2015 и 2019 г.г. (LANDSAT 8 с разрешающей способностью снимка от 15 до 30 м на пиксель, проекция UTM, система координат WGS 84, точность позиционирования сенсоров: OLI — 12 м, TIRS — 41 м), а визуальная интерпретация была выполнена с помощью космических снимков сервиса Google Earth с разрешающей способностью 0,6 м на пиксель. Все расчеты были произведены в программе TerrSet Geospatial Monitoring and Modeling System. По методу неконтролируемой классификации были сгруппированы изображения с одинаковыми характеристиками на основе программного обеспечения. Было сгенерировано 7 спектральных каналов снимков и определено 5 типов наземного покрова (кластеров). В 2019 г провал был сильно обводнен и это сгруппировалось пикселями фиолетового оттенка. Также отдельно выделили хвойные растения, разнотравье и моховой покров. Пиксели красного оттенка вдоль юго-западного расширения провала показали его тень (Рисунок 1).

Для оценки изменения наземного покрова на каждый год отдельно рассчитывается площадь, занимаемая определенным типом наземного покрова (Таблица 1).

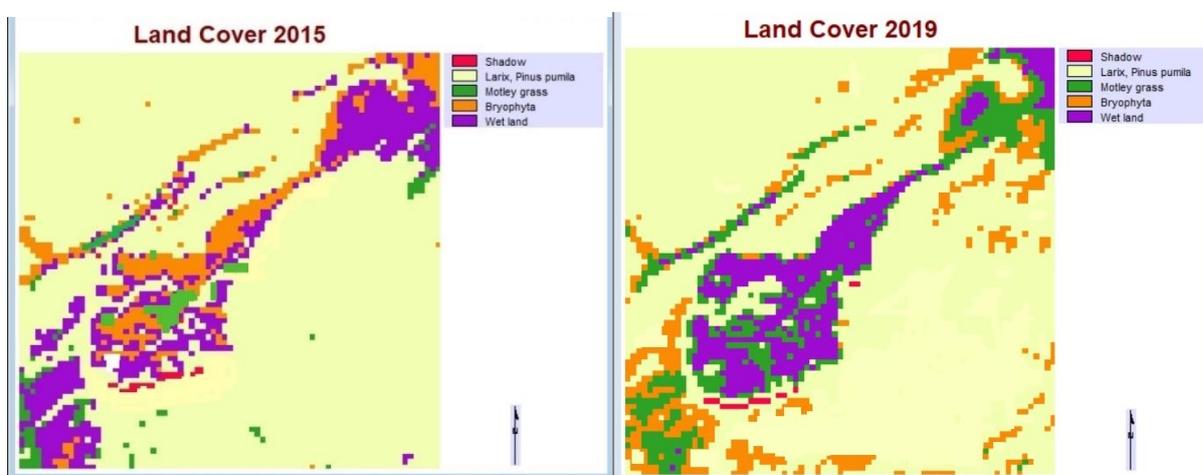


Рисунок 1 – Сравнительная карта наземного покрова Батагайского термоцирка (за 2015 и 2019 г.г.).

Таблица 1 – Динамика изменения типов наземного покрова, приуроченных к Батагайскому термоцирку

| Категория | 2015 (км ²) | 2019 (км ²) |
|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Хвойная растительность | 4,062 | 3,906 |
| Моховой покров | 0,623 | 0,413 |
| Увлажненные участки | 0,692 | 0,828 |
| Разнотравье | 0,549 | 0,395 |

На карте и таблице наглядно видно, что в 2019 году происходило увеличение площади увлажненных участков, что привело к сокращению и изменению почвенного и растительного покрова. Выпадающие осадки (летние) способствовали растеплению грунтов, провоцируя увеличение протаивания деятельного слоя и прогрев верхней кровли мерзлоты ледового комплекса. Стоит отметить, что сильное разрушение провала начинается с конца апреля и начала мая со стороны южной экспозиции термоцирка, то есть в результате активизации температуры воздуха и солнечной активности. Однако, деградация ледового комплекса идет не только сверху, но и снизу и с боков благодаря подмывающим водным потокам.

3. Выводы

В работе проведено картографирование наземного покрова на примере Батагайского термоцирка.

Полученные карты имеют большой спектр применения как в теоретическом, так и в практическом плане. Если строить подобные карты каждый год, можно сделать серию карт по изменению наземного покрова, по которой было бы видно развитие территории.

4. Литература

- [1] Геологическая карта: Q-53 (Верхоянск) Государственная геологическая карта Российской Федерации. Третье поколение. Верхояно-Колымская серия. Геологическая карта, масштаб: 1:1000000, серия: Верхояно-Колымская, составлена: ФГБУ «ВСЕГЕИ». 2016. редактор(ы): Калашников В.В.
- [2] Vadakkedath, V., Zawadzki, J. & Przeździecki, K. Multisensory satellite observations of the expansion of the Batagaika crater and succession of vegetation in its interior from 1991 to 2018 // *Environ Earth Sci.* – 2020. – 79. – 150. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-020-8895-7>
- [3] A.G. Shepelev, A. Kizyakov, S. Wetterich, A. Cherepanova, A. Fedorov, I. Syromyatnikov, G. Savvinov. Sub-Surface Carbon Stocks in Northern Taiga Landscapes Exposed in the Batagay Megaslump, Yana Upland, Yakutia // *MDPI AG, Land.* – 2020. – № 9(9). – P. 1-16. – DOI: <https://doi.org/10.3390/land9090305>.

ТРАНСФОРМАЦИЯ СОЛЕВОГО СОСТАВА АГРОГЕННЫХ ПОЧВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ

Олеся Шадринова

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

TRANSFORMATION OF SALT COMPOSITION OF AGROGENIC SOILS OF CENTRAL YAKUTIA

Olesya Shadrinova

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

Annotation. Saline soils are widely distributed throughout Russia and the world. Subprovinces of chloride-sulfate and sulfate-chloride salt accumulation there are In Central Yakutia. Results of the dynamics of the salt composition of post-agrogenic soils for the period from the 1950s to 2020 presents in the paper. Analysis of the composition of soil water extracts showed that the composition of water-soluble salts has undergone minor changes, with a simultaneous increase in the composition of toxic salts due to the presence of permafrost, which prevents the migration of salts from the profile, but promotes lateral migration.

1. Введение

Засоленные почвы являются одним из главных факторов деградации земель. В России они получили широкое распространение, встречаясь от южных регионов страны до северных и от западных районов до восточных, но их распространение неравномерно [1]. В Центральной Якутии засоленные почвы приурочены к пониженным элементам рельефа и встречаются, главным образом, в долинах крупных рек: Лены, Амги, Вилюя и др., а также в аласах Центральной Якутии [2]. В 60-х годах прошлого столетия В.Г. Зольников отмечал увеличение площадей засоленных почв от верхней древней аллювиальной равнины, где преобладает содовое засоление, к нижней, для почв которой характерно сульфатное и хлоридное засоление [3].

Целью настоящей работы является анализ трансформации солевого состава агрогенных почв Центральной Якутии.

2. Материал и методы исследования. Исследования проводились на территории долины Туймаада (ГО г. Якутск) в районе с. Хатасс, Покровского и Намцырского трактов, местности Ус Хатын и района Птицефабрики. Химический анализ почв проведен по общепринятым в почвоведении и агрохимии методикам в лаборатории металлогении ИГАБМ СО РАН (аналитики Романова А.М., Свинобоева Н.В.). Расчет токсичных солей выполнен по результатам анализов водных вытяжек почв [4]. Минералогический состав корочки определен рентгенфазовым анализом в ЦКП ОФХМА ИГАБМ СО РАН (аналитик Васильева Т.И.).

3. Результаты исследований.

За основу взята работа Лии Григорьевны Еловской с соавторами – монография, посвященная мерзлотным засоленным почвам Центральной Якутии [5]. Где выделено 12 разрезов, заложенных авторами на пахотных землях совхозов, и по описанию территориально относящихся к современному ГО г. Якутск (г. Якутск, Хатассы, Ботанический сад). Еще в 1960-х годах на территории долины Туймаада наблюдалось образование пятен округлой формы, диаметром 40-70 м, лишенных растительности, диагностируемые как корково-столбчатые мерзлотные солонцы, на которых описаны серо-белесые корочки.

Для детализации в 2020 г. опробовано 6 точек территориально сопоставимых с площадками опробования Еловской Л.Г. в 1960 г. (рис. 1).

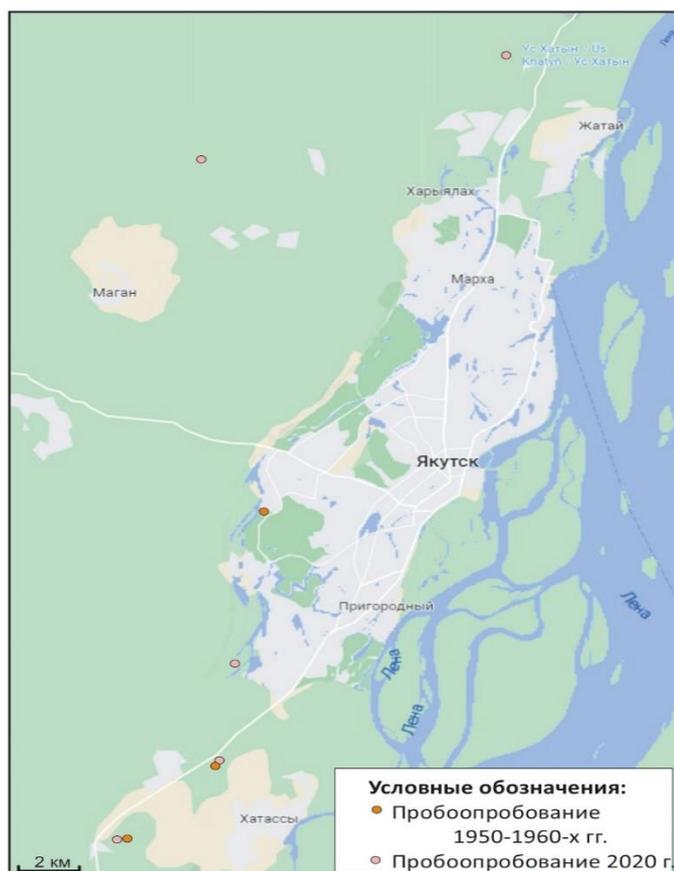


Рисунок 1 – Схема расположения точек опробования.

Для иллюстрации изменений водорастворимого комплекса рамках данного тезиса приведено сопоставление по двум разрезам, один из которых был заложен на пашне в 1960-х гг. Л.Г. Еловской и результаты химического анализа которого изложены в монографии (разрез № 303-Е) и разрез X-20, пройденный в 2020 г. в той же местности на территории ныне заброшенных пахотных земель в 100 м на ЮЗ от с. Хатасс (рис. 2).



Корочка. Серо-белесая пушистая корочка с желтоватым налетом, наблюдается слабое явное кипение от 10% HCl.

0-1(5) см. Темно-серый суглинистый органический горизонт плотного сложения. Переход не ясный. Кипит от 10% HCl.

1(5)-27(32) см. Легкий суглинок, темно-коричневый, имеет неоднородную окраску из-за механического перемешивания почвенного материала, листоватого сложения, пронизан корнями растений. бурно кипит от 10% HCl. Переход ясный.

27(32)-45 см. Супесчаный горизонт. Серовато-бежевого цвета, присутствуют бурые примазки железа, угольки. Листоватого сложения бурно кипит HCl.

Разрез заложен в июне 2020 г. и пройден до мерзлоты на глубине 45 см

Рисунок 2 – Почвенный профиль и морфологическое описание горизонтов почвенного разреза X-20.

В таблице 1 представлены результаты анализов водной вытяжки почвенных образцов. Разрез 303-Е диагностируется как черноземно-луговая сильносолончаковатая с сульфатным типом засоления. В профиле отмечается наличие гипса. Данные по содержанию гумуса и кислотности почвы не предоставлены, но автор характеризует черноземно-луговые почвы

территории нейтральной и щелочной реакцией среды (рН=7-8), содержание гумуса обычно не превышает 4,5 %. Малое количество хлоридов объясняется благоприятным водным режимом, обеспечивающим их вымывание. В солончаковых почвах отмечается накопление легкорастворимых солей в верхней части профиля.

Таблица 1 – Солевой состав почв долины Гуймаада

| № разреза | Глубина, см | рН | Гумус | HCO_3^- | Cl^- | SO_4^{2-} | Ca^{2+} | Mg^{2+} | $\text{Na}^{++} \text{K}^+$ | $S_{\text{токс}}$, % |
|-----------|-------------|-----|-------|------------------|---------------|--------------------|------------------|------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Х-20 | корочка | 8,8 | 3,80 | 4,7 | 0,9 | 45,79 | 12,0 | 25,25 | 14,14 | 2,5 |
| | 0-1(5) | 7,9 | 3,72 | 0,85 | 0,55 | 30,08 | 5,0 | 6,5 | 19,98 | 1,8 |
| | 1(5)-27(32) | 8,5 | 3,76 | 2,7 | 0,9 | 16,17 | 1,25 | 2,5 | 16,02 | 1,2 |
| | 27(32)-45 | 7,9 | 1,58 | 0,9 | 0,45 | 8,23 | 0,75 | 0,25 | 8,58 | 0,6 |
| 303-Е | 0-10 | - | - | 0,61 | 0,29 | 19,9 | 0,72 | 0,47 | 19,61 | 1,4 |
| | 15-25 | - | - | 0,72 | 0,69 | 19,85 | 8,9 | 0,85 | 11,51 | 0,9 |
| | 30-40 | - | - | 1,98 | 1,85 | 9,2 | 5,22 | 2,8 | 4,83 | 0,5 |
| | 45-55 | - | - | 2,09 | 3,6 | 8,08 | 1,5 | 0,95 | 11,32 | 0,8 |

На поверхности т.н. Х-20 образована корочка серо-бело-желтоватого цвета мощностью до 2 см, распространившаяся на площади в 30 м², на поверхности которой отсутствует растительность. Рентгенфазовый анализ установил в корочке наличие большого количества гипса. Разрез характеризуется щелочной реакцией среды по всему профилю. Гумус одинакового содержания по всему темноокрашенному горизонту с резким убыванием в светлоокрашенном. Коэффициент корреляции рН по отношению с гумусом составляет 0.57.

Сумма токсических солей ($S_{\text{токс}}$) в обоих разрезах максимальная с поверхности, убывает вниз по профилю.

Сравнивая солевые профили (рис. 3), можно отметить, что почвы характеризуются поверхностной концентрацией солей. Увеличенное содержание ионов Ca^{2+} в разрезе 303-Е обусловлен наличием карбонатов, которыми пропитан весь почвенный профиль. Авторы отмечают характерное листоватое сложение для карбонатного горизонта почв и бурное кипение от соляной кислоты в горизонтах ниже горизонта А, в солончаковых же их разновидностях – с поверхности, что мы и наблюдаем в разрезе Х-20 по всему профилю.

В целом, в солевом составе почв с сульфатным химизмом засоления количественное отношение солей, с учетом погрешностей анализов, остается практически неизменным вот уже на протяжении более чем полвека, даже с учетом того, что пашня давно не используется и привнос солей в составе удобрений исключен. За исключением появления большого количества ионов магния, в том числе и токсического, содержание которого уменьшается вниз по профилю. Сохранение солей в профиле помимо природы их возникновения, обусловлено тем фактом, что мерзлота служит водоупором и препятствует вымыванию солей из профиля.

Авторы [4] выделяли на территории Якутии семь типов засоления, разрез 303-Е определяется как сульфатный с поверхности и гидрокарбонатно-сульфатный и содово-сульфатный с глубиной, по ныне широко распространенной методике определения химизма засоления Базилевич, Панковой [5] разрез характеризуется как сульфатный с поверхности и хлоридно-сульфатный вниз по профилю. Разрез Х-20 по методике, используемой в [4], характеризуется содово-сульфатным и сульфатным типом засоления, по [5] – сульфатным. Различия объясняются методом подсчетов. Ранее учитывалось количественное соотношение содержания ионов в профиле в отличие от методики, используемой в настоящее время, учитывающая качественный состав солей путем связывания их в «гипотетические» соли для определения токсичных солей.

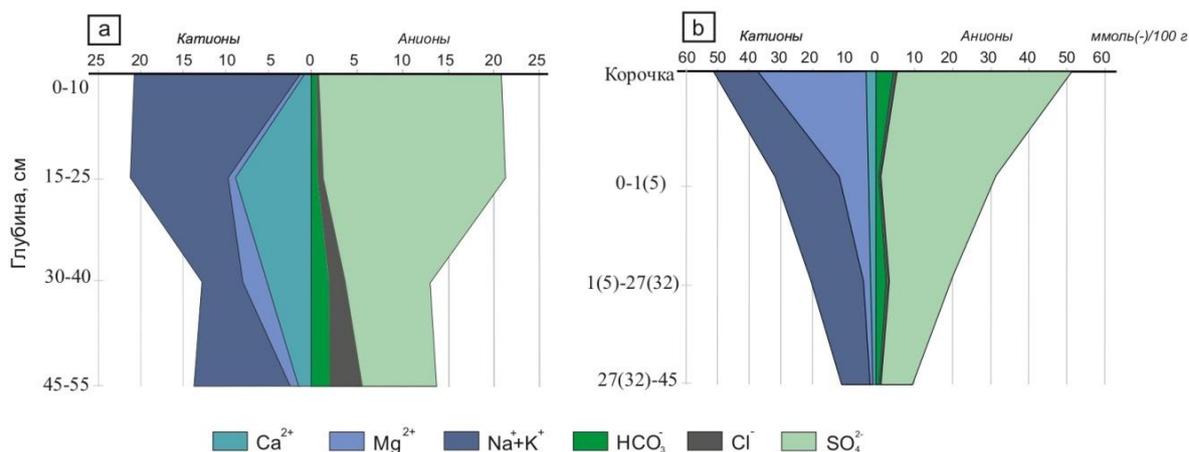


Рисунок 3 – Солевой профиль почв. а – разрез 303-Е; б – разрез X-20.

3. Выводы

Таким образом, в агрогенных почвах долины Туймаада солевой состав претерпел незначительные изменения. Территории все также характерно поверхностное засоление. Основным фактором, влияющим на накопление и распределение солей в профиле, является наличие многолетнемерзлых пород, служащих постоянным водоупором, ограничивающим миграцию солей из профиля и способствующих миграции их по латерали.

4. Благодарности

Работа выполнена в рамках выполнения проектов Государственного задания Минобрнауки РФ FUEM2019-0003 «Эколого-геохимическое изучение техногенных массивов на территории Якутской алмазоносной провинции».

5. Литература

- [1] Картографический анализ зависимости распространения засоленных почв на территории России от ряда климатических характеристик / Н. В. Калинина, Д. И. Рухович, Е. И. Панкова, Г. И. Черноусенко, П. В. Королева // Почвоведение. – 2016. – № 11. – С. 1287-1304. – DOI: 10.7868/S0032180X16110046.
- [2] Еловская Л.Г. Сезонная динамика солей в засоленных почвах Центральной Якутии // Тезисы докладов конференции почвоведов Сибири и Дальнего Востока. – Новосибирск: Горно-Алтайское книжное изд-во, 1962. – С. 32-33.
- [3] Зольников В.Г. Почвы Восточной половины Центральной Якутии // Материалы о природных условиях и сельском хозяйстве Центральной Якутии. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1954. – С. 55-221.
- [4] Базилевич Н.И., Панкова Е.И. Опыт классификации почв по засолению // Почвоведение. – 1968. – № 11. – С. 3-16.
- [5] Еловская Л.Г., Коноровский А.К., Саввинов Д.Д. Мерзлотные засоленные почвы Центральной Якутии. – М.: Наука, 1966. – 275 с.

ОЦЕНКА ПОДЗЕМНОГО УГЛЕРОДА В ДЕЛЬТОВЫХ УЧАСТКАХ РЕКИ ЛЕНЫ

Андрей Шепелев, Александра Черепанова
ФГБУН «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН»,
677010, Россия, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36

ASSESSING OF UNDERGROUND CARBON ON THE LENA DELTA AREA

Andrei Shepelev, Alexandra Cherepanova
Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36, Permafrost str., Yakutsk, 677010, Russia

Annotation. The current results of organic, inorganic and total carbon stocks of the Lena delta permafrost area (in degraded tundra landscapes) are shown. The main carbon stock is composed due to allochthonous and autochthonous peat. Such a diverse formation and accumulation of organic material is typical of the low-lying islands of the river delta and under the influence of local vegetation that can accumulate in the thickness of the seasonally thawed layer and permafrost. The total reserves of organic carbon for the tested thickness of 0–460 cm on the Kurungnah-Sise island is amounted as 174 kg/m³. For the Samoilovsky island in the thickness of 0–400 cm is 140 kg/m³ and the Bykovsky Peninsula in the thickness of 0–240 cm is 123 kg/m³. The reserves of inorganic carbon in the above areas are 9, 11 and 10 kg/m³. Total carbon stocks are 183, 152 and 134 kg/m³. Recorded estimates of organic and plant remains on the islands have been preserved to the present, despite thermal abrasion and degradation of permafrost. Underground carbon pool of permafrost landscapes in the Arctic on a local and planetary scale plays one of the leading roles in decarbonization and absorption of active atmospheric gases.

1. Введение

Арктические ландшафты вмещают колоссальные количества углерода, где он в основном депонирован на поверхности мерзлотных почв, отложениях ледовых комплексов и торфяниках, что примерно составляет треть от мировых запасов углерода [1]. Масштабы отложений ледового комплекса достигают мощности 50 м и более, являющимися неотъемлемой частью многолетней мерзлоты Сибири и Северной Америки, простирающимися на площади около 1 387 000 км² [2], а 70% из этой территории подвержено деградации [3]. Здесь образование и накопление углерода в основном формируется из бриофитных ассоциаций [4], которые генерируют 17% углерода Северного полушария [5]. Современные изменения, происходящие в структуре климата планеты, вызывают трансформацию ландшафтов, подвергаясь эрозии и термокарстовым процессам, приводящих к образованию озер и заболачиванию, появлению байджарахов и формированию термоцирков в отдельных районах, доминирующих в ландшафте [6].

Определение содержания углерода (Сорг – органический углерод, Снеорг – неорганический углерод и Собщ – общий углерод) в почве проводили на анализаторе углерода LECO RC612 в твёрдых образцах по стандарту DIN19539 методом температурного программирования. Запасы углерода рассчитывали для каждого отобранного слоя породы, а общие запасы углерода всей толщи разреза суммировали с полученными показателями.

Цель работы заключалась в оценке запасов различных форм углерода в дельте р. Лены имеющих неоспоримое значение для составления карт инвентаризации существующего и захороненного органического углерода в Северном полушарии.

2. Результаты и обсуждение

Оценка запасов углерода выражает количество депонированного вещества в разрезе и отражает распределение углерода в зависимости от его содержания в отложениях. Как видно из рис. 1а

наибольшие запасы Сорг сосредоточены в интервале глубин от 220–240 до 320–340 см. Пул углерода составляет 15,07 и 19,92 кг/м³ соответственно. Запасы Снеорг незначительны по всему профилю и не превышают 1 кг/м³.

Запасы Сорг имеют три волны пиковых значений; в интервале глубин 0–10 и 10–20 см, 50–70 и 90–110 см, 290–310 и 310–330 см. В этих интервалах глубин пул изменяется от 7,77 до 14,73 кг/м³. Запасы Снеорг также, как и в предыдущем профиле не превышают 0,95 кг/м³ (рис. 1б).

Запасы Сорг по профилю распределены неравномерно, основной пул сосредоточен в верхнем метре. В единственном прослое торфа на глубине 140–160 см запасы составляют 28,51 кг/м³, а в верхних слоях (20–30 – 70–90 см) – 55,11 кг/м³. Для этого профиля зафиксированы наибольшие запасы Снеорг в нижних слоях, которые составляли 1,00–1,36 кг/м³ (рис. 1в).

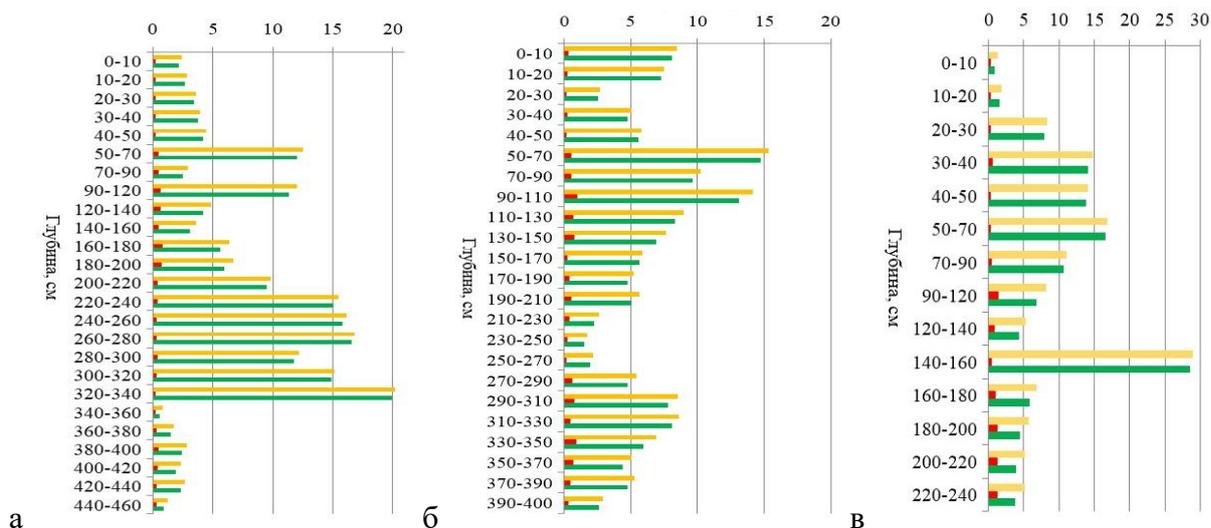


Рисунок 1 – Послойный пул подземного углерода на участках о. Курунгнах-Сисе (а), о. Самойловский (б) и Быковский полуостров (в), кг/м³.

На рисунке 2 показан суммарный пул различных форм углерода для изученных толщ. При расчете запасов углерода преобладающее значение имеет мощность разреза, содержание в нем органических веществ, состав отложений, плотность и частота отбора образцов. Частый отбор образцов с объекта минимизирует ошибки возникающие при приращении содержания углерода с плотностью почвы, что исключает получение завышенных результатов по запасам.

Общий пул органического углерода для апробированной мощности 0–460 см на участке о. Курунгнах-Сисе составил 174 кг/м³. Для о. Самойловский и мощности 0–400 см – 140 кг/м³ и Быковского полуострова (мощность 0–240 см) – 123 кг/м³.

Пул неорганической формы углерода в вышеназванных объектах и толщах составили 9, 11 и 10 кг/м³ соответственно. Пул общего углерода 183, 152 и 134 кг/м³ соответственно.

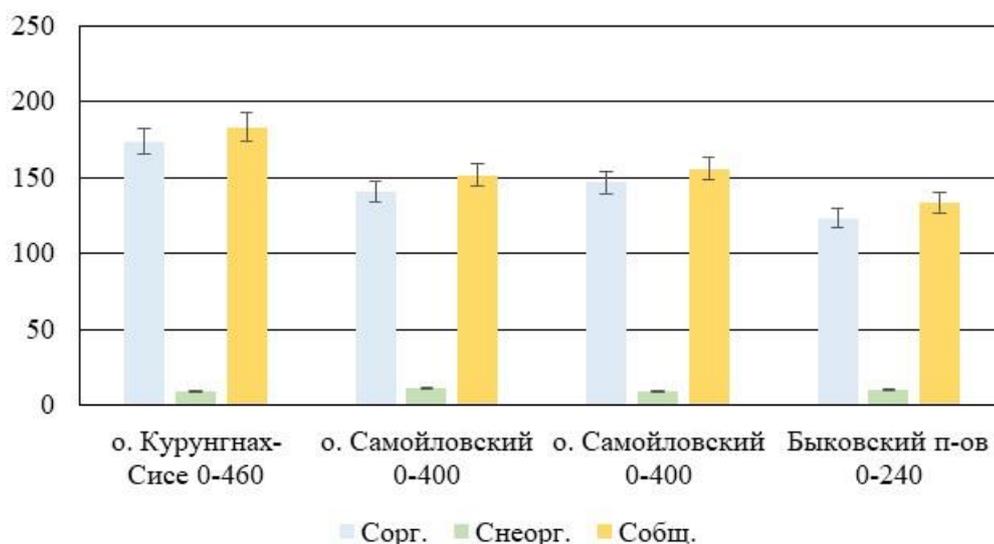


Рисунок 2 – Общий пул углерода в дельтовых участках на различных изученных толщах, кг/м³.

Сопоставить корректно содержание углерода в отложениях пойменных почв дельтовых островов не всегда представляется возможным с внутриконтинентальными типами почв, и в этом нет необходимости. Ввиду их речного происхождения и переработки поймы водотоками. При таких условиях формируются почвы, состоящие из слоистых песков и илов с чередованием аллохтонного органического вещества и автохтонного торфа. Достигающих мощности до 3 м и более. В весенне-летнее половодье, наводнения перекрывают тундровую растительность массой песка и остатками отмершей растительности принесенной по руслу реки. Вследствие чего происходит переотложение органического материала на локальных участках берегов в процессе флювиального осаждения, что морфологически фиксировалось в береговых обнажениях о. Курунгнах-Сисе и о. Самойловский и в меньшей степени в Быковском полуострове.

Свидетельством этого служит избыток аллохтонного торфа на низинных участках островов, который привносится современными геологическими и русловыми процессами извне, тем самым усиливая вымывание речными водами минералов карбонатной группы, не способных закрепиться в вмещающих породах. Автохтонный торф тоже подвергается указанным процессам, связано это с боковым промыванием берегов потоками воды, движущихся с верховьев реки, что способствует не только вымыванию минералов, но и разрушению островной береговой линии.

Впрочем, существующая аккумуляция органических и растительных остатков на островах сохраняется по настоящее время вопреки термоабразии и деградации многолетней мерзлоты. Подземный углеродный пул мерзлотных ландшафтов Арктики в планетарном масштабе играет одну из ведущих ролей в декарбонизации и поглощении активных газов атмосферы.

3. Заключение

Подземный пул углерода островов дельты р. Лена обладает высокой секвестрационной способностью накапливать и удерживать поступающий углерод извне и за счет автохтонного торфа. Но при существующих сценариях ускоренной активизации термокарстовых процессов и термоабразии берегов, велик риск утраты большей части законсервированного углерода с речными водотоками и минерализацией органического вещества в воде и атмосфере.

4. Литература

[1] Feng X., Vonk J.E., van Dongen B.E., Gustafsson O., Semiletov I.P., Dudarev O.V. et al. Differential mobilization of terrestrial carbon pools in Eurasian Arctic river basins // Proceedings of

- the National Academy of Sciences of the United States of America. – 2013. – Vol. 110. – № 35. – P. 14168-14173.
- [2] Strauss J., Schirrmeister L., Grosse G., Fortier D., Hugelius G., Knoblauch C. et al. Deep Yedoma permafrost: A synthesis of depositional characteristics and carbon vulnerability // *Earth-Science Reviews*. – 2017. – Vol. 172. – P. 75-86.
- [3] Strauss J., Schirrmeister L., Grosse G., Wetterich S., Ulrich M., Herzschuh U. et al. The deep permafrost carbon pool of the yedoma region in Siberia and Alaska // *Geophysical Research Letters*. – 2013. – Vol. 40. – P. 6165-6170.
- [4] Hugelius G., Kuhry P. Landscape partitioning and environmental gradient analyses of soil organic carbon in a permafrost environment // *Global Biogeochemical Cycles*. – 2009. – Vol. 23. – P. – GB3006.
- [5] Park H., Launiainen S., Konstantinov P.Y., Iijima Y., Fedorov A.N. Modeling the effect of moss cover on soil temperature and carbon fluxes at a tundra site in northeastern Siberia // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. – 2018. – Vol. 123. – № 9. – P. 3028-3044.
- [6] Fountain A.G., Campbell J.L., Schuur E.A.G., Stammerjohn S.E., Williams M.W., Ducklow H.W. The disappearing cryosphere: impacts and ecosystem responses to rapid cryosphere loss // *Biosciences*. – 2012. – Vol. 62. – P. 405-415.

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН ВИЛЮЙСКОЙ ГЭС-3

Лена Яковлева, Татьяна Чжан

ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова»,
677000, Россия, г. Якутск, ул. Белинского, 58

HYDROGEOLOGICAL MONITORING OF GROUND DAMS OF VILYUYSKAYA HPP-3

Lena Yakovleva, Tatiana Chzhan

North-Eastern Federal University, 58, Belinsky str., Yakutsk, 677000, Russia

Annotation. One of the qualitative diagnostic indicators of the technical condition of soil dams are piezometric levels in the body and base, as well as pressure gradient values. Hydrogeological monitoring conducted in 2021 and 2022 over the condition of the left-bank and right-bank dams of the Vilyuyskaya HPP-3 and the left-bank abutment showed that diagnostic indicators do not exceed their criteria values. There is a significant margin of operating levels up to critical values. The temperature regime of the left-bank abutment is characterized by low temperatures, which are significantly lower than the criteria values.

1. Введение

Одними из главных условий, обеспечивающих нормальную эксплуатацию, прогнозирование и своевременное предотвращение аварийных ситуаций гидроузлов, работающих в сложных инженерно-геокриологических условиях, являются мониторинговые исследования и анализ состояния грунтовых плотин, включая примыкающим к ним толщ горных пород. К количественным диагностическим показателям относят фактические пьезометрические уровни в теле и основании плотин и значения напорных градиентов.

2. Результаты исследований

В состав Вилуйской ГЭС-3 входят совмещенная русловая ГЭС, подводящие и отводящие каналы, левобережная и правобережная плотины, выполненные по типу каменно-земляных с центральным ядром из суглинка. Обе плотины относятся к талому типу плотинам, проектируемых с допущением оттаивания основания, в частности под противофильтрационными и дренажными устройствами.

Геологические условия района расположения Вилуйской ГЭС-3 подробно описаны в литературе [1,2]. Выделим только основные моменты. В общегеологическом понимании считается, что район исследуемого объекта относится к районам с «простым геологическим» строением. В то же время в мировой и отечественной практике гидротехнического строительства нет объекта, возводимого в столь сложных инженерно-геокриологических условиях.

Вилуйская ГЭС-3 возводилась на полускальных осадочных таломерзлых основаниях с оползневыми образованиями, трещинами, заполненными льдом. Грунты основания и днища представлены карбонатно-глинистой толщей в виде переслаивающихся мергелей, известняков, реже песчаников. Район ВГЭС-3 характеризуется распространением надмерзлотных, подмерзлотных вод и вод таликовой зоны под долиной р. Вилуей. Надмерзлотные воды приурочены к четвертичному водоносному горизонту, к склоновым и аллювиальным отложениям в сезонноталом слое. Воды безнапорные, пресные (минерализация до 0,1 г/л) и относятся гидрокарбонатно-кальциево-магниевого типу. Подмерзлотные воды представлены рассолами с минерализацией 80 г/дм³. Воды напорные, хлоридно-натриево-калиевые. Воды подруслового талика в зависимости от времени года и глубины распространения по

химическому составу и минерализации близки то к надмерзлотным, то к подмерзлотным водам. На глубине 20–30 м эти воды характеризуются хлоридно-натриево-калиевым составом с минерализацией 20–30 г/дм³. Есть мнения, что создание водохранилища вследствие повышений напора может привести к внедрению рассолов в вышележащие массивы по ослабленным участкам, растворению природного льда, как следствие к деградации мерзлоты, активизации оползневых процессов, водообмену между подземными водами и водохранилищем [1].

Криолитозона в пределах расположения ВГЭС-3 имеет двухъярусное строение, поры и трещины нижнего яруса заполнены рассолами подмерзлотных вод.

Грунты левобережного примыкания характеризуются наличием оползневых образований, представленными породами верхоленской свиты, которые примяты и раздавлены до щебня. Грунты характеризуются высокой льдистостью (5–10%, на отдельных участках до 50%), значительными коэффициентами фильтрации при оттаивании – до 50–150 м/сут. Кроме того, грунты сильно засолены (0,5–7%).

На основе отчетов по мониторингу технического состояния сооружений ВГЭС-3, в данной работе проведен анализ гидрогеологического мониторинга пьезометрических уровней в теле и основании земляных плотин.

Мониторинг пьезометрических уровней ведется в 14 и 19 диагностических пьезометрах (скважинах) в левобережной и правобережной плотинах соответственно. Анализ показаний в контрольных скважинах в первом квартале 2021 года показал, что уровни воды в них изменяются незначительно - в пределах первого десятка метра. Этот фактор связан прежде всего со стабильным положением уровня нижнего бьефа за отчетный период. В пьезометрах зафиксирован существенный запас (3–4 м) положения уровней воды до первого (предупреждающего) уровня безопасности К1, при котором сооружение переходит от работоспособного состояния к частично работоспособному состоянию.

Пьезометрические уровни в левобережном примыкании за данный отчетный период были исследованы в одном диагностическом пьезометре. Остальные скважины находились в нерабочем состоянии вследствие работы мерзлотной завесы, в результате которой исследуемый массив перешел в мерзлое состояние. Мониторинг уровней в рабочем пьезометре показал, что за первый квартал 2021 года не были зафиксированы случаи превышения критерия безопасности.

Оценка показаний диагностических пьезометров левобережной и правобережной плотин, а также левобережного примыкания за 1 квартала 2022 года тоже отмечает, что по всем диагностическим пьезометрам уровни воды не достигают критериальных значений. В среднем запас положения уровней до предупреждающего уровня безопасности в левобережной плотине составляет 4,3 м, в правобережной –5,6 м.

Значения действительных градиентов напора в фильтрационных областях между контрольными парами пьезометров, расположенных в ядрах земляных плотин, не превосходят критериальных значений. Максимальные градиенты напора на левобережной и правобережной плотинах соответственно равны 1,36 м и 5,17 м при критериальном значении 6,67 м.

Температурный режим грунтов основания в пределах устройства мерзлотной завесы в левобережном примыкании левобережной плотины стабильный. В контрольных скважинах были зафиксированы температуры от минус 5,3 °С до минус 18,3 °С, что значительно ниже критериальных значений (от -1,7 °С до -3,8 °С). Данный факт подтверждает о стабильной работе мерзлотной завесы по обеспечению мерзлого состояния грунтового массива.

3. Выводы.

Таким образом, на основе выше сказанного, можно сделать вывод, что за рассматриваемые периоды все фактические значения качественных гидрогеологических показателей диагностики грунтовых плотин Вилюйской ГЭС-3 не превышали свои критериальных значения. Это обстоятельство говорит о качественной работе противофильтрационных устройств и мерзлотой завесы.

4. Литература

- [1] Solovyova A.G., Tsvik A.M. Analysis of hydraulic research in substantiation of design solutions of Vilyuiskaya HPP-3 // Hydrotechnical construction. – 2006. – No. 4. – P. 2-10
- [2] Frumkin V.N., Sherman M.M. On the construction of the Vilyuiskaya HPP-3 on a permafrost semi-horizontal foundation // Hydrotechnical construction. – 2003. – No.12. – P. 18-20
- [3] Gorokhov E.N. The temperature regime of soils of the left-bank abutment of the Vilyuiskaya HPP-3 // Hydrotechnical construction. – 2003. – No. 2. – P. 12-15.

ВЕРТИКАЛЬНАЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ В ПРЕДЕЛАХ ДАЛДЫНСКОГО КИМБЕРЛИТОВОГО ПОЛЯ

Алексей Янников

Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО), 678174, Россия, г. Мирный, ул. Ленина, 39

VERTICAL HYDROGEOLOGICAL ZONING WITHIN THE DALDYN KIMBERLITE FIELD

Alexey Yannikov

“Yakutniproalmaz” Institute PJSC «ALROSA», 39, Lenin str., Mirny, 678174, Russia

Annotation The features of the formed vertical hydrogeological zonality within the Daldynsky kimberlite field are given. Aspects of water abundance of subpermafrost aquifers identified in the section are considered. Reservoir intervals are characterized, which are usually composed of fractured dolomites and limestones.

1. Введение

Осадочный чехол в пределах Далдынского кимберлитового поля сложен преимущественно карбонатными породами венда и кембрия, терригенно-карбонатные породы находятся в подчинённом положении, галогенные практически полностью отсутствуют (не более 0,1%) [1]. Общая мощность осадочной толщи изменяется от 2 420 до 2 478 м. Вмещающие породы непосредственно в интервалах отработки +350/-1500 м коренных месторождений алмазов преимущественно представлены породами манькайской (C_1 mn) в отм. -1400/-1500 м, эмьяксинской (C_1 em) в отм. -1200/-1400 м, кумахской (C_1 k) в отм. -1070/-1200 м, удачинской (C_{1-2} ud) в отм. -570/-1070 м свит, нерасчленённой известняково-доломитовой толщи (C_2 id) в отм. -170/-570 м, мархинской (C_3 mr) в отм. +230/-170 м и моркокинской (C_3 mrk) в отм. +350/+230 м свит. Перекрывающие породы в отм. +370/+350 м представлены маломощными терригенными отложениями четвертичного возраста и частично, как правило, на водоразделах, вулканогенными породами триаса. Структурные этажи разделены между собой перерывами в осадконакоплении, угловыми и стратиграфическими несогласиями. Нижнепалеозойские породы частично перекрыты вулканогенными породами триаса и отложениями четвертичного возраста. Магматические образования пользуются незначительным распространением и представлены не выходящими на поверхность силлами и дайками долеритов, выполняющими региональные разломы [2].

Гидрогеологические условия Далдынского кимберлитового поля определяются его принадлежностью к сочленению Оленекского и Верхневилуйского артезианских бассейнов [3]. По причине незначительности влияния, а также отсутствия перспектив использования надмерзлотных и межмерзлотных вод, объектом изучения выступают подмерзлотные природные рассолы, которые существенно осложняют проходку подземных горных выработок. Понимание гидрогеологической обстановки необходимо для обеспечения безопасной отработки алмазоносных месторождений Западной Якутии.

2. Результаты и обсуждение

В пределах осадочного чехла в отметках отработки и прямого техногенного влияния от процесса откачки-закачки выделяются следующие водоносные комплексы:

1. Первый от поверхности подмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс является наименее водообильным водоносным комплексом в пределах изучаемой территории. На рисунке 1 приведён опорный разрез (схема коллекторов) в пределах участка. От дневной поверхности он отделён толщей (150-250 м) многолетнемерзлых пород олдонинской, онхойюряхской и моркокинской свит. Абсолютная отметка кровли составляет +99/+180 м. Подошвой комплекса служит нижняя часть разреза мархинской свиты, находящаяся на

абсолютных отметках -180/-200 м. Общая мощность водоносного комплекса достигает 300 м, однако, эффективная мощность коллекторов редко превышает 50 м. Водовмещающими породами являются трещиноватые и кавернозные известняки и доломиты моркокинской и мархинской свит [4].

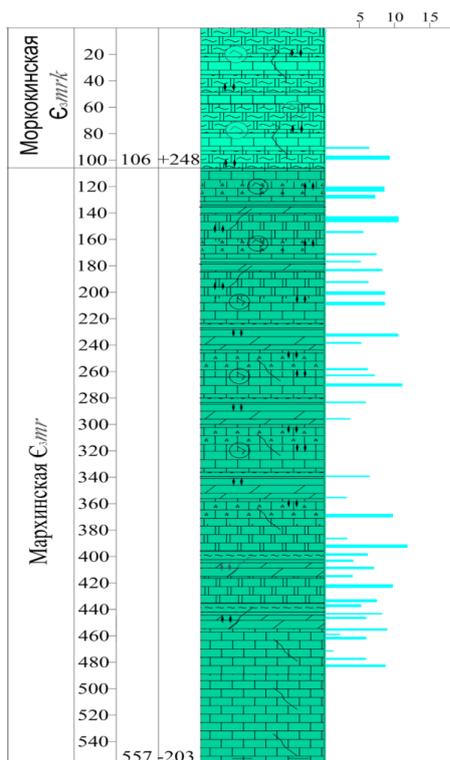


Рисунок 1 – Схема коллекторов верхнекембрийского водоносного комплекса.

Водоносный комплекс напорный. Напоры над кровлей в естественных условиях ~20-50 м. Коэффициент проводимости (Т) составляет от 0,001 до 0,3 (редко до 1,0) м²/сут. Водоносный комплекс, при полном дренировании формирует притоки к карьере рудника Удачный (радиусом 1200 м) 10 м³/сут. В настоящее время водоносный комплекс в пределах карьерного поля существенно сдренирован, в момент вскрытия притоки достигали 1000 м³/сут.

2. Второй от поверхности - среднекембрийский водоносный комплекс, состоящий из двух водоносных горизонтов СВГ-1 и СВГ-2 (рисунок 2). Абсолютная отметка кровли среднекембрийского водоносного комплекса составляет -200/-240 м. Подошвой комплекса служит нижняя часть разреза удачининской свиты, находящаяся на абсолютных отметках -1000/-1050 м. Общая мощность водоносного комплекса достигает 600-650 м, однако, эффективная мощность коллекторов составляет 200-250 м. Водовмещающими породами являются трещиноватые и кавернозные известняки и доломиты нерасчленённой известняково-доломитовой толщи и удачининской свиты.

Первый водоносный горизонт (СВГ-1) приурочен к карбонатным отложениям известняково-доломитовой толщи максимальной мощностью около 480 м. Граница между нижним горизонтом верхнекембрийского и первым водоносным горизонтом среднекембрийского водоносного комплекса проходит по подошве первой пачки мархинской свиты. Подошвой горизонта служат плотные, практически водоупорные эпифитоновые и органогенно-обломочные известняки удачининской пачки нижнего и среднего кембрия. Подземные воды приурочены к пластам-коллекторам в известняках и доломитах, которые составляют около 40 % мощности отложений свиты. Тип коллекторов кавернозно-поровый. Мощность водоносного горизонта не выдержана по площади и изменяется в пределах Далдынского кимберлитового поля от 10 до 480 м [5]. Максимальные значения мощности водовмещающих пород зафиксированы в северо-восточной части флексуры, минимальные – в зоне Октябрьского разлома. Данный факт обусловлен влиянием литолого-фациальных условий, а именно тем, что

породы толщи подстилаются биогермными отложениями удачининской свиты, характер поверхности построек отличается резкой рельефностью. Зона Октябрьского разлома маркируется гребнем барьерного рифа. Отложения толщи характеризуются высокой открытой пористостью и проницаемостью.

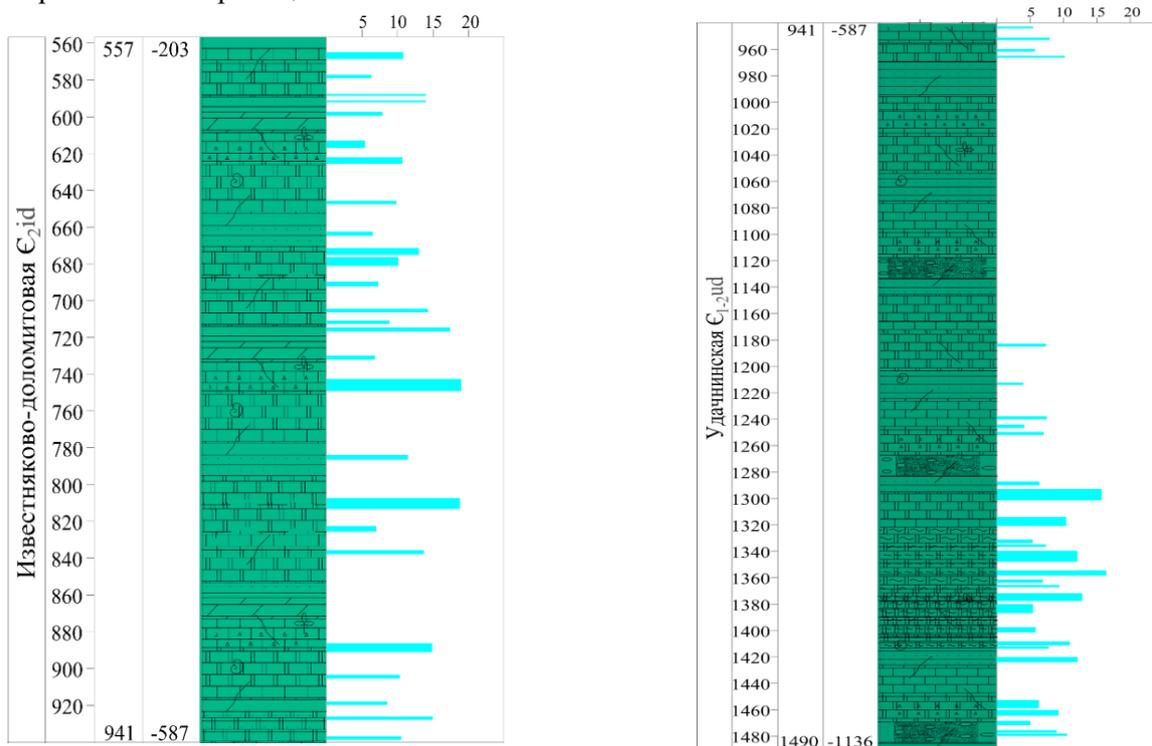


Рисунок 2 – Схема коллекторов СВК: слева – СВГ-1; справа СВГ-2.

Второй водоносный горизонт (СВГ-2) приурочен к удачининской свите, представленной рифовыми кавернозно-трещиноватыми известняками и доломитами (мощностью до 450–500 м). Кровлей водоносного горизонта служат глинистые пачки карбонатных пород. Подошвой горизонта являются плотные, практически водоупорные эпифитоновые и органично-обломочные известняки удачининской свиты. Тип коллекторов водонасыщенных пород горизонта – кавернозно-поровый. По результатам лабораторных исследований керна коэффициент пористости ($K_n^{общ}$) пород, слагающих коллекторы СВГ-2 в пределах Далдынской флексуры, варьирует в пределах 0,4–16,5 % при средней величине 3,55 %.

Водоносный комплекс напорный. Напоры над кровлей в естественных условиях ~350-450 м. Коэффициент проводимости (T) составляет от 2,5 до 40 (редко до 60,0) $m^2/сут$. Водоносный комплекс при полном дренировании будет формировать притоки к подземным горным выработкам рудника Удачный (радиусом 1000 м) 14 000 $m^3/сут$. В настоящее время водоносный комплекс в пределах шахтного поля существенно осушен только в интервале первого среднекембрийского водоносного горизонта (гор. -465 м), приуроченного известняково-доломитовой пачке, приток к подземным горным выработкам рудника составляет до 9 000 $m^3/сут$ [6].

3. Третий от поверхности – нижнекембрийский водоносный комплекс, приуроченный преимущественно к окремненным пористо-кавернозным доломитам кумахской свиты ($C_1 k$) и водорослевым известнякам эмьяксинской ($C_1 em$) свиты. Кровлей водоносного горизонта являются органично-обломочные известняки удачининской свиты, а подошвой – водорослевые известняки эмьяксинской свиты. Абсолютная отметка кровли составляет -1050/-1100 м. Подошвой комплекса служит нижняя часть разреза эмьяксинской свиты, находящаяся на абсолютных отметках -1400/-1450 м. Общая мощность водоносного комплекса достигает 300-350 м, однако, эффективная мощность коллекторов составляет 100-150 м. Водовмещающими породами являются трещиноватые и кавернозные известняки и доломиты кумахской и эмьяксинской свит (рисунок 3).

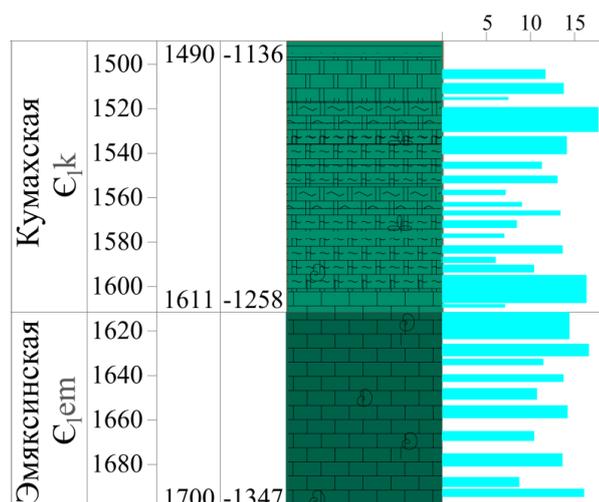


Рисунок 3 – Схема коллекторов нижнекембрийского водоносного комплекса.

По результатам лабораторных исследований керна коэффициент пористости ($K_{п}^{общ}$) пород, слагающих коллекторы НВК в пределах Далдынской флексуры, варьирует в пределах 2,4–16,8 % при средней величине 8,97 %. Водоносный комплекс напорный. Напоры над кровлей в естественных условиях ~ 1000-1200 м. Коэффициент проводимости (Т) составляет от 15 до 100 (редко до 150-200) м²/сут. Водоносный комплекс при полном дренировании будет формировать притоки к подземным горным выработкам рудника Удачный (радиусом 1000 м) 40 000 м³/сут. В настоящее время водоносный комплекс не вскрыт. Планируемая дата вскрытия конец 30-х годов XXI века.

3. Выводы

Отличительными особенностями Далдынского кимберлитового поля являются:

- влияние Далдынской флексуры на формирование фильтрационных свойств коллекторов среднекембрийского и нижнекембрийского водоносных комплексов;
- обратная (аномальная) вертикальная зональность, увеличение водообильности водоносных комплексов с глубиной, которая обусловлена синергетическим влиянием структурно-тектонических, литолого-фациальных и криогидрогеологических условий, а также их изменениями в различные геологические периоды;
- все выделяемые в разрезе рассолы имеют хлоридно-кальциевый или хлоридно-магниевый-кальциевый состав.

4. Литература

- [1] Kolganov V.F., Akishev A.N., Drozdov A.V. Mining and geological features of primary diamond deposits in Yakutia. – Mirny, 2013. – P. 96-121.
- [2] Hydrogeology of the USSR. Vol. XX. Yakut ASSR. – Moscow: Nedra, 1970. – P. 83-100.
- [3] Drozdov A.V., Iost N.A., Lobanov V.V. Cryohydrogeology of diamond deposits in Western Yakutia. – Irkutsk: ISTU, 2008. – 507 p.
- [4] Klimovsky I. V., Gotovtsev S. P. Cryolithozone of the Yakut diamondiferous province. – Novosibirsk: Nauka, 1994. – 167 p.
- [5] Yannikov A.M. Hydrodynamic characteristics of the Udachnaya suite in the near-pipe massif of the Udachnaya pipe (RS (Yakutia)) // Structure of the lithosphere and geodynamics: Proceedings of the XXIX All-Russian Youth Conference. – 2021. – P. 302-304.
- [6] Yannikov A.M., Zyryanov I.V., Korepanov A.Yu., Struchkova A.S. Dynamics and forecast of changes in the hydrodynamic regime of the Lower Cambrian aquifer within the Daldynskaya flexure // Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal). – 2022. – No. 9. – P. 60-7

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Sun J. 123
Абишева А.В. 415
Адаров Т.Д. 254
Акимова Е.Д. 10
Александров А.Р. 450
Алексеев В.И. 16
Алексеев И.В. 16
Анисимова Г.С. 19, 24, 109, 144, 491
Афанасьев В.П. 29, 222, 230
Бабич В.В. 171
Бабушкина С.А. 34
Баранов В.В. 298
Батугина Н.С. 40
Богданов А.И. 92
Богомоллов Е.С. 234
Боескорров Г.Г. 44
Бондарь Н.А. 308
Ботвин Г.В. 206
Бубнова А.Р. 460
Васильев Д.А. 309, 386
Васильев М.С. 422
Васильева О.И. 428
Васильева Т.И. 431
Верниковская А.Е. 393
Виноградова Н.П. 234
Винокуров А.А. 435
Герасимов Б.Б. 320
Гибшер А.А. 373
Глухов А.Н. 50, 106
Глязнецова Ю.С. 76, 439
Гоголева С.С. 267
Гололобова А.Г. 444
Горохов И.В. 52, 506
Горячев И.Н. 57
Горячев Н.А. 57
Гриненко В.С. 314
Гудин А.Н. 251
Данилов К.П. 52
Дарьин А.В. 171
Дарьин Ф.А. 171
Двуреченская С.С. 127
Декабрёв И.К. 115
Докучиц Э.Ю. 245
Дриль С.И. 389
Дубовченко Л.В. 254
Ерофеевская Л.А. 450
Ершова В.Б. 309, 386
Ефимов С.Е. 450
Ефремов В.С. 506
Жарков А.М. 378
Жирков А.Ф. 455
Журавлев А.И. 320, 325
Заика В.А. 389
Зинчук М.Н. 62
Зинчук Н.Н. 62, 68
Зуева И.Н. 76, 439
Иванов А.И. 320, 325
Иванов А.С. 329
Иванов В.К. 460
Иванов В.В. 82
Иванов Д.В. 82
Иванов М.А. 88
Иванов М.С. 320, 325
Иванова И.К. 460, 514
Исакова Т.А. 206
Кадильников П.И. 393
Каймонов М.В. 465
Калачева Л.П. 460
Калугин И.А. 171
Каминская А.В. 469
Камо С. 344
Канева Е.В. 92, 245
Кардашевская В.Н. 24, 109
Карманов Н.С. 222
Каширцев В.А. 76
Килижеков О.К. 96
Килясов А.Н. 334
Киричкова А.И. 314
Климов Е.Н. 103
Козьмин Б.М. 366
Колова Е.Е. 50, 106
Колосов П.Н. 338
Кондратьева Л.А. 24, 109
Коногорова Д.В. 201
Константинов И.К. 115
Константинов К.М. 115, 267
Копылова А.Г. 121
Корнилова В.П. 190
Королева О.В. 344
Королюк В.Н. 222
Костровицкий С.И. 123
Кравченко А.А. 303
Кряжев С.Г. 127
Кудрин М.В. 132, 217, 393
Куляндина А.С. 347, 534
Кутыгин Р.В. 334, 353, 369
Лебедева Л.С. 506
Лебедева М.П. 520
Левин Б. 356, 361
Левина С.Н. 471
Легостаева Я.Б. 431, 476
Леонтьев С.П. 88
Литвиненко И.С. 159
Лифшиц С.Х. 76, 439
Лоскутов Е.Е. 325
Лыткин В.М. 501
Львова О.С. 439
Макаров А.А. 366
Макаров В.Н. 482
Макошин В.И. 369
Мальковец В.Г. 373
Матушкин Н.Ю. 393
Мещеряков В.А. 136
Милаушкин М.В. 373
Милушкин К.С. 415
Митичкин М.А. 245
Молчанов В.П. 140
Моралев Г.В. 251
Муксунова Ю.И. 428, 476
Мурзин Ю.А. 487
Мустафин С.К. 144, 152, 415, 491
Мухамедьяров М.Г. 190, 196
Нестерова Е.А. 497
Никифорова З.С. 165

- Николаев А.И. 298
 Николаева Н.Н. 497
 Новиков В.С. 171
 Оболкин А.П. 173
 Овчинников И.М. 178
 Огонеров В.В. 506
 Округин А.В. 184
 Олейников О.Б. 190, 196, 285
 Опарин Н.А. 190
 Орлова Г.В. 115
 Оросина Ч.С. 240
 Охлопкова И.Ф. 338
 Ощепкова М.Г. 196
 Павлова В.В. 206
 Павлова К.А. 378
 Павлова М.Р. 501
 Павлова Н.А. 506
 Павлушин А.Д. 201
 Пестрякова Л.А. 471
 Петров В.В. 206
 Петров О.В. 234
 Петрова Е.А. 382
 Петухова Е.С. 52, 206
 Погодаев А.В. 211
 Полубелова А.В. 506
 Полуфунтикова Л.И. 132, 217
 Полянский О.П. 344
 Попов В.И. 512
 Попов В.Ф. 428, 476
 Попов Н.В. 29
 Портнягин А.С. 435, 460, 514
 Похиленко Л.Н. 29, 222, 230
 Похиленко Н.П. 29, 222, 230
 Прокопьев А.В. 309, 344, 386
 Проскурнин В.Ф. 234
 Проскурнина М.А. 234
 Пуляев Н.А. 240
 Рагозин А.Л. 399
 Радомская Т.А. 92, 245
 Разумов А.Н. 96
 Ракшун Я.В. 171
 Ремизов Д.Н. 234
 Рогозин Д.Ю. 171
 Романис Т.В. 520
 Романов А.П. 234
 Рудых И.И. 211
 Руфова А.А. 523
 Самсонов Н.Ю. 251
 Сачарысов А.С. 254
 Севостьянова Р.Ф. 258
 Сергеев С.А. 234
 Сергин Д.К. 422
 Сивцев А.И. 103, 136
 Сивцев М.А. 455
 Сивцева Н.Е. 476, 529
 Симонов В.А. 96
 Слепцов А.П. 251, 261
 Смирнов Ю.В. 389
 Смирнова Ю.Н. 389
 Соколов Е.П. 24
 Соловьев Т.М. 206
 Сороколетов Д.С. 171
 Специус З.В. 329
 Старостин П.В. 178
 Стокли Д. 386
 Стручков К.К. 152
 Тарасов Я.А. 217, 393
 Тимофеев М.А. 422
 Толстов А.В. 82, 96, 251, 261
 Томшин М.Д. 267
 Трифонов А.Н. 152
 Трунилина В.А. 271, 278
 Туктаров Р.М. 534
 Тычков Н.С. 230
 Угапьева С.С. 285
 Федоров А.Л. 206
 Федотова М.А. 89
 Фридовский В.Ю. 132, 217, 288, 393
 Хосоев Д.В. 292
 Христофоров И.И. 52, 506
 Чалая О.Н. 76, 439
 Чепрасов М.Ю. 52
 Черемных А.В. 115
 Чёрный Р.И. 254
 Чжан Т.Р. 550
 Черепанова А.М. 539, 546
 Чириков А.А. 206
 Шадринова О.В. 542
 Шацкий В.С. 399
 Шендрик Р.Ю. 92, 245
 Шепелев А.Г. 539, 546
 Шибаетов С.В. 534
 Шкодзинский В.С. 405, 410
 Эверстова Д.Г. 88
 Эрнст Р. 344
 Юдаков А.А. 140
 Яковлев И.В. 373
 Яковлева Л.Н. 550
 Янников А.М. 553
 Яхин Ш.М. 96

Научное издание

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

Материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции
21-24 марта 2023 г.

Выпускается в авторской редакции

Дата подписания к использованию 24.10.2023. Электронное издание.

Объем 30,0 Мб. Тираж 10 дисков. Заказ № 221.

Минимальные системные требования:

процессор с тактовой частотой 1,3 Гц и выше, оперативная память 128 Мб,
операционные системы: Microsoft Windows XP/Vista/7/8/10, ОС MAC OS версии 10,8.

Издательский дом Северо-Восточного федерального университета,
677891, г. Якутск, ул. Петровского, 5. E-mail: izdat-svfu@mail.ru

Изготовлено с готового оригинал-макета в Издательском доме СВФУ