310 лет

СБОРНИК ТЕЗИСОВ

Научная конференция,
посвящённая 310-летию
Минералогического музея
имени А.Е. Ферсмана РАН

28 сентября — 2 октября 2026



Минералогический музей
имени А.Е. Ферсмана РАН

Москва
2026



Минералогический музей
имени А.Е. Ферсмана РАН

310 ЛЕТ

СБОРНИК ТЕЗИСОВ

Научная конференция,
посвящённая 310-летию
Минералогического музея
имени А.Е. Ферсмана РАН

28 сентября — 2 октября 2026 года

Москва
2026

Сборник тезисов научной конференции, посвящённой 310-летию Минералогического музея имени А. Е. Ферсмана РАН. 28 сентября – 2 октября 2026 года.

Сборник содержит тезисы докладов научной конференции, посвящённой 310-летию Минералогического музея имени А. Е. Ферсмана Российской академии наук, состоявшейся 28 сентября – 2 октября 2026 года в Москве.

В издании представлены результаты исследований в области минералогии, кристаллохимии, минералогии алмаза, рудной минералогии, геммологии, минералогии метеоритов, инструментальных методов исследования минералов, а также работы, посвящённые истории минералогических исследований, музейным коллекциям и вопросам сохранения минералогического наследия.

Материалы сборника сгруппированы по тематическим секциям конференции. Отдельные заседания посвящены 100-летию со дня рождения Ю. Л. Орлова, 90-летию В. С. Урусова и 80-летию В. С. Чернавцева.

Сборник предназначен для научных сотрудников, специалистов в области наук о Земле, преподавателей, аспирантов, студентов и работников естественно-научных музеев.

Тезисы публикуются в авторской редакции.

Организатор конференции: Минералогический музей имени А. Е. Ферсмана РАН.

Москва, 2026

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Плечов Павел Юрьевич — председатель Программного комитета, директор Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН, профессор РАН.

Гаранин Виктор Константинович — руководитель научной темы Минмузея РАН, академик РАЕН.

Бортников Николай Стефанович — академик РАН, академик-секретарь Отделения наук о Земле РАН, научный руководитель ИГЕМ РАН.

Горячев Николай Анатольевич — академик РАН, научный руководитель Северо-Восточного комплексного научно-исследовательского института им. Н.А. Шило ДВО РАН.

Дегтярёв Кирилл Евгеньевич — академик РАН, директор Геологического института РАН.

Когарко Лия Николаевна — академик РАН, заведующая лабораторией геохимии и рудоносности щелочного магматизма ГЕОХИ РАН.

Костицын Юрий Александрович — академик РАН, главный научный сотрудник Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН.

Кривовичев Сергей Владимирович — академик РАН, директор Кольского научного центра РАН.

Ерёмин Николай Николаевич — член-корреспондент РАН, декан геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Крук Николай Николаевич — член-корреспондент РАН, директор Института минералогии и геологии им. В.С. Соболева СО РАН.

Пеков Игорь Викторович — член-корреспондент РАН, заведующий кафедрой минералогии МГУ имени М.В. Ломоносова.

Петров Владислав Александрович — член-корреспондент РАН, директор ИГЕМ РАН.

Марин Юрий Борисович — член-корреспондент РАН, почётный Президент Российского минералогического общества, профессор Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II.

Хамизов Руслан Хажсетович — член-корреспондент РАН, директор Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН).

Брусницын Алексей Ильич — доктор геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой минералогии Института наук о Земле СПбГУ.

Козлов Александр Владимирович — доктор геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой геологии и разведки МПИ Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II.

Коровко Андрей Анатольевич — директор Всероссийского научно-исследовательского института минерального сырья им. Н.М. Фёдоровского (ФГБУ «ВИМС»).

Мелекесцева Ирина Юрьевна — кандидат геолого-минералогических наук, руководитель Института минералогии Южно-Уральского федерального центра минералогии и геоэкологии УрО РАН.

Оганов Артём Ромаевич — доктор физико-математических наук, профессор РАН.

Сафонов Олег Геннадиевич — доктор геолого-минералогических наук, директор Института экспериментальной минералогии РАН, профессор РАН.

Черкасов Сергей Владимирович — доктор технических наук, директор Геологического музея им. В.И. Вернадского РАН.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Ключникова М.К. — руководитель орг. комитета

Борисова Е.А.

Донченко Д.Р.

Жданов А.Г.

Карпов А.О.

Коновалова К.А.

Кронрод Е.В.

Купринова В.А.

Щеклеина М.Д.

Содержание

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ 9
Плечов П.Ю. 310 ЛЕТ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО МУЗЕЯ ИМ. А.Е. ФЕРСМАНА 10

АЛМАЗНАЯ СЕКЦИЯ 12
Васильев Е. А., Гембицкая И. М., Сухарев А. Е. РАДИАЦИОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В АЛМАЗЕ И ЗАГАДКА ГЕНЕЗИСА КАРБОНАДО 13
Вяткин С. В., Криулина Г. Ю. МНОГООБРАЗИЕ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ В АЛМАЗЕ 14
Гаранин В.К. К 100-летию СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ОРЛОВА ЮРИЯ ЛЕОНИДОВИЧА, ИЗВЕСТНОГО СОВЕТСКОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЯ АЛМАЗА, ДИРЕКТОРА МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО МУЗЕЯ ИМЕНИ А.Е. ФЕРСМАНА..... 20
Глушкова И.В., Седых Е.М., Лодыгина В.Ю., Монхоров Р.В., Бардухинов Л.Д., Липашова А.Н., Демидова Л.А. СИСТЕМАТИКА И ГЕНЕЗИС МОРФОЛОГИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ АЛМАЗОВ 22
Кошкарев Д. А. ПУТИ И ПРИНЦИПЫ РАЗВИТИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ РАБОТ В АК «АЛРОСА» В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ 27
Мальковец В. Г., Гибшер А. А., Яковлев И. В., Милаушкин М. В. РОЛЬ МАНТИЙНОГО МЕТАСОМАТОЗА В ПРОЦЕССАХ РОСТА И РАСТВОРЕНИЯ АЛМАЗОВ В КРАТОННОЙ ЛИТОСФЕРНОЙ МАНТИИ 30
Новочадов С. Л., Титков С.В., Прокофьев В. Ю. ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АЗОТНЫХ ДЕФЕКТОВ В КРИСТАЛЛАХ ПРИРОДНЫХ АЛМАЗОВ ПО ДАННЫМ ИК-МИКРОСПЕКТРОСКОПИИ 33
Ощепкова М. Г., Рагозин А. Л., Олейников О. Б. НЕОБЫЧНАЯ МИНЕРАЛЬНАЯ АССОЦИАЦИЯ В КСЕНОЛИТЕ ИЗ ТРУБКИ ОБНАЖЕННАЯ (БИРЕКТИНСКИЙ ТЕРРЕЙН) 36
Павлушин А. Д., Демидова Л. А., Иванов К. О. НОВЫЕ ФОРМЫ МНОГОКРАТНОГО ДВОЙНИКОВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ АЛМАЗА ИЗ КОЛЛЕКЦИИ КОМПАНИИ «АЛРОСА» 39
Пальянов Ю. Н., Баталева Ю. В., Борздов Ю. М., Куприянов И. Н. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ АЛМАЗА В ВОССТАНОВЛЕННОЙ МЕТАЛЛСОДЕРЖАЩЕЙ МАНТИИ 42
Титков С.В. О ФОРМАХ РОСТА АЛМАЗОВ РАЗНОВИДНОСТИ I ПО КЛАССИФИКАЦИИ Ю.Л.ОРЛОВА 45
Угапьева С.С., Ощепкова М.Г., Биллер А.Я., Павлушин А.Д. ВКЛЮЧЕНИЯ МИНЕРАЛОВ В ПОЛУПРОЗРАЧНЫХ АЛМАЗАХ ИЗ РОССЫПЕЙ АНАБАРСКОГО АЛМАЗОНОСНОГО РАЙОНА (СЕВЕРО-ВОСТОК СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ) 49
Шацкий А.Ф. УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ АЛМАЗООБРАЗУЮЩИХ РАСПЛАВОВ-ФЛЮИДОВ ... 52
Ширяев А. А., Генералов М. Е., Аверин А. А. ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗЕРЕН В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ АЛМАЗАХ 54

КРИСТАЛЛОХИМИЧЕСКАЯ СЕКЦИЯ 57
Аксенов С.М., Чуканов Н.В., Расцветаева Р.К. ГЕНЕТИЧЕСКАЯ КРИСТАЛЛОХИМИЯ И СТРУКТУРНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ МОДУЛЯРНЫХ МИНЕРАЛОВ: ОТ ПРОСТЫХ К СЛОЖНЫМ 58
Вайтиева Ю.А., Чуканов Н.В., Аксенов С.М. КРИСТАЛЛОХИМИЯ И ТОПОЛОГИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР С СИЛЬНЫМИ ВОДОРОДНЫМИ СВЯЗЯМИ НА ПРИМЕРЕ ПРИРОДНЫХ ФОСФАТОВ И МИНЕРАЛОВ ГРУППЫ ЛАБУНЦОВИТА 63
Еремин Н.Н. РАЗВИТИЕ ИДЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ КРИСТАЛЛОХИМИИ В ТРУДАХ В.С.УРУ-

СОВА 68
Иванова Л. А., Демина А. А., Золотарев А. А., Белаковский Д. И., Каримова О. В. УТОЧНЕНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ СОБОЛЕВСКИТА PdBi 71
Киреев В. Е., Чаркин Д. О., Сийдра О. И., Аксенов С. М. НОВЫЕ МИНЕРАЛОПОДОБНЫЕ ОКСОГАЛОГЕНИДЫ СВИНЦА С ГЛЕТОПОДОБНЫМИ СЛОЯМИ 76
Оганов А. Р. ЭЛЕКТРООТРИЦАТЕЛЬНОСТЬ И ХИМИЧЕСКОЕ СРОДСТВО ЭЛЕМЕНТОВ 79
Паникоровский Т. Л. ТРАНСФОРМАЦИОННЫЕ МИНЕРАЛЫ КОЛЬСКОЙ ЩЕЛОЧНОЙ ПРОВИНЦИИ 81
Чудецкий М. Ю. КРИСТАЛЛЫ ГЛИНИСТЫХ МИНЕРАЛОВ В РОЛИ КВАЗИРИБОСОМ ПЕРВЫХ ПРОТООРГАНИЗМОВ 84

НОВЫЕ И РЕДКИЕ МИНЕРАЛЫ 87
Агаханов А.А., Паутов Л.А., Карпенко В.Ю. МИНЕРАЛОГИЯ ЦЕЗИЯ 88
Булах М.О., Шендрик Р.Ю., Япаскурт В.О., Пеков И.В. О ПРИРОДЕ ОКРАСКИ ГОЛУБОГО И ЗЕЛЕНОГО ТУГТУПИТА ИЗ ЛОВОЗЁРСКОГО МАССИВА (КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ) 98
Карпов А. О., Касаткин А. В., Савченко Е. Э., Агаханов А. А., Паутов Л. А., Пеков И. В. БАРИЕВЫЕ ФОСФАТЫ НАДГРУППЫ АПАТИТА ИЗ МЕСТОРОЖДЕНИЯ АПАТИТОВЫЙ ЦИРК (ХИБИНЫ, КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ) 101
Опарин Н.А., Корсаков А.В., Олейников О.Б. ПЕРВАЯ НАХОДКА ЦИРКОНИЙСОДЕРЖАЩИХ ГРАНАТОВ В КИМБЕРЛИТАХ ЯКУТИИ 104
Потехина Н.В., Пеков И.В., Бритвин С.Н., Жегунов П.С. НОВЫЙ СУЛЬФАТ СИСТЕМЫ K2SO4–NA2SO4–CUSO4 ИЗ ФУМАРОЛЬНЫХ ЭКСГАЛЯЦИЙ ВУЛКАНА ТОЛБАЧИК (КАМЧАТКА) 110
Стрельников М.В., Пеков И.В., Зубкова Н.В., Япаскурт В.О., Мусихин К.А., Гридчина В.М. ПЕРВЫЙ ПРИМЕР ШИРОКОГО ИЗОМОРФИЗМА S – SE В КИСЛОРОДНЫХ МИНЕРАЛАХ: РЯД ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ ЛИНАРИТ–МУНАКАТАИТ ИЗ ЗОНЫ ГИПЕРГЕНЕЗА ПАЛЕОФУМАРОЛ ГОРЫ 1004 (ВУЛКАНИЧЕСКИЙ МАССИВ ТОЛБАЧИК, КАМЧАТКА) 113
Шарыгин В. В., Лазарева Е. В., Ращенко С. В., Белякова А. Ю. K-BA-FE-ТИТАНАТЫ В ПОРОДАХ ТОМТОРСКОГО МАССИВА, РЕСПУБЛИКА САХА (ЯКУТИЯ) 116

РУДНАЯ МИНЕРАЛОГИЯ 122
Гореликова Н.В., Чижова И.А. КАССИТЕРИТ КАК ИНДИКАТОР ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ОЛОВОНОСНЫХ РУДНО- МАГМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СИХОТЭ-АЛИНСКОГО ОРОГЕННОГО ПОЯСА 123
Гриценко Ю.Д., Михайлов А.С, Пащенко А.К, Верещагин О.С., Хмельницкая М.О. МИНЕРАЛЬНЫЕ АССОЦИАЦИИ ПРОЯВЛЕНИЙ САМОРОДНОГО ЖЕЛЕЗА В ТРАППОВЫХ МАССИВАХ СИБИРИ 128
Колова Е. Е., Глухов А.Н. ЗОЛОТО-РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫЕ (AU-BI-W) РУДНЫЕ СИСТЕМЫ КОЛЫМЫ 133
Мелекесцева И. Ю., Котляров В. А. ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ В РУДАХ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СУЛЬФИДНЫХ ПОЛЕЙ РОССИЙСКОГО РАЗВЕДОЧНОГО РАЙОНА, СРЕДИННО- АТЛАНТИЧЕСКИЙ ХРЕБЕТ 136
Мираков М.А., Паутов Л.А., Спиридонов Э.М. МИКРОЛИТ-ПИРОХЛОР С ОБРАТНОЙ ЗОНАЛЬНОСТЬЮ В РЕДКОМЕТАЛЬНЫХ ГРАНИТНЫХ ПЕГМАТИТАХ ПАМИРА — ИНДИКАТОР ПРОЯВЛЕНИЯ ИНВЕРСИОННОГО ЭТАПА РАЗВИТИЯ ЭТИХ ПЕГМАТИТОВ 140
Спиридонов Э.М., Мурашко М.Н., Девнина Н.Н., Япаскурт В.О., Куликова И.М., Коротаева Н.Н. ГИПОТЕРМАЛЬНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ ГИГАНТСКОГО ВУЛКАНОГЕННОГО КОЛЧЕ-

ДАННО- ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО AG-CD-AS-GA-GE-ZN-CU-PB МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЦУМЕБ, НАМИБИЯ: ВЫСОКИЙ ХАЛЬКОЗИН, ТОПАЗ, КВАРЦ, ФТОРАПАТИТ, ТВЁРДЫЙ РАСТВОР СФАЛЕРИТ - ГАЛЛИТ, СЕРИЯ ОВАМБОИТ CU20(CU,FE)6W2(GE,AS)6S32– МАЙКАИНИТ CU20(CU,FE)6MO2(GE,AS)6S32, ФЛОГОПИТ, ГАЛЕНИТ, ПИРИТ, СТАННОИДИТ 143
Стифеева М. В., Гриценко Ю. Д., Сальникова Е. Б., Адамская Е. В. CA-FE ГРАНАТЫ – ИСТОЧНИК ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКОЙ И ГЕНЕТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ В НОРИЛЬСКОМ РУДНОМ РАЙОНЕ 146

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ В МИНЕРАЛОГИИ 150
Бадьянова Л. В., Вяткин С. В. ЭПР-СПЕКТРОСКОПИЯ И ФОТОХРОМИЗМ БАРИТА ИЗ БЕЛОРЕЧЕНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (СЕВЕРНЫЙ КАВКАЗ)..... 151
Карпенко В.Ю., Паутов Л.А., Агаханов А.А. ОБ ОПЫТЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА CHN-АНАЛИЗА С ГАЗОХРОМАТОГРАФИЧЕСКИМ ОКОНЧАНИЕМ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ МИНЕРАЛОВ В МИНЕРАЛОГИЧЕСКОМ МУЗЕЕ ИМ. А.Е. ФЕРСМАНА РАН 159

ГЕММОЛОГИЧЕСКАЯ СЕКЦИЯ 165
Ахметшин Э. А., Смирнова В. В. МОДИФИЦИРОВАНИЕ ЦВЕТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АЛЕКСАНДРИТОВ МЕТОДОМ ТЕРМООБРАБОТКИ В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ 166
Герасимова Е.И. СУДЕБНАЯ МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ ЭКСПЕРТИЗА АЛМАЗОВ – СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ И ПРАВОВОЕ ЗНАЧЕНИЕ 174
Кислов Е. В. ГЕММОЛОГИЯ НЕФРИТА ХАМАРХУДИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ, ЗАПАДНЫЙ ХАМАР-ДАБАН 178
Климкин И. А., Ахметшин Э. А. ОБЛАГОРАЖИВАНИЕ БЕСЦВЕТНЫХ БЕРИЛЛОВ ГАММА-ОБЛУЧЕНИЕМ 182
Криулина Г.Ю., Бардухинов Л.Д., Вяткин С.В. УНИКАЛЬНЫЕ АЛМАЗЫ РОССИИ РЕДКИХ ЦВЕТОВЫХ ОТТЕНКОВ 188
Павлидис С.Б., Васина А.И., Миденко Я.М. DLC-ПОКРЫТИЯ (DIAMOND-LIKE CARBON) ДЛЯ БРИЛЛИАНТОВ 190
Чернышева Е. А. КОМПЛЕКСНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ КРАСНОЙ И СИНЕЙ ШПИНЕЛИ 193
Шелементьева А.Ю., Шелементьев Ю.Б. СТРУКТУРНО-ПРИМЕСНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ БЕСЦВЕТНЫХ ГРОССУЛЯРОВ ИЗ АФРИКИ 196

МИНЕРАЛОГИЯ МЕТЕОРИТОВ 199
Демидова С. И., Лахманова Л. А. ПОЗДНИЙ МИНЕРАЛЬНЫЙ ПАРАГЕНЕЗИС В МАТЕРИКОВЫХ ПОРОДАХ МАГНЕЗИАЛЬНОЙ СЕРИИ ОБРАЗЦА «ЛУНЫ-16» КАК ИНДИКАТОР ПРИСУТСТВИЯ KREEP-КОМПОНЕНТА 200
Камашева С. К., Рязанцев К.М., Лоренц К.А. ПЕРВАЯ НАХОДКА ФОСФОРСОДЕРЖАЩЕГО ОЛИВИНА В МЕЗОСИДЕРИТАХ 203
Лахманова Л. А., Демидова С. И., Аносова М.А. МАТЕРИКОВЫЕ ПОРОДЫ МАГНЕЗИАЛЬНОЙ СЕРИИ ВО ФРАГМЕНТЕ БАЗАЛЬТОВОЙ БРЕКЧИИ ЛУННОГО МЕТЕОРИТА DHOFAR 287 .....
..... 207
Савва Н.Е. ЭКЗОТИЧЕСКИЕ НАХОДКИ КРУПНЫХ ФРАГМЕНТОВ ТЕЛ, СЛОЖЕННЫХ СИЛИЦИДАМИ ЖЕЛЕЗА, НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ (РОССИЯ, ЗАБАЙКАЛЬЕ И МАГАДАНСКАЯ ОБЛАСТЬ) 210
Шарыгин В. В., Вишневский А. В. МИНЕРАЛОГИЯ КОРЫ ПЛАВЛЕНИЯ LL6 ХОНДРИТА ОКУЛОВКА, НОВГОРОДСКАЯ ОБЛАСТЬ 217

МУЗЕЙНАЯ СЕКЦИЯ 222
Васюкова Е.А., Кальнеус Е.Г. ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ МУЗЕЙ В СИСТЕМЕ ПРЕДМЕТНО- ЯЗЫКОВОГО ОБУЧЕНИЯ (АНГЛИЙСКИЙ ЯЗЫК) В ШКОЛЕ 223
Генералов М.Е. МИНЕРАЛЫ ПЛАТИНОИДОВ ИЗ СТАРЫХ КОЛЛЕКЦИЙ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО МУЗЕЯ ИМ. А.Е. ФЕРСМАНА 225
Громалова Н. А., Набелкин О. А., Чехович П. А. ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА МЕМОРИАЛЬНОЙ КОЛЛЕКЦИИ В МУЗЕЕ ЗЕМЛЕВЕДЕНИЯ МГУ 229
Иванова Л.А., Данилова Ю.В. ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ МУЗЕЙ – ОТДЕЛ ИСТОРИИ ИНСТИТУТА ИЗК СО РАН 234
Ильин Г. С., Павлова Т.М. НАСЛЕДИЕ В СВЕТЕ: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦИФРОВКИ И АТРИБУЦИИ ВИЗУАЛЬНОГО НАСЛЕДИЯ АКАДЕМИКА А. Е. ФЕРСМАНА ИЗ ФОНДОВ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО МУЗЕЯ РАН 237
Карсакова Т.Н. ПАМЯТНИКИ КУЛЬТУРЫ ИЗ КАМНЯ С ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗ КОЛЛЕКЦИИ «МУЗЕЯ МОСКВЫ». КРАТКИЙ ОБЗОР 243
Манукян А. Р. ПАЛЕОТАКСОНОМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ФАУНЫ БАЛТИЙСКОГО ЯНТАРЯ НА ПРИМЕРЕ ДАРВИНОВСКИХ ОС (HYMENOPTERA, ICHNUEMONIDAE) 244
Пармузина И.С. ПУТЬ КАМНЯ: ИСТОРИЯ ПОСТУПЛЕНИЯ ЭКСПОНАТОВ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО МУЗЕЯ В ФОТОГРАФИЯХ И ТЕКСТАХ 248
Коровко А. А., Печенкин И. Г. ЛИТОТЕЧНЫЙ ФОНД ВИМСА — НАУЧНОЕ И КУЛЬТУРНОЕ ОТЕЧЕСТВЕННОЕ НАСЛЕДИЕ 256
Рыжков О. В. ОСОБЕННОСТИ СОХРАНЕНИЯ ДОМОНГОЛЬСКИХ БЕЛОКАМЕННЫХ ПАМЯТНИКОВ АРХИТЕКТУРЫ ОКСКО-ВОЛЖСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ 260
Смирнова А.В. ПРИРОДНЫЕ ФОРМЫ БАЛТИЙСКОГО ЯНТАРЯ В КОЛЛЕКЦИИ КАЛИНИНГРАДСКОГО МУЗЕЯ ЯНТАРЯ 263
Соколова Е.Л., Спиридонов Э.М. ПЕЧАТЬ ИЗ «СОЮЗНОГО КАМНЯ» В СОБРАНИИ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО МУЗЕЯ ИМ. А.Е.ФЕРСМАНА РАН 271
Тюльпакова О.Н. СИБАЙСКАЯ ШКОЛА ФЛОРЕНТИЙСКОЙ МОЗАИКИ: ВОЗНИКНОВЕНИЕ, РАЗВИТИЕ, СВЯЗЬ С РОССИЙСКИМ И СОВРЕМЕННЫМ НАСЛЕДИЕМ, ОТЛИЧИЕ ОТ ДРУГИХ НАПРАВЛЕНИЙ РОССИЙСКИХ ШКОЛ ФЛОРЕНТИЙСКОЙ МОЗАИКИ 274
Черненко В.В. МУЗЕЙ И ЧАСТНЫЕ МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ КОЛЛЕКЦИИ. ВОЗМОЖНОСТИ ПРЕЗЕНТАЦИИ 296

Минералогический музей
имени А.Е. Ферсмана РАН

310 ЛЕТ

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ



29 сентября 2026 года

310 ЛЕТ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО МУЗЕЯ ИМ. А.Е. ФЕРСМАНА

Плечов П.Ю.[1] (*pplechov@gmail.com*)

[1]*Минмузей РАН, г. Москва*

Ключевые слова: *Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, история минералогии, комплексное освоение территорий, новые минералы, цифровизация коллекций, метеоритика, научно-исследовательский музей.*

В 2026 году Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН (Минмузей РАН) отмечает 310-летие. Основанный в 1716 году по указу Петра I, он изначально создавался не как кабинет редкостей, а как фундаментальная научная база для изучения и освоения колоссальных территорий и природных богатств Российской империи. На протяжении трех веков Музей неразрывно связан с геологическим исследованием страны, исторически сформировавшись и навсегда сохранив статус действующего научно-исследовательского института в формате музея.

Формирование первых коллекций было напрямую сопряжено с масштабными академическими экспедициями по изучению России. Труды П.С. Палласа, И.Г. Гмелина, М.В. Ломоносова, В.М. Севергина и Н.И. Кокшарова заложили основы систематизации минеральных ресурсов страны. Музейные образцы служили эталонной базой для развития горного дела, металлургии и составления первых геологических карт, фактически обеспечивая научную основу для промышленного освоения Урала, Сибири и Алтая.

В XX веке, под руководством В.И. Вернадского и А.Е. Ферсмана, Музей стал основным центром формирования научных кадров и многих научных направлений. Его сотрудники стояли у истоков открытия и промышленного освоения ключевых месторождений Кольского полуострова, Средней Азии и Сибири. В периоды индустриализации и Великой Отечественной войны научно-исследовательская работа Музея имела критическое оборонное и экономическое значение, обеспечивая страну стратегическим сырьем и новыми технологиями его переработки.

Сегодня Минмузей РАН продолжает эту традицию, интегрируя классическую музейную школу с передовыми методами изучения минералов. Фонды насчитывают более 152 тысяч экспонатов. За последние 10 лет научный коллектив открыл более 100 новых минералов (один из лучших мировых показателей), многие из которых являются концентраторами редких и стратегических металлов, критически важных для современного высокотехнологичного производства. С 2018 года Музей выступает международным регистратором метеоритов, изучая внеземное вещество и импактные процессы.

Ответом на вызовы времени стала масштабная трансформация инфраструктуры. Проведенная в 2022–2025 гг. модернизация фондохранилищ и экспозиций сопровождалась тотальной оцифровкой: свыше 150 тысяч образцов сфотографированы и интегрированы в открытую информационную систему.

Созданы базы данных составов минералов и колебательных спектров (ArDi), сформирован научно-исследовательский фонд для обмена веществом и аналитическими данными с учеными всего мира. Начаты масштабные работы по оцифровке каталогов и архива Музея.

310-летняя история Минмузея РАН демонстрирует удивительную преемственность: от первых экспедиций XVIII века до современных минералогических исследований он всегда оставался научным форпостом страны. Уникальный статус научно-исследовательского музея обеспечивает сохранность накопленного за три века научного наследия России, что будет и дальше служить надежной основой для фундаментальных открытий, поиска новых материалов и технологического суверенитета государства.

Минералогический музей
имени А.Е. Ферсмана РАН

310 ЛЕТ

АЛМАЗНАЯ СЕКЦИЯ

посвящённая 100-летию
Ю. Л. Орлова



28 сентября 2026 года

РАДИАЦИОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В АЛМАЗЕ И ЗАГАДКА ГЕНЕЗИСА КАРБОНАДО

Васильев Е. А.[1] (*ea_vasilev@pers.spmi.ru*), **Гембицкая И. М.**[1], **Сухарев А. Е.**[2]

[1]*Санкт-Петербургский Горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург,*
[2]*Институт Геологии Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар*

Аннотация: в кайме толщиной до 30 мкм вокруг включений и пор в карбонадо выявлено тушение фото- и катодолюминесценции, сдвиг линии комбинационного рассеяния от 1331 до 1312 см$^{-1}$, ее уширение от 5 до 40 см$^{-1}$. Результаты исследования указывают на протогенетическую природу радиоактивных компонентов в карбонадо.

Ключевые слова: *алмаз, карбонадо, фотолюминесценция, облучение, дефекты кристаллической структуры*

Одной из нерешенных задач в минералогии алмаза является определение генезиса карбонадо – мелкокристаллического агрегата, насыщенного порами и включениями. Эта разновидность эндемична для кратонов Сан Франциско и Конго, которые имели общую геологическую историю до раскрытия Атлантического океана. Характерной и уникальной особенностью карбонадо является высокая концентрация радиационно-индуцированных азотно-вакансионных дефектов NV или N_2V (H3), обуславливающих соответственно интенсивную красную или зеленую фотолюминесценцию. Обнаружение этих дефектов и состав включений позволили Ф. Каминскому [1] выдвинуть гипотезу о радиационно-стимулированном генезисе карбонадо. В.П. Афанасьев с соавторами [2] предложили модель образования карбонадо в шунгитоподобной системе с метаморфизмом сверхвысокого давления. Новая модель генезиса карбонадо была предложена A.Demeny с соавторами [4]. Согласно этой модели, в результате архейского удара произошло погружение органического вещества в мантию, метаморфизм, фрагментация алмазоносного слоя и выброс кимберлитовой магмы в результате вулканической активности. В этой работе предполагается вторичная инфильтрация радиоактивного РЗЭ-содержащего флюида в карбонадо. Таким образом, до сих пор существует неопределенность относительно первичной или вторичной природы облучения карбонадо. Для разрешения этой неопределенности авторами проведено изучение связи радиационно-индуцированных изменений вокруг включений с их составом комплексом микроспектроскопических и электронно-зондовых методов.

В работе исследован образец карбонадо MtGrC1 из россыпи штата Мато–Гросу, Бразилия. Исследования проводились на поверхности свежего скола, прошедшего через центр образца. Сразу после раскалывания, на образец была напылена углеродная пленка и он помещен в вакуумную камеру СЭМ. Рельеф поверхности и состав фаз изучался методами электронной микроскопии и

колебательной микроспектроскопии. Изученный образец карбонадо имеет поры, свободные от твердых фаз, поры с поверхностью покрытой фазами различного состава, и собственно твердые включения, которые заполняют все пространство между алмазными кристаллитами. Вокруг всех включений и пор алмаз не люминесцирует под воздействием ультрафиолетового излучения и электронного пучка. Темная кайма на границе раздела сред вокруг включений и пор явно указывает на то, что источником радиоактивности было их содержимое. Линия комбинационного рассеяния света в алмазе смещается с 1331 $см^{-1}$ в объеме до 1312 $см^{-1}$ на поверхности пор и включений. Ширина линии комбинационного рассеяния увеличивается с 5 $см^{-1}$ в объеме до 40 $см^{-1}$ на поверхности пор и включений. Таким образом, участки алмаза с максимальной дозой облучения — это слои толщиной менее 30 мкм, расположенные на поверхности пор и включений. Поверхностный характер облучения алмаза вокруг пор и включений объясняется тем, что основным типом облучения являются альфа-частицы [4]. Максимальная энергия альфа-частицы в серии радиоактивных распадов тория и урана составляет 8,8 МэВ, поэтому глубина их проникновения в алмаз составляет 29 мкм. В монокристаллах алмаза такие области идентифицируются как пятна зеленой или коричневой пигментации. При насыщенной окраске структура алмаза в этих областях очень дефектна и неактивна в катодо- и фотолюминесценции. Интенсивность комбинационного рассеяния света такого алмаза уменьшается на несколько порядков. Источником радиоактивного излучения в исследуемом образце карбонадо является торий, концентрация которого во включениях достигает 0,6% по данным СЭМ-ЭДС. Характерные линии урана в спектрах ЭДС не обнаружены, возможно, из-за их наложения на более интенсивные линии тория и калия. Между тем, уран был описан в карбонадо во многих исследованиях, поэтому преобладание тория является особенностью исследуемого образца или даже изученных включений. Вместе с альфа-частицами продукты распада тория и урана выделяют рентгеновское и бета-излучение, что привело к объемному облучению алмазной матрицы. По-видимому, высокий радиационный фон выступил ключевым фактором в образовании карбонадо через интенсификацию диффузии, что стимулировало как зарождение алмазной фазы, так и рост микрокристаллов. Полученные данные свидетельствуют в пользу сингенетической природы торий-содержащих включений, согласуются с концепцией образования карбонадо в результате метаморфизма REE- и торий-содержащей карбонатной породы.

Список литературы:

1. Каминский Ф. В. Генезис поликристаллических агрегатов алмаза – карбонадо // Доклады АН. – 1987 – Т. 294, № 2 – С. 439–440.
2. Afanasiev V., Kovalevsky V., Yelisseyev A. et al., About the Origin of Carbonado// Minerals. – 2024 – V. 14 –927.
3. Demeny A., Nemeth P., Mojzsis S.J. et al., A formation model for carbonado diamond

from impact-induced subduction to metamorphic resorption // Gondwana Research. – 2026 – V. 156, – P. 310–320.

4. Nasdala L., Grambole D., Wildner M. et al., Radio-colouration of diamond: a spectroscopic study // Contrib Mineral Petrol. –2013 – V. 165, Iss 5– P. 843–861.

МНОГООБРАЗИЕ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ В АЛМАЗЕ

Вяткин С. В.[1] (*vyt_box@mail.ru*),
Криулина Г. Ю.[1] (*kriulina@gem-center.ru*)

[1]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова*

Аннотация: уникальность алмаза проявляется в огромном разнообразии структурных дефектов в его кристаллической решетке. Их изучение дает информацию об условиях среды алмазообразования и их эволюции, а также позволяет использовать придаваемые синтетическим кристаллам особые свойства в современных технологиях.

Ключевые слова: *алмаз, структурные дефекты, ЭПР, ИК.*

Дефекты в кристаллической структуре алмаза обуславливают значительную часть его уникальных свойств. Наиболее широко известны дефекты, регистрируемые методом ИК- спектроскопии, на содержании которых основана физическая классификация алмаза, однако этим методом надежно регистрируются всего несколько структурных центров. Полная картина разнообразия, богатства структуры алмаза раскрывается с применением других методов, в частности люминесцентной спектроскопии и электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). В справочнике Дишлера 2012 г. [3] приведены данные более 300 структурных центров в алмазе. Некоторые из них хорошо изучены; другие, напротив, не имеют даже общепринятой структурной модели. Многие центры, в том числе и те, природа которых недостаточно изучена, широко используются. Пример тому – рентгеновская люминесценция алмаза, на основе которой он сепарируется от породы на большинстве обогатительных фабрик мира.

Элементный состав структурных примесей в кристаллической решетке алмаза весьма ограничен. В основном это азот, в меньшей степени – никель, кислород и водород; роль остальных элементов (S, P, Si, Cu, Fe, Co, Cr… [6]) – исчезающе мала. Все разнообразие структурных дефектов возникает благодаря воздействию трех основных агентов: температуры, деформации кристаллической решетки и излучения различной энергии. Температура определяет скорость протекания диффузионных процессов, приводящих к последовательной агрегации азотных дефектов [3] – от одиночных атомов азота последовательно к двух- трех- и четырехатомным азотным центрам: C → A → N3 → B1 (упрощенно). При этом мигрирующие междоузлия порождают центр B2 (плейтлетс), состоящий, согласно современным представлениям, из тонких слоев атомов углерода в межузельных положениях, в некоторых случаях содержащих также азот [4,5]. Перечисленные центры встречаются в кристаллической структуре алмаза в наиболее высоких концентрациях, часто они служат «исходным материалом» для преобразования в другие дефекты.

Одним из путей такого преобразования является воздействие на кристалл направленного давления при повышенной температуре – пластическая

деформация. Характерными маркерами такого воздействия являются коричневый оттенок окраски и целая группа структурных дефектов, регистрируемых методом ЭПР – центры N1, N2, N4, W7, W25, W26, M2, M3 и многие другие. При этом существует минимум два механизма образования деформационных центров: путем скольжения дислокаций и путем микродвойникования; для второго механизма характерно образование центров M2 и появление розовой окраски [1]. В состав некоторых деформационных центров наряду с изоморфными атомами азота входят вакансии – W25 [3N-V-V-N] и W26 [N-V-N] [10]. Однако наиболее распространен (и при этом наименее изучен) среди данной группы центр N2. Предположительно, широкая бесструктурная линия его спектра ЭПР связана с деформационными дислокациями, декорированными атомами азота [7]. Коричневая окраска напрямую коррелирует с содержанием центра N2 [1].

Азот – далеко не единственный элемент, способный встраиваться в кристаллическую структуру алмаза. Согласно [6], установлены содержащие никель центры: NE1, NE2, NE8 и RO1 в природных алмазах и еще более 20 в искусственно выращенных. Интересно, что наиболее часто обнаруживаемые среди них, NE1 и NE2, были выявлены сначала в синтетических алмазах, и лишь позднее в натуральных. Атомы кислорода содержат парамагнитные центры OK1 и N3, достаточно часто обнаруживаемые в составе природных алмазов; к «связанным с кислородом» центрам справочник [6] относит еще 10 центров, найденных в синтетических кристаллах. Редкая для природных алмазов голубая окраска эмпирически однозначно связывается с примесью бора; однако структурный дефект в виде одиночного замещения углерода на бор, который традиционно предлагается на роль центра окраски, пока не подтвержден ЭПР исследованиями.

Отдельная группа структурных центров в алмазе – собственные дефекты кристаллической решетки, вакансии, интерстиции, их комбинации друг с другом и азотными структурными дефектами. Эти структурные центры могут быть природными либо искусственно созданными путем различных энергетических воздействий на кристаллы алмаза. Сама возможность предсказуемого создания кристаллов с некоторыми «особыми» свойствами предопределила бурный рост исследований в данном направлении; соответственно, количество подобных структурных центров исчисляется уже десятками и постоянно растет.

Множество структурных центров в кристаллической решетке алмаза обуславливают большое разнообразие оптических (и не только) эффектов и свойств для содержащих их кристаллов. Нерешенные вопросы порождают целые направления исследований, ставят проблемы, решение которых позволит получить значительный объем информации о процессах алмазообразования, а также новые, перспективные технологии применения алмазов.

Среди центров, регистрируемых методом ИК спектроскопии, самым перспективным для дальнейших исследований, по нашему мнению, является центр B2, плейтлетс. В отличие от подавляющего большинства структурных дефектов в решетке алмаза, плейтлетс характеризуются не только кон-

центрацией, но также формой и размерами. Взаимная вариативность этих параметров от условий образования алмаза практически не изучена, однако потенциально она может нести в себе огромную генетическую информацию, вплоть до создания давно ожидаемой методики различения алмазов отдельных месторождений.

Для упомянутых выше пластически деформированных алмазов коричневых оттенков отсутствует физическая модель центра окраски, отдельным интересным аспектом этой проблемы является тот факт, что коричневый цвет может проявляться и у так называемых «безазотных» алмазов. Среди нерешенных вопросов следует упомянуть также «CO_2-алмазы», спектры которых показывают присутствие твердой фазы CO_2 [2,8]. К сожалению, практически недоступны для исследования природные голубые алмазы, окраска которых приписывается замещению B → C.

Безусловно, самый широкий фронт исследований структурных центров в алмазе в настоящее время находится в области физики и современных технологий [9]. Алмаз сам по себе обладает уникальными свойствами – это сверхвысокие твердость и теплопроводность, широкополосная электромагнитная прозрачность, и прочность кристаллической решетки, позволяющей надежно стабилизировать многие виды структурных дефектов. Управляемое создание новых и модификация существующих центров в алмазной матрице создают его новые применения в детекторах частиц, в квантовых технологиях, в методиках записи информации со сверхвысокой плотностью и огромной длительностью гарантированного хранения и многих других областях.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова, по госбюджетной теме «Минералогическое изучение месторождений Арктической зоны России с целью их комплексного освоения (№ госрегистрации 121061600049-4)».

Благодарности. Коллектив авторов благодарит АК ПАО “АЛРОСА” за предоставленную возможность исследований и публикации данного материала.

Список литературы:

1. Титков С.В. «Изоморфные примеси в природных алмазов и их генетическое значение.» Диссертация на соискание ученой степени геолого-минералогических наук, Минералогия, кристаллография, Москва, 2018, 202 с.

2. Barannik E.P., Shiryaev A.A., Hainschwang T. Shift of CO_2-I absorption bands in diamond: A pressure or compositional effect? A FTIR mapping study // Diamond & Related Materials – 2021 – V.113 – 108280.

3. Dischler B. Handbook of Spectral Lines in Diamond. – Berlin, Heidelberg : SpringerBerlin Heidelberg, 2012 – 467 p.

4. Goss J. P., Coomer B. J., Jones R., Fall C. J., Briddon P. R., and Oberg S. Extended defects in diamond: The interstitial platelet // Physical Review B. — 2003. — apr. Vol. 67, № 16 – P. 165208.

5. Humble P. The structure and mechanism of formation of platelets in natural type Iadiamond // Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences. — 1982. — may, Vol. 381, № 1780 – P. 65–81.

6. Madelung O., Rössler U., Schulz M., Semiconductors: Impurities and Defects in Group IV Elements, IV-IV and III-V Compounds – Group IV Elements – Springer Berlin, Heidelberg 2002 – 313p.

7. Newton M.E., Baker J.M. 14N ENDOR of the N2 center in diamond // J. Phys.: Condens. Matter. – 1989 – V. 1, № 48 – P. 9801–9803.

8. Shiryaev A.A., Chesnokov Y., Vasiliev A.L., Hainschwang T. Exsolution of oxygen impurity from diamond lattice and formation of pressurized CO_2 -I precipitates // Carbon Trends – 2023 – V. 11 – 100270.

9. Vyatkin S., Danilov P., Smirnov N., Pomazkin D., Kuzmin E., Gorevoy A., Muratov A., Matyaev I., Kudryashov S. Electron Paramagnetic Resonance Sensing of «Hidden» Atomistic and Cooperative Defects in Femtosecond Laser-Inscribed Photoluminescent Encoding Patterns in Diamond // Photonics – 2023 – V. 9.

10. Zaitsev A.M. Optical Properties of Diamond: A Data Handbook – Berlin: Springer Verlag, 2001 – 502 p.

К 100-летию СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ОРЛОВА ЮРИЯ ЛЕОНИДОВИЧА, ИЗВЕСТНОГО СОВЕТСКОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЯ АЛМАЗА, ДИРЕКТОРА МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО МУЗЕЯ ИМЕНИ А.Е. ФЕРСМАНА

Гаранин В.К. (*vgaranin@mail.ru*)

Минмузей РАН, г. Москва

Аннотация: В представленной работе показано, что научная деятельность Ю.Л. Орлова была связана с изучением алмаза из известных провинций России. На посту директора Ю.Л. Орлов продолжил славные традиции директоров Минералогического музея, укрепляя позицию музея в качестве ведущего Минералогического музея нашей страны и мира.

Ключевые слова: *алмаз, музей, минерал, классификация, директор*

Вступление.

Юрий Леонидович Орлов родился 4 февраля 1926 года в Москве. По настоянию родителей, учась в школе, еще занимался музыкой в музыкальном училище при Московской консерватории. По окончании школы он по рекомендации отца поступил в государственный Институт цветных металлов и золота в 1945 году. По окончанию института в 1950 году он 5 лет работал в геологических организациях, а затем с 1956 года поступил на работу в Минералогический музей имени А.Е. Ферсмана, в котором прошел большой путь от младшего научного сотрудника до директора музея.

Научный интерес.

Юрий Леонидович примерно с 1953 года занимался исследованием уральских алмазов. При этом он подходил к изучению алмаза комплексно, применяя различные методы от изучения морфологических особенностей алмаза до тонких физических методов определения структурных особенностей этого минерала. В 1956 году защитил кандидатскую диссертацию, посвященную изучению морфологии алмаза из уральских россыпей [2,3]. Он обратил внимание на то, что появление округлых форм на кристаллах алмаза может быть связано с растворением этого минерала в агрессивной магматической среде при подъеме магматического расплава к поверхности Земли.

Увлечение алмазом прошло через всю его жизнь и особенно ярко проявилось в период работы в Минералогическом музее. При изучении минерала он сотрудничал со многими геологическими организациями. При этом он имел дело с большими коллекциями алмаза с Урала и Якутии, которые включали в себя все разнообразие этого минерала по размеру, формам, цвету, включениям. Особенно важно отметить возможность изучения алмаза из россыпей и коренных тел Якутии, что позволило в полной мере увидеть огромное разнообразие минерала и по форме, по цвету, размеру и другим характеристикам.

Весь этот большой материал, разнообразные методы изучения, умелое обобщение материала позволило Юрию Леонидовичу в 1972 году защитить докторскую диссертацию «Минералогия алмаза». В 1973 году Юрий Леонидович издал монографию «Минералогия алмаза» [2]. Это блестящий научный труд, в котором он обобщил весь свой материал по алмазу и представил новую генетическую классификацию этого минерала.

Классификация Ю.Л. Орлова. В ней он разделяет все природные алмазы на **I** и **II типы** (по физическим свойствам), которые, в свою очередь, делятся на **9 разновидностей** (по морфологии, окраске и примесям) [4].

Таким образом Юрий Леонидович Орлов оставил свой большой след в изучении алмаза и продолжает и сегодня знакомить нас с выдающимися достижениями в области состава, свойств и генезиса алмаза.

Директор Минералогического музея имени А.Е. Ферсмана РАН.

Ю.Л. Орлов руководил ведущим Минералогическим музеем мира с 1976 года, которому уделял огромное внимание. Во время работы в музее принимал участие в научной разработке тематических экспозиций по процессам минералообразования, драгоценным и поделочным камням, синтетическим минералам; участвовал в научно-пропагандистской работе, читал лекции и проводил экскурсии.

Способствовал пополнению музейной коллекции алмазов и драгоценных камней, при этом не только количественно, но и расширяя география месторождений поступивших минералов.

Заключение.

Таким образом, Юрий Леонидович оставил яркий след в геологической науке, на протяжении всего своего жизненного пути изучая природный алмаз во всем обьеме большого материала и применяя разнообразные современные методы изучения минералов. Кроме этого, активно занимаясь и административной деятельность на посту директора Минералогического музея имени А.Е. Ферсмана.

Список литературы:

1. Орлов Ю. Л. Морфология алмаза. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1963 — 235 с.
2. Орлов Ю. Л. Минералогия алмаза. М.: Наука, 1973 — 223 с.
3. Орлов Ю. Л. К вопросу о генезисе округлых форм кристаллов алмаза // Труды Минералогического музея. — 1959 — № 9 — С. 86—98.
4. Орлов Ю. Л., Афанасьева Е. А. О происхождении алмазов I и II типов и причинах отличия их физических свойств // Новые данные о минералах СССР. — 1966 — № 17. — С. 105—118.

СИСТЕМАТИКА И ГЕНЕЗИС МОРФОЛОГИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ АЛМАЗОВ

Глушкова И.В.(*glushkovaiv@alrosa.ru*), **Седых Е.М.**, **Лодыгина В.Ю.**, **Монхоров Р.В.**, **Бардухинов Л.Д.**, **Липашова А.Н.**, **Демидова Л.А.**

АК «АЛРОСА» (ПАО)

Аннотация. В работе проведена систематизация редких морфологических типов алмазов из месторождений Якутии и Архангельской области, выделено пять основных групп аномальных форм. На основе морфологического анализа установлена связь между специфическими формами кристаллов и условиями их роста, двойникования или растворения в мантийных процессах.

Ключевые слова: *алмаз, редкие формы алмаза, морфология алмаза.*

Изучение морфологии алмаза является классическим инструментом для реконструкции условий его кристаллизации в мантии и последующего растворения в кимберлитовом расплаве. Помимо широко распространенных октаэдров, кубов и додекаэдроидов, встречаются уникальные кристаллы, чья форма не укладывается в стандартные классификации. Настоящая работа посвящена систематике редких морфологических типов алмазов из коренных месторождений Якутии (трубки Мир, Айхал, Юбилейная) и Архангельской области (месторождение им. М.В. Ломоносова). Цель работы — выделить основные группы и связать их с особенностями генезиса.

Фактическую базу составили алмазы из коллекции редких кристалломорфологических форм АК «АЛРОСА» (ПАО). Анализ проведен с использованием классических работ по морфологии алмаза.

Типизация аномальных форм. Все изученные алмазы были разделены на пять основных групп по ведущему аномальному признаку.

1. Аномалии роста (скелетные и антискелетные формы) [1]. В эту группу вошли кристаллы, форма которых обусловлена неравномерным ростом различных частей кристалла – ребер и граней, связанным с высоким (скелетная форма) или малым (антискелетная форма) пересыщением и неравномерной диффузией.

Скелетный кристалл «Звезда»: представляет собой классический комбинационный скелетный кристалл {100}+{111}+{110} с недоразвитыми вершинами (отрицательные грани октаэдра) и характерными четырехугольными впадинами на гранях куба. Это свидетельствует об отставании граней в росте от вершин и ребер в условиях высокого пересыщения раствора и затрудненной диффузии.

Антискелетный кристалл «Бутон»: демонстрирует противоположный эффект — сильно «выпуклые» грани октаэдра и куба, нараставшие быстрее ребер, что более вероятно при малых пересыщениях, когда тормозящие примеси преимущественно адсорбируются ребрами и вершинами.

2. Посткристаллизационные преобразования: коррозия и растворение [6]. Наибольшее количество среди изученных алмазов несут следы интенсивного растворения в послемагматический этап.

Сфероидальные формы: Кристаллы «Баскетбольный мяч» и «Футбольный мяч» (рис. 1) демонстрируют предельную степень округления с развитием черепитчатой скульптуры на выступающих ребрах, что является признаком объемного диффузионного растворения.

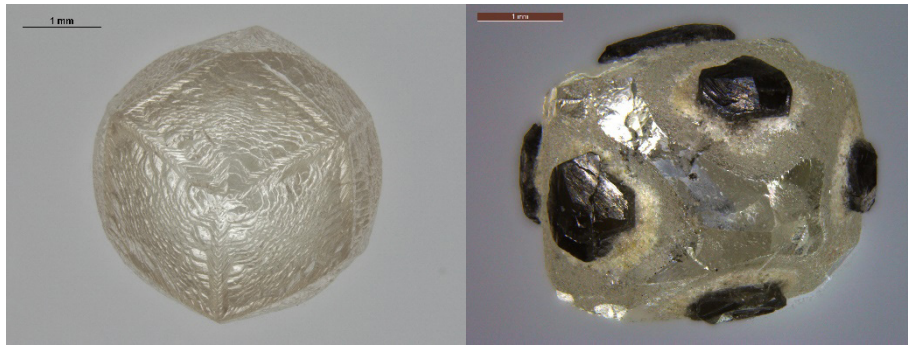


Рис. 1. Алмазы «Баскетбольный мяч» и «Футбольный мяч» из коллекции редких форм АК «АЛРОСА» ПАО

Полные псевдоморфозы растворения: алмаз «Шар» утратил кристаллографические очертания, став практически идеальной сферой, что указывает на максимальное воздействие агрессивного расплава [3].

Избирательное травление: Кристалл «Череп» (рис. 2) уникален сочетанием полости и последующего растворения ее краев. Образование глубоких треугольных впадин («глаз») на гранях октаэдра внутри кристалла подтверждает, что растворение активно протекало не только на внешней поверхности, но и в открытых полостях.



Рис. 2. Алмаз «Череп» из коллекции редких форм АК «АЛРОСА» ПАО

3.Закономерные и сложные срастания. Шпинелевые двойники: Классические двойники по шпинелевому закону представлены как простыми формами («Треугольник» из тр. Мир), так и сложными агрегатами («Лошадка» (рис. 3)), состоящими из нескольких сросшихся двойников [2].



Рис. 3. Алмаз «Лошадка» из коллекции редких форм АК «АЛРОСА» ПАО

Двойники прорастания: алмаз «Китайский фонарик» является редким примером двойника прорастания двух кубов IV разновидности, развернутых относительно общей оси L3 на 60°. Генезис таких форм связан с одновременным зарождением и ростом двух центров кристаллизации в условиях механического взаимодействия [4].

4. Кристаллы с включениями-«узниками». К уникальным находкам относится алмаз «Матрешка» (рис. 4) («Погремушка») [5]. Внутри шпинелевого двойника обнаружена полость, в которой свободно перемещается меньший по размеру кристалл алмаза. Генетически это может быть интерпретировано как результат более позднего растворения протомагматической трещины, соединившей две первоначально раздельные зоны роста, либо как следствие процесса «смачивания» и последующего растворения алмаза в карбонатитовом расплаве. Факт нахождения свободного кристалла указывает на отсутствие эпитаксиального зарастания полости.

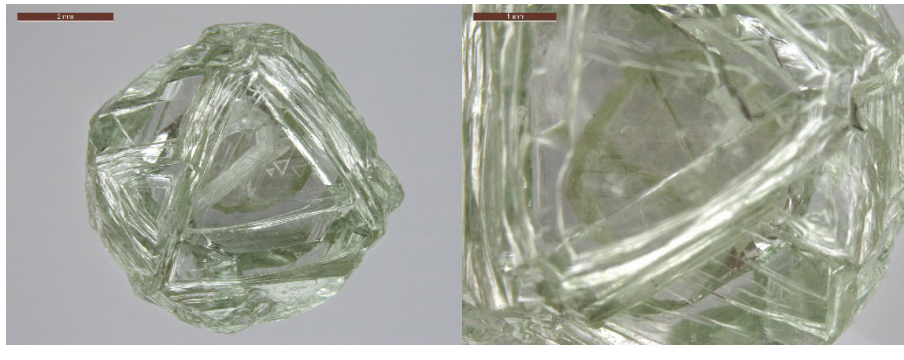


Рис. 4. Алмаз «Инь-Янь» из коллекции редких форм АК «АЛРОСА» ПАО

5. Зональные и поликристаллические агрегаты.

Резко-зональные кристаллы: кристаллы «Инь-Янь» (рис. 5) Светлый и Темный представляют собой две половинки одного расколотого кристалла. Контрастная зональность (прозрачный желтый центр — непрозрачная черная периферия с графитом) отражает смену условий роста от стабильных (прозрачная зона) к насыщенным примесями и дефектам (поздняя зона), предпо-

ложительно, при попадании в среду с восстановительными флюидами.



Рис. 5. Алмаз «Инь-Янь» из коллекции редких форм АК «АЛРОСА» ПАО

Поликристаллические сростки: «Друза» (рис. 6) представляет собой поликристаллический агрегат, формирование которого связывают с быстрой некогерентной кристаллизацией в пересыщенной среде, часто в ассоциации с карбонатитами.



Рис. 6. Алмаз «Друза» из коллекции редких форм АК «АЛРОСА» ПАО

Таким образом, проведенная систематика показывает, что морфологические аномалии алмазов являются ценным источником информации о специфике их генезиса. Скелетные и антискелетные формы указывают на особенности роста в неравновесных условиях. Формы значительного растворения («шары», «мячи») указывают на длительное пребывание в агрессивном расплаве либо подъем по особо горячим расплавам. Уникальные объекты, такие как кристалл «Матрешка», ставят новые вопросы о механизмах растворения и двойникования в мантийных условиях. Изучение данных аномалий расширяет фундаментальные представления о минералообразующих процессах в мантии Земли и может служить дополнительным критерием при технологической классификации сырья.

Список литературы

1. Егоров-Тисменко Ю.К. Кристаллография и кристаллохимия. - 2010. - 185 с.
2. Лодыгина В.Ю., Монхоров Р.В., Бардухинов Л.Д., Демидова Л.А. Морфология и особенности внутреннего строения алмазов «Альпака» и «Акула» коллекции редких форм АК «АЛРОСА» (ПАО) // Новые идеи в науках о Земле: материалы XVII Междунар. науч.-практ. конф. – М.: РГГРУ. – 2025. – 228–231.
3. Лодыгина В.Ю., Монхоров Р.В., Бардухинов Л.Д., Демидова Л.А. Микрорентгенотомографические особенности VI разновидности алмаза (баллас) // Минералы и минералоподобные соединения: кристаллохимия и перспективы применения: сб. тезисов всерос. конф. – М.: КДУ. – 2024. – 60–61.
4. Павлушин А.Д., Бардухинов Л.Д., Коногорова Д.В. Алмазные раритеты: «Китай-ский фонарик» // Наука из первых рук. – Новосибирск: Инфолио. – 2021. – № 3/4 (92). – С. 132–141.
5. Konogorova D.V., Kovalchuk O.E., Bardukhinov L.D. Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2020. – Т. 25. – № 2. – С. 45–55.
6. Khokhryakov A.F., Palyanov Y.N. // American Mineralogist. 2007. Vol. 92. № 5-6. P. 909-917.

ПУТИ И ПРИНЦИПЫ РАЗВИТИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ РАБОТ В АК «АЛРОСА» В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Кошкарев Д. А.[1] (*KoshkarevDA@alrosa.ru*)

[1]*АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Новосибирск*

Аннотация: Проведение региональных алмазопоисковых работ в современных условиях требует новых подходов, как научных, так и организационных. Научный подход, основанный на самых современных достижениях минералогии, а также на новых технологиях обработки данных, должен обеспечивать максимальную локализацию площадей.

Ключевые слова: *региональные работы, минералогия, индикаторные минералы кимберлитов, методы обработки и работы с данными, алмазопоисковые работы.*

На протяжении всей своей истории АК «АЛРОСА» (ПАО) (далее – Компания) вела региональные работы, за исключением периода времени с 2012 по 2025 г.г., когда региональные работы стали недоступны для недропользователей. Данный «временной пробел» значительно ослабил работы по созданию поискового задела на территориях вне влияния Компании. Тем не менее, в течении данного периода продолжались прогнозные работы по оценке перспектив алмазоносности территорий, сначала на базе научно-исследовательского геологического предприятия (НИГП), затем на базе Экспертного научного центра Вилюйской ГРЭ и, в настоящее время, Центра прогнозных исследований. Территория, где сосредоточены основные работы Компании уже довольно хорошо геологически изучены и не требуют постановки региональных работ. Но ресурсная база известных промышленный кимберлитовых полей значительно исчерпана, а новые промышленные площадки на новых территориях, к сожалению, пока не просматриваются даже в среднесрочной перспективе. Ставка на региональные работы за счет Федерального бюджета в виде Государственных контрактов не принесла ожидаемых результатов по приросту ресурсов высоких категорий, поскольку объем данного финансирования был недостаточен для полноценного геологического изучения площади, а недропользователи со своим финансирование не могли в таких работах поучаствовать. Сегодня ситуация кардинально изменилась – недропользователи могут снова брать региональные лицензии и изучать перспективные территории своими силами. Но, на взгляд автора, изменение законодательства произошло несвоевременно, из-за макроэкономических условий, Компания и другие недропользователи не «спешат» вкладывать ресурсы на масштабные площадные работы с неясным результатом. Единственным способом, на сегодняшний день, который реально может привести к локализации новых поисковых площадей это участие в геолого картографических работах масштаба 1:200 000 (ГДП, ГХО, ГМК - 200) на основе частно-государственного партнерства.

Другой вопрос, это сделать обоснованный и оправданный выбор листа

200-от тысячного масштаба, где Компания совместно с Государственными институтами может получить положительные геологические результаты. Геологическая служба Компании считает что одним из основным инструментом выбора площади является детальный минералогический анализ тяжелой фракции разновозрастных, терригенных отложений развитых в границах потенциальной территории. Т.е. наличие индикаторных минералов кимберлитов (ИМК) или их отсутствие, состав минералов и их степень механического износа (удаленность от коренного источника).

Учитывая огромный накопленный фактический материал по разным территориям, решение подобной задачи является весьма трудозатратным процессом, требующего временных ресурсов. Исходя из этого, первостепенной задачей явилось создание автоматического (компьютерного) комплекса обработки аналитических данных по составу ИМК или в другой аббревиатуре МСА (минералов спутников алмаза), в том числе микроэлементному. Комплекс должен был за короткий промежуток времени обрабатывать базы данных сотен и тысяч микрозондовых и не только анализов, при этом использую для построения компонентных диаграмм продвинутые классификации ИМК, в том числе разработанные научным руководителем музея им. А.Е. Ферсмана Гараниным В.К.

С данной задачей успешно справились специалисты Научно-геологического центра Вилюйской ГРЭ, возглавляемого Гибшер А.А., при непосредственном исполнении группы петрологии под руководством Мальковца В.Г. Программный модуль «МСА -эксперт» создан и включен в непосредственную деятельность геологов Компании. Для сбора и использования в модуле дополнительных геологических данных по другим регионам в Компании традиционно привлекаются институты Министерства наука и высшего образования (специализированные геологические институты РАН).

Следующим шагом в региональной оценке перспективности территорий является построение структурно-тектонического каркаса с выделением потенциальных рудоконтролирующих зон. Для этого в анализ данных вовлекаются данные нефтяной сейсморазведки и данные региональной геофизики.

Комплексирование вещественных, геофизических и структурных данных в идеальном варианте осуществляется с помощью инструментов искусственного интеллекта, но пока полученные результаты не совсем однозначные и не всегда отвечают реальным геологическим данным. Работа в данном направлении ведется.

Только после вышеприведенного, поэтапного анализа территории можно определить номенклатурный лист (или несколько листов) масштаба 1:200 000, на которые подача заявки на совместные с Государством геологические картосоставительские работы оправдает себя и в поисковом значении. Несмотря на то, что недропользователи могут выбрать произвольные границы регионального участка для самостоятельных работ, но дополнительное Федеральное финансирование и участие ведомственных институтов делает первую схему работы наиболее приемлемой в современных реалиях.

Резюмирую вышеизложенное, можно утверждать, что на современном

этапе развития геологической науки, в том числе поисковой, успех напрямую зависит от консолидации усилий ученых и геологов из разных научных и производственных институтов. При этом, привлекая к алмазопоисковой тематике учреждения с другой специализацией, можно более полно оценить реальные перспективы той или иной территории для постановки алмазопоисковых задач.

РОЛЬ МАНТИЙНОГО МЕТАСОМАТОЗА В ПРОЦЕССАХ РОСТА И РАСТВОРЕНИЯ АЛМАЗОВ В КРАТОННОЙ ЛИТОСФЕРНОЙ МАНТИИ

Мальковец В. Г. [1,2] (*vladimir.malkovets@igm.nsc.ru*),
Гибшер А. А.[1,2] (*anastasia.gibsher@igm.nsc.ru*),
Яковлев И. В. [1,2] (*igor.yakovlev@igm.nsc.ru*),
Милаушкин М. В. [1,2] (*maksim.milaushkin@igm.nsc.ru*)

[1]ИГМ СО РАН, г. Новосибирск, [2] АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Новосибирск

Аннотация: *В* данной работе проводится краткий обзор представлений о морфологических особенностях алмазов из кимберлитов мира. На основании собственных исследований показана взаимосвязь внешней морфологии алмазов с метасоматическими процессами в литосферной мантии древних кратонов.

Ключевые слова: *алмаз, кимберлит, литосферная мантия, Сибирский кратон, мантийный метасоматоз*

Кимберлитовые магмы выносят на поверхность вещество разных уровней глубинности – от границы литосфера-астеносфера до самых верхних горизонтов земной коры. Кимберлитовые трубки являются практически единственным источником ювелирных алмазов. Однако интерес к алмазам связан не только с их использованием в ювелирной промышленности – алмазы являются уникальными природными контейнерами, которые сохраняют петрологическую информацию об условиях их образования.

Первый фундаментальный труд по морфологии алмазов - «Der Diamant: Eine Studie von A. von Fersmann und V. Goldschmidt. Mit einem Atlas von 43 Tafeln» был подготовлен двумя выдающимися учеными Александром Евгеньевичем Ферсманом и Виктором Гольдшмидтом и опубликован на немецком языке в Германии в 1911 году. Данный атлас обобщил разрозненные наблюдения XIX века и задал стандарт для всех последующих исследований форм алмаза, которые появились уже в середине XX века (работы И. И. Шафрановского, А. А. Кухаренко, Ю. Л. Орлова, В. П. Афанасьева). Классификация алмазов, разработанная Юрием Леонидовичем Орловым и изложенная в монографиях «Морфология алмаза» (1963) и «Минералогия алмаза» (1973) – одна из ключевых в российской минералогической науке, которая появилась как логическое развитие идей А. Е. Ферсмана и В. Гольдшмидта. В отличие от их фундаментального атласа, сосредоточенного на кристаллографии, классификация Ю. Л. Орлова стала практическим инструментом, тесно увязав внешнюю морфологию алмаза с его генезисом и условиями образования. Ю. Л. Орлов выделил 11 основных разновидностей алмазов, которые охватывают как монокристаллы, так и их поликристаллические сростки. В 1983 году З. В. Бартошинский предложил свою классификацию алмазов, которая на данный момент является одной из самых детальных и широко используемых

в минералогии. В данной классификации все алмазы разделены на 12 основных, а с учетом дополнительных - 53.

Следующим фундаментальным вкладом в применении современных теорий кристаллохимии к анализу роста алмаза является классическая работа Sunagawa (1984), в которой он не просто описывает формы кристаллов алмаза, а связывает их с атомарными процессами на поверхности растущей грани. В этой работе впервые была показана зависимость между морфологией и степенью пересыщения углеродом в среде роста.

Экспериментальные исследования указывают на то, что природные алмазы формируются в мантии Земли в широком диапазоне модельных сред. Подавляющее большинство экспериментов сходится на том, что наиболее вероятной средой роста являются расплавы карбонатов, силикатов и их смеси (карбонатитовые расплавы) с растворенными флюидами (H_2O, CO_2). В экспериментальных работах группы Ю. Н. Пальянова была показана взаимосвязь морфологии алмаза с составом алмазообразующей среды (Пальянов и др., 2021 и ссылки в данной работе). Эксперименты проводились в широком диапазоне мантийных параметров, моделирующих различные геологические обстановки. Ю. Н. Пальянов и его коллеги также внесли существенный вклад в понимание процессов растворения алмазов, которые играют не менее важную роль в формировании их облика. В работе McCallum et al. (1994) была показана потеря массы кристалла алмаза при разных степенях его растворения. Наиболее детальная схема эволюции морфологии алмазов на примере коллекции природных алмазов из кимберлитовых трубок Канады приведена в работе Gurney et al. (2004).

Морфология природных алмазов из кимберлитовых и лампроитовых трубкок и экспериментальные работы по росту и растворению алмазов в природных модельных расплавах и флюидах однозначно свидетельствуют о схожих процессах, происходящих в литосферной мантии древних кратонов. Жильная модель метасоматического генезиса алмазов и их последующее растворение также под воздействием метасоматических расплавов/флюидов в литосферной мантии древних кратонов была показана в работе Malkovets et al. (2007). В настоящей работе на основании проведенных расчетов по процентному содержанию морфологических форм алмаза с признаками растворения (“округлые” алмазы) (общая коллекция алмазов >30000 кристаллов алмаза) и перидотитовых гранатов (>6000 зерен) с признаками воздействия расплавного метасоматоза (который и приводит к растворению алмазов в литосферной мантии) мы показываем положительную линейную корреляцию этих характеристик для кимберлитовых трубок центральной части Сибирского кратона. Данная корреляция свидетельствует о важности учета степени деструктивных мантийных метасоматических процессов на оценку потенциальной алмазоносности кимберлитовых тел на поисковых и оценочных стадиях ГРР. Широкое развитие таких метасоматических процессов может приводить к полному растворению алмазов в материнских породах в литосферной мантии и, как следствие, к низкой продуктивности кимберлитовых тел.

Работа выполнена при финансовой поддержке и в рамках проекта РНФ № 25–77–10092 (https://rscf.ru/en/project/25-77-10092/).

Список литературы:

1. Орлов Ю. Л. Минералогия алмаза. — М.: Изд-во АН СССР, 1963. — 236 с.
2. Пальянов Ю. Н., Хохряков А. Ф., Куприянов И. Н. Кристалломорфологические и кристаллохимические индикаторы условий образования алмаза //Кристаллография. – 2021. – Т. 66. – №. 1. – С. 135-148.
3. Fersmann A., Goldschmidt V. Der Diamant: eine studie. – C. Winter's Universitäts-Buchhandlung, 1911.
4. Gurney J. J. et al. The morphological characteristics of diamonds from the Ekati property, Northwest Territories, Canada //Lithos. – 2004. – Т. 77. – №. 1-4. – С. 21-38.
5. Malkovets V. G. et al. Diamond, subcalcic garnet, and mantle metasomatism: Kimberlite sampling patterns define the link //Geology. – 2007. – Т. 35. – №. 4. – С. 339-342.
6. McCallum M. E. et al. Morphological, resorption and etch feature trends of diamonds from kimberlite populations within the Colorado-Wyoming state line district, USA // Proceedings of the 5th international kimberlite conference, Brasilia, Brazil, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerals. – 1994. – С. 78-97.

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АЗОТНЫХ ДЕФЕКТОВ В КРИСТАЛЛАХ ПРИРОДНЫХ АЛМАЗОВ ПО ДАННЫМ ИК-МИКРОСПЕКТРОСКОПИИ

Новочадов С. Л.[1] (*sergei.novochadov@mail.ru*),
Титков С.В.[1, 2] (*titkov@igem.ru*),
Прокофьев В. Ю.[1] (*vpr2004@rambler.ru*)

[1] ИГЕМ РАН, г. Москва, [2] РГГРУ им. С. Орджоникидзе, г. Москва

Аннотация: Изучено распределение основных азотных А и В дефектов в кристаллах алмазов разновидности *I* по классификации Орлова методом сканирующей ИК-спектроскопии. Рассмотрены закономерности распределения дефектов в кристаллах с прямолинейными и округлыми зонами роста и в кристаллах со смешанногабитусным ростом на начальных этапах образования.

Ключевые слова: *природные алмазы, ИК-микроспектроскопия, механизм роста, азотные дефекты, округлая зональность, смешанногабитусный рост.*

Изоморфные примеси азота образуют в структуре алмаза огромное количество разнообразных дефектов [6]. Среди них наиболее часто встречаются дефекты А (два изоморфных атома азота в соседних позициях структуры) и В (четыре изоморфных атома азота в комплексе с вакансией). В ИК-спектрах с А-дефектом связана основная линия 1282 $см^{-1}$, с В-дефектом – 1175 $см^{-1}$. В настоящей работе было исследовано распределения основных азотных А- и В-дефектов в кристаллах природных алмазов с использованием ИК-микроспектроскопии. При этом были изучены 37 пластин с размерами в среднем 5х5 мм, которые были изготовлены из природных кристаллов алмаза из месторождений Сибирской платформы. Были отобраны образцы с различными типами внутреннего строения, проявляющегося в картинах аномального двулучепреломления. Эти образцы были выбраны из большой коллекции пластин, у которых не наблюдается признаков пластических деформаций. Алмазы, из которых были изготовлены пластины, имели октаэдрический и ромбододекаэдрический габитус и относились к разновидности I по классификации Ю. Л. Орлова [3].

Исследования были проведены с использованием ИК-Фурье микроспектрометра LUMOS II Imaging (Bruker), который позволяет проводить исследования распределения структурных дефектов в пластинах в сканирующем режиме. Спектры были записаны с размером апертуры в основном 65 мкм, со спектральным разрешением 0.5 $см^{-1}$. Для каждого образца спектры были зарегистрированы в 7000–10000 точках. Обработка полученных ИК-спектров и построение карт распределения дефектов были выполнены с использованием программы OPUS (Bruker).

В кристаллах алмаза с тонкими октаэдрическими прямолинейными зонами роста, наблюдаемыми в картинах двупреломления, часто регистриро-

валось постепенное снижение содержания А- и В-дефектов от центра к краю пластины (в среднем в два раза). Хотя у некоторых кристаллов наблюдалось повышение содержания этих дефектов в краевых зонах. При этом было установлено, что отдельные зоны не характеризуются определёнными содержаниями А или В-дефектов, как полагалось в ранних работах [1]. Таким образом, азотные дефекты в изученных кристаллах алмаза разновидности I формируют зональность второго рода (более крупную), зависящей не от послойного механизма роста, а от изменения содержания азота в минералообразующей среде [2].

В кристаллах с прямолинейными и округлыми зонами роста установлен другой тип неоднородного распределения азотных дефектов [4]. Округлые зоны формируются в результате антискелетного роста октаэдрических граней обусловленного примесным отравлением торцов растущих слоёв.

Во всех изученных образцах было выявлено существенное повышение (в 1,5-3 раза) содержания азотных А- и В-центров в округлых зонах. В основном наблюдались синхронные изменения содержаний А- и В-дефектов. При этом было установлено, что в пределах одной округлой зоны может наблюдаться понижение и повышение отношения А- и В-дефектов, т.е. может происходить изменение степени агрегации изоморфных примесей азота (на 5-25%).

В кристаллах со смешанногабитусным ростом на начальных этапах образования_азотные дефекты присутствуют как в октаэдрических, так и в кубических секторах. При этом большее содержание азотных дефектов наблюдается в октаэдрических секторах, что отмечалось ранее [5].

По результатам анализа изученных пластин выявлено две группы смешанногабитусных алмазов с характерными особенностями распределения азотных дефектов. В первой группе кристаллов отмечаются А- и В- дефекты в сопоставимых концентрациях. При этом содержания А-дефектов практически не отличается в кубических и октаэдрических секторах (разница до 5%), а В-дефекты имеют существенно различные концентрации по секторам (в октаэдрических секторах их на 50-75% больше). В областях зарастания кубических секторов на конечном этапе роста количество азота закономерно уменьшается.

Во второй группе существенно преобладают А- дефекты над В-дефектами, содержания которых иногда находятся на уровне чувствительности метода., При этом А-дефекты контрастно распределены между секторами -в октаэдрических секторах больше в 2-2,2 раза. Хотя -дефекты имеют малые концентрации, но при этом они так же контрастно распределены - в октаэдрических секторах больше в 2 раза. В областях зарастания кубических секторов в кристаллах этой группы количество азота закономерно увеличивается.

Наблюдаемое весьма неоднородное распределение азотных дефектов в кристаллах природных алмазов может быть обусловлено эволюцией условий роста в глубинных флюидных алмазообразующих системах.

Работа выполнена по теме FMMN-2024-0017 госзадания ИГЕМ РАН

Список литературы:

1. Бокий Г. Б., Безруков Г. Н., Клюев Ю. А., Налетов А. М., Непша В. И. Природные и синтетические алмазы. – М.: Наука, 1986 – 221 с.
2. Григорьев Д. П., Жабин А. Г. Онтогения минералов. М.: Наука, 1975 – 339 с.
3. Орлов Ю. Л. Минералогия алмаза. 2-е изд. М.: Наука, 1984 – 264 с.
4. Титков С. В., Новочадов С. Л., Прокофьев В. Ю., Терентьев С. А., Бортников Н. С. Характер распределения структурных дефектов в кристаллах природных алмазов с округлой зональностью по данным ИК-микроспектроскопии // Доклады РАН. Науки о Земле. – 2026 – Т. 530, № 1.
5. Howell D., Griffin W. L., Piazolo S., Jana M. S., Stern. R. A., Stachel T., Lutz N., Rabeau J. R., O'Reilly S. Y. A spectroscopic and carbon-isotope study of mixed-habit diamonds. Impurity characteristics and growth environment // Amer. Mineral. 2013. V. 98. P. 66-77.
6. Zaitsev A. M. Optical Properties of Diamond: A Data Handbook. Berlin: Springer Verlag, 2001. 502 p.

НЕОБЫЧНАЯ МИНЕРАЛЬНАЯ АССОЦИАЦИЯ В КСЕНОЛИТЕ ИЗ ТРУБКИ ОБНАЖЕННАЯ (БИРЕКТИНСКИЙ ТЕРРЕЙН)

Ощепкова М. Г.[1] (*oshchepkovamg28@mail.ru*),
Рагозин А. Л.[2], **Олейников О. Б.**[1]

[1]*Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск*
[2]*Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск*

Аннотация: Изучен уникальный ксенолит из кимберлитовой трубки Обнаженная (Биректинский террейн), характеризующийся ассоциацией Ol + Opx + Cpx + Pl + Al-Sp с дополнительным интерстициальным Ti-флогопитом. На основании минерального состава, структурных особенностей и экспериментальных данных порода интерпретируется как метасоматически изменённый мафический гранулит нижней коры, сформированный при T ≈ 800–900 °C и P ≈ 0,8–1,1 ГПа. Низкое содержание Cr в шпинели (Cr_2O_3 ≈ 1,5 мас.%) и натриевый состав плагиоклаза (An_{26}) отличают образец от типичных мантийных перидотитов и указывают на коровый генезис.

Ключевые слова: *ксенолит, гранулит, нижняя кора, шпинель, паргасит, флогопит, термобарометрия, Сибирский кратон*

Ксенолиты в кимберлитах являются единственными прямыми объектами для изучения состава и эволюции нижней коры древних кратонов. В пределах Биректинского террейна (северо-восток Сибирской платформы) до настоящего времени детально охарактеризованы лишь единичные коровые ксенолиты. В работе исследованы три образца ксенолита из трубки Обнажённая овальной и уплощенной формы (размеры 10×7,5 см, 5×6,5 см и 4×3,5 см), один из которых (обн-606/18) демонстрирует необычную минеральную ассоциацию. Составы минералов (табл. 1) определены на микрозонде JEOL JXA-8100 в ИГМ СО РАН (Новосибирск). Образцы обн-622/18 и обн-630/18 представляют собой двупироксен-плагиоклазовые гранулиты с гранобластовой структурой и массивной текстурой. Основные минералы – клинопироксен (диопсид, Mg# = 0,89–0,92, жадеитовый компонент 8–15 мол.%), ортопироксен (энстатит, $En_{83–88}$, Al_2O_3 = 4,5–5,0 мас.%), плагиоклаз (олигоклаз $An_{25–30}$), алюминиевая шпинель (Cr_2O_3 ≈ 1,6–1,9 мас.%) и интерстициальный Ti-флогопит (TiO_2 = 5–6 мас.%). В образце обн-630/18 дополнительно присутствует титанистый паргасит, развивающийся по границам зёрен. Химический состав пород (SiO_2 41,7–47,99 мас.%, Na_2O 1,24–2,22 мас.%) близок к гранатовым гранулитам Далдын-Алакитского района [1].

Образец обн-606/18 существенно отличается. Он неравномернозернистый и зональный: в центральной части – крупное трещиноватое зерно оливина (Fo_{88}), частично серпентинизированное, погружённое в пироксен-шпинелевую матрицу; в краевой зоне – плагиоклаз, пироксены, шпинель и флогопит. Оливин имеет низкое содержание NiO (0,22 мас.%), что допустимо для гранулитов. Остальные минералы по составу близки к таковым из первых двух образцов,

но клинопироксен беднее Al, Ti и Na, а шпинель также высокоглинозёмистая (Al_2O_3 ≈ 62,7 мас.%, Cr_2O_3 = 1,69 мас.%).

Интерпретация и P–T-условия. Парагенезис Ol + Opx + Cpx + Pl + Al-Sp без кварца и граната характерен для гранулитовой фации умеренных давлений. Для оценки температуры использован двупироксеновый термометр [2] (ориентировочно, по имеющимся составам), который даёт значения 850–950 °C. Давление ограничено полем стабильности шпинели + плагиоклаза без граната. Экспериментальные данные [3] показывают, что для аналогичной пятифазной ассоциации при 1100 °C верхний предел давления составляет ~1,35 ГПа, однако наш плагиоклаз существенно более натриевый (An_{26}), что смещает границу вниз. Кроме того, экспериментальная работа [4] на близких по составу системах при 0,75 ГПа и 1180 °C фиксирует стабильность ассоциации с Al-шпинелью, но в тех опытах шпинель содержала Cr. Учитывая бедность нашей шпинели хромом и наличие гидроксильных минералов (флогопит, паргасит), мы оцениваем давление формирования основной ассоциации в интервале 0,8–1,1 ГПа (глубины 26–36 км), что соответствует низам континентальной коры. Присутствие интерстициального флогопита и паргасита, не участвующих в главной гранулитовой ассоциации, указывает на поздний метасоматоз, связанный с внедрением калиевых флюидов или воздействием кимберлитового расплава.

Таким образом, образцы обн-622/18 и обн-630/18 являются типичными двупироксен-плагиоклазовыми гранулитами нижней коры, а образец обн-606/18 представляет собой метасоматически изменённый мафический гранулит, но с крупным, трещиноватым оливином. Происхождение оливина (Fo_{88}) остается неопределенным, так как судя по структуре и составу не входит в равновесную гранобластовую ассоциацию гранулита. Низкое содержание Cr в шпинели (Cr# ≈ 0,02) и натриевый состав плагиоклаза (An_{26}) принципиально отличают эту породу от плагиоклазовых перидотитов верхней мантии, для которых характерна хромистая шпинель (Cr# > 0,1) и более кальциевый плагиоклаз (An > 50). Наличие флогопита и паргасита показывает, что метасоматические процессы распространены как в мантии, так и на уровне нижней коры. Полученные результаты расширяют представления о гетерогенности нижней коры Биректинского террейна и требуют дальнейших изотопно-геохимических исследований.

Табл. 1. Представительные анализы составов минералов из ксенолитов трубки Обнаженная

Компонент, мас. %	Обн-606/18						Обн-622/18		
	Opx	Cpx	Pl	Phl	Sp	Ol	Opx	Cpx	Pl
SiO_2	54,87	53,73	61,25	38,13	0,03	40,30	53,53	51,07	61,12
TiO_2	0,01	0,40	0,05	5,04	0,00	0,00	0,14	1,46	0,03
Al_2O_3	3,94	4,05	23,35	15,51	62,70	0,00	4,47	8,74	23,73
Cr_2O_3	0,02	0,16	0,00	0,27	1,69	0,00	0,05	0,17	0,00
MnO	0,17	0,09	0,00	0,01	0,07	0,17	0,20	0,11	0,01

FeO	8,76	2,56	0,06	5,92	13,12	11,35	10,93	3,17	0,02
MgO	31,45	15,57	0,00	19,29	17,08	48,26	29,23	12,61	0,00
CaO	0,58	21,96	4,99	0,01	0,01	0,00	0,80	19,85	4,94
Na_2O	0,15	1,18	9,05	0,30	0,05	0,02	0,16	2,70	9,93
K_2O	0,03	0,01	1,13	10,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,38
Сумма	99,99	99,70	99,89	94,59	94,75	100,09	99,51	99,89	100,15
Mg#	87,22	91,55	-	85,31	68,40	88,34	83,57	95,81	-
Компонент, мас. %	Обн-622/18		Обн-630/18						
	Phl	Sp	Opx	Cpx	Pl	Phl	Sp	Amph	
SiO_2	37,16	0,00	52,93	51,29	61,14	36,64	0,00	42,17	
TiO_2	6,06	0,02	0,21	1,11	0,02	5,62	0,01	3,37	
Al_2O_3	15,77	62,67	5,05	8,48	23,60	15,32	61,92	15,10	
Cr_2O_3	0,11	1,64	0,09	0,17	0,00	0,20	1,86	0,19	
MnO	0,02	0,13	0,26	0,14	0,00	0,03	0,13	0,07	
FeO	6,16	15,40	11,89	4,63	0,02	8,78	17,22	6,38	
MgO	17,83	17,00	28,83	13,36	0,00	17,24	16,31	14,27	
CaO	0,01	0,00	0,47	17,29	5,02	0,00	0,00	10,22	
Na_2O	0,29	0,00	0,10	3,17	10,23	0,32	0,03	4,07	
K_2O	10,00	0,00	0,01	0,01	0,27	10,05	0,00	1,47	
Сумма	93,41	96,86	99,82	99,65	100,31	94,21	97,48	97,30	
Mg#	83,77	67,15	82,42	93,82	-	77,77	64,56	79,95	

Исследования выполнены в рамках Государственного задания ИГАБМ СО РАН, тема № FUFG-2024-0007

Список литературы:

1. Шацкий В. С., Бузлукова Л.В., Ягоутц Э., Козьменко О. А., Митюхин С. И. Строение и эволюция нижней коры Далдын-Алакитского района Якутской алмазоносной провинции (по данным изучения ксенолитов) // Геология и геофизика. – 2005 – Т. 46, № 12 – С. 1273-1289.

2. Brey G. P., Köhler T. Geothermobarometry in four-phase lherzolites II. New thermobarometers., and practical assessment of existing thermobarometers // Journal of Petrology. – 1990 – V. 31 – № 6, – P. 1353–1378.

3. Green D. H., Hibberson W. The instability of plagioclase in peridotite at high pressure // Lithos. – 1970 – V. 3, – P. 209–221.

4. Chalot-Prat F., Falloon T. J., Green D. H., Hibberson W. O. An experimental study of liquid compositions in equilibrium with plagioclase + spinel lherzolite at low pressures (0,75 GPa) // Journal of Petrology. – 2010 – V. 51 – № 11, – P. 2349–2376.

НОВЫЕ ФОРМЫ МНОГОКРАТНОГО ДВОЙНИКОВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ АЛМАЗА ИЗ КОЛЛЕКЦИИ КОМПАНИИ «АЛРОСА»

Павлушин А. Д.[1] (*pavlushin@diamond.ysn.ru*),
Демидова Л. А.[2] (*DemidovaLA@alrosa.ru*),
Иванов К. О.[2] (*IvanovKO@alrosa.ru*)

[1]Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск, [2]АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Москва

Аннотация: В работе рассмотрены уникальные образцы из коллекции редких форм алмаза компании «АЛРОСА». Выявлены и описаны три новых типа многократного двойникования октаэдрических кристаллов по шпинелевому закону: двухзаходный циклический двойник вокруг оси [110], кольцевидный циклический двойник контактных двойников вокруг оси [111] и поликомпонентный многократный двойник взаимного проникновения. Показано, что наличие входящих двугранных углов на контактных двойниках октаэдрических кристаллов обусловливает образование огранённых полостей и сквозных отверстий за счёт ростового захвата сингенетических минеральных включений. Полученные результаты расширяют представления об онтогении природного алмаза и механизмах формирования его редких морфологических типов двойникования.

Ключевые слова: *алмаз, двойник, многократное двойникование, шпинелевый закон двойникования, циклический двойник*

В коллекции редких форм кристаллов алмаза компании «АЛРОСА» представлены образцы необычной морфологии и внутреннего строения, представляющие значительный интерес для интерпретации генезиса индивидов и агрегатов природного алмаза. Представители коллекции получили собственные имена и стали объектом специальных исследований и экспонатами выставок. Образование таких образцов во многих случаях обусловлено различными типами двойниковых срастаний [1, 2]. Сложное многократное двойникование кристаллов по шпинелевому закону приводит к возникновению неординарных морфологических типов закономерных сростков, требующих уточнения терминологии и генетической интерпретации. Изучение уникальных образцов позволило выявить и описать три новых типа многократного двойникования октаэдрических кристаллов алмаза.

Первый тип – двухзаходный циклический двойник вокруг оси [110] и его представитель алмаз «Циклический двойник» из трубки Нюрбинская (Накынское поле, Якутия). В отличие от классических пятикомпонентных циклических двойников [3, 4, 5], он обладает псевдогексагональным обликом. Его образование связано с последовательным циклическим двойникованием по оси [110], генераторами которого служили уже не одна, а две параллельные грани (111) расположенные на октаэдрических кристаллах параллельного сростка. Предполагается, что необычное срастание индивидов транслировало

положение кристаллических зёрен в агрегате при автоэпитаксии кристаллов поздней генерации на поверхности алмаза класса «борт».

Второй тип – кольцевидный циклический двойник контактных двойников вокруг оси [111] наблюдается в строении двух именных алмазов из архангельского Месторождения имени М.В. Ломоносова. Алмаз «Бублик» представляет собой тороидальный сросток в виде кольца с отверстием посередине из сдвойникованных кристаллов. Алмаз «Древо» также является последовательным двойниковым срастанием кристаллов, образующих огранённую полость в центре алмаза, сообщающейся с поверхностью небольшим отверстием. Последовательное срастание парных контактных двойников образует замкнутое гексагональное кольцо. Входящие двугранные углы, типичные для контактных двойников [6], обращённые к оси циклического двойникования [111], обусловливают появление в алмазах огранённых полостей и сквозных отверстий. Стенки полостей сохраняют первичный слоевой микрорельеф роста и зеркальную симметрию двойниковых компонентов, тогда как внешняя поверхность алмазов несёт следы природного растворения. Это указывает на ростовой захват сингенетических минеральных включений (оливина, пироксена, граната или, что более вероятно, сульфидных фаз) с последующим их разрушением. Механизм захвата представляется аналогичным установленному для футляровидных алмазов типа «матрёшка» [1]: ускоренный рост в направлении границ двойникования приводит к замыканию полой постройки вокруг включения с захватом минеральной среды.

Третий тип – поликомпонентный многократный двойник взаимного проникновения и его представитель алмаз «Василёк» из россыпи Горелый лог (Мирнинское поле, Якутия) формируется путём последовательной генерации новых индивидов на входящих гранях предыдущих генераций по плоскостям {111} с постепенным увеличением числа ориентировок двойникования.

Общим для всех выделенных типов многократных двойников является циклическое или радиально ориентированное последовательное двойникование кристаллов в условиях умеренных пересыщений с преобладанием слоевого механизма роста. Наличие входящих двугранных углов на контактных двойниках играет ключевую роль в образовании огранённых полостей, ростовых щелей и сквозных отверстий. Этот морфогенетический эффект объясняет происхождение уникальных футлярообразных форм алмаза служит примером захвата сингенетических включений мантийных минералов, получивших алмазную огранку.

Таким образом, коллекция редких форм алмаза «АЛРОСА» представляет ценный материал для реконструкции онтогении природного алмаза. Обнаружение новых типов многократного двойникования, не имеющих прямых аналогов среди других минералов, подчёркивает специфику процессов кристаллизации алмаза в мантийных условиях.

Список литературы:

1. Павлушин А.Д., Коногорова Д.В. Кристаллогенетические предпосылки возникновения уникальной формы алмаза «Матрешка» // Геохимия. 2023. – Т. 68. № 3. – С. 271–284.
2. Павлушин А.Д. Особенности морфологии и образования двойников прорастания кубических кристаллов алмаза // Геохимия. 2025. – Т. 70. № 2. – С. 146–157.
3. Орлов Ю. Л. Морфология алмаза – М.: Изд. АН СССР, 1963 – 235 с.
4. Орлов Ю. Л. Минералогия алмаза – М.: Изд. АН СССР, 1973 – 223 с.
5. Ферсман А. Е. Кристаллография алмаза – Л.: Изд. АН СССР, 1955 – 568 с.
6. Hartman P. On the morphology of growth twins // Z. Kristallogr. – 1956. – Vol. 107. – P. 225–237.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ АЛМАЗА В ВОССТАНОВЛЕННОЙ МЕТАЛЛСОДЕРЖАЩЕЙ МАНТИИ

Пальянов Ю. Н.[1] (*palyanov@igm.nsc.ru*),
Баталева Ю. В. [1] (*bataleva@igm.nsc.ru*),
Борздов Ю. М. [1] (*borzdov@igm.nsc.ru*),
Куприянов И. Н. [1] (*spectra@igm.nsc.ru*)

[1]*Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск*

Аннотация: Представлены результаты экспериментального моделирования возможных механизмов генезиса алмаза в восстановленной металлсодержащей мантии. Кристаллизация алмаза реализована в результате охлаждения металл-углеродных расплавов, их сульфидизации и редокс взаимодействия металл-карбонат.

Ключевые слова: *алмаз, высокобарический эксперимент, восстановленная мантия*

По современным представлениям алмаз образуется в очень широком диапазоне составов среды кристаллизации и P,T,fO_2-параметров, что обосновывает его полигенность. В последние годы убедительно доказано, что что генезис части алмазов, включая алмазы типа Куллинан, связан с их кристаллизацией из металл-углеродных расплавов в восстановленной мантии [1,2]. Представляется актуальным экспериментально смоделировать возможные механизмы кристаллизации алмаза и определить индикаторные характеристики алмазов, специфичные для различных условий. Эксперименты проведены в системах Fe-Ni-C и Fe-C на многопуансонных аппаратах высокого давления БАРС в интервале давлений 5,5-7,5 ГПа.

Учитывая высокую растворимость углерода в металлических (Fe,Ni) расплавах и ее зависимость от температуры, одним из наиболее вероятных сценариев образования алмаза является снижение температуры. Экспериментально установлено, что режим охлаждения, возможный в восстановленной конвектирующей металлсодержащей мантии приводит к гетерогенной нуклеации и росту алмаза. В системе Fe,Ni-C при кристаллизации алмаза с различными скоростями охлаждения установлены закономерные изменения морфологии алмаза в ряду октаэдр-куб, увеличение содержания примеси азота в алмазе от 100 до 970 ppm и закономерное изменение изотопного состава углерода алмаза [3]. В системе Fe-C алмазы, синтезированные в режиме снижения температуры, имеют октаэдрический габитус и не обнаруживают закономерных изменений в ряду октаэдр-куб. При медленном охлаждении железо-углеродного расплава стадия кристаллизации алмаза сменяется стадией растворения с образованием округлых кристаллов в области стабильности «Fe_3C-расплав». Алмазы, синтезированные в системе Fe-C содержат примесь азота в форме C-центров на уровне 30-60 ppm и относятся к малоазотным. В кристаллах алмаза с контрастно неоднородными зонами роста, сформиро-

ванными в режиме охлаждения, установлены трещины и псевдовторичные включения когенита и предложен механизм их образования. Эти включения морфологически подобны включениям в природных алмазах, генетически связанных с металл-углеродными расплавами [2].

Экспериментально изучено влияние содержания серы в системе Fe-Ni-C на процессы кристаллизации алмаза, морфологию и дефектно-примесный состав. Обоснована ингибирующая роль сульфидов при кристаллизации алмаза в металл-углерод-сульфидном расплаве. Установлено, что при 6 ГПа и 1400 °С увеличение содержания серы от 0 до 20 % приводит к снижению степени трансформации графита в алмаз со 100 % до нуля, при этом растворимость углерода в расплаве снижается с 6,6 до 0,4 мас.% [4]. Установлено, что с увеличением содержания серы в расплаве от X_S = 0 до X_S = 10-15 мас.% содержание примесного азота в алмазах уменьшается от 50-100 до 10-15 ppm. В экспериментах реализован механизм кристаллизации алмаза за счет смешения металл-углеродного и сульфидного расплавов, а также при миграции серы через силикатную матрицу (оливин) к металл-углеродному расплаву [5]. Обосновано, что механизм образования алмаза в процессе сульфидизации металл-углеродных расплавов является одним из возможных сценариев генезиса алмаза в восстановленной мантии.

При реакции металлического расплава (Fe, Fe-Ni) с карбонатом (Mg,Ca) CO_3, моделирующем мантийно-коровое взаимодействие, установлен редокс механизм образования алмаза [6,7]. Разработана методика, позволяющая создавать в кристаллизационной ампуле градиент фугитивности кислорода порядка 4 лог. единиц, и, соответственно, редокс фронт. В результате взаимодействий карбонат-Fe^0 и карбонат-Fe,Ni алмазы синтезированы как в восстановительных (металлический расплав), так и в окислительных (расплав карбоната) условиях, за счет единого источника углерода – исходного карбоната. Полученные алмазы резко контрастны по составу включений, содержанию дефектно-примесных центров и изотопному составу углерода. Это позволяет использовать установленные закономерности в качестве индикаторов механизма кристаллизации и объяснить возможную гетерогенность природных алмазов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №24-17-00032, https://rscf.ru/project/24-17-00032/.

Список литературы:

1. Smith E. M., Shirey S. B., Nestola F., Bullok E. S. Large gem diamonds from metallic liquid in Earth's deep mantle // Science. – 2016 – V. 354, № 6318 – P. 1403-1405.
2. Shatsky V. S., Ragozin A. L., Logvinova A. M., Wirth R., Kalinina V. V., Sobolev N. V. Diamond-rich placer deposits from iron-saturated mantle beneath the northeastern margin of the Siberian Craton // Lithos. – 2020 – V. 364 – 105514.
3. Palyanov Yu. N., Borzdov Yu. M., Kupriyanov I. N., Nechaev D. V., Reutsky V. N.

Diamond formation via cooling in reduced metal-rich mantle environments // Lithos. – 2026 – V. 532–533 – 108509.

4. Palyanov Y. N., Borzdov Y. M., Khokhryakov A. F., Bataleva Y. V., Kupriyanov I. N. Effect of sulfur on diamond growth and morphology in metal-carbon systems // CrystEngComm. – 2020 – V. 22 – № 33 – P. 5497-5508.

5. Palyanov Y. N., Borzdov Y. M., Bataleva Y. V., Kupriyanov I. N. Diamond formation during sulfidation of metal–carbon melts // Diamond and Related Materials. – 2021 – V.120 – 108660.

6. Palyanov Yu. N., Bataleva Yu. V., Sokol A. G., Borzdov Yu. M., Kupriyanov I. N., Reutsky V. N., Sobolev N. V. Mantle–slab interaction and redox mechanism of diamond formation // PNAS. – 2013 – V. 110 – № 51 – P. 20408-20413.

7. Пальянов Ю. Н., Баталева Ю. В., Борздов Ю. М., Куприянов И. Н., Нечаев Д. В. Экспериментальное моделирование мантийно-корового взаимодействия в системе металл-карбонат, условия кристаллизации и индикаторные характеристики алмаза // Геология и геофизика. – 2023 – Т. 64 – № 8 – С. 1073–1094.

О ФОРМАХ РОСТА АЛМАЗОВ РАЗНОВИДНОСТИ I ПО КЛАССИФИКАЦИИ Ю.Л.ОРЛОВА

Титков С.В.[1, 2] (*titkov.sergey1965@gmail.com*)

[1]ИГЕМ РАН, г. Москва, [2]МГРИ, г. Москва

Аннотация. В работе рассмотрены формы роста алмазов разновидности I по классификации Ю.Л.Орлова, которые наиболее широко распространены почти на всех месторождениях мира. Среди них выделены кристаллы с послойными, антискелетными, смешанногабитусными, скелетными и друзоподобными формами роста.

Ключевые слова: *природные алмазы, классификация Ю.Л.Орлова, послойный рост, антискелетный рост, смешанногабитусный рост, скелетный рост, друзоподобный рост, формы растворения*

Ю.Л.Орлов предложил свою классификацию природных алмазов ещё в 1965 году [4, 5]. Основой выделения разновидностей алмазов в этой классификации являются визуальные признаки алмазов и формы их роста. Эта классификация оказалась наиболее удобной и до настоящего времени используется при проведении исследований алмазов как в нашей стране, так и за рубежом. Классификация Ю.Л.Орлова перепечатывается практически во всех многочисленных отечественных монографиях, посвящённых алмазам, почти в неизменённом виде. Однако за большой период времени, прошедший со времени её первой публикации, получено большое количество новых данных по внутреннему строению алмазов и формам их роста. При этом установлено, что внешняя морфология кристаллов алмазов часто не соответствует их внутреннему строению. В настоящей работе рассмотрены алмазы разновидности I, в качестве формы роста которых в классификации Ю.Л.Орлова был изначально выделен октаэдр и которые наиболее широко распространены на всех месторождениях мира (до 99%). С учётом полученных к настоящему времени данных среди алмазов разновидности I можно выделить следующие формы роста.

1. *Плоскогранные формы роста.* В результате развития послойного роста образуются плоскогранные острорёберные октаэдры с однородным внутренним строением, которые, как известно, достаточно редко встречаются среди природных алмазов. Наибольшие их содержания наблюдаются в трубках Мирнинского кимберлитового поля Сибирской платформы [3]. Среди них иногда встречаются кристаллы с исключительной степенью совершенства с изотропными картинами двупреломления, но чаще в них в поляризованном свете наблюдается прямолинейная октаэдрическая зональность. Образование таких кристаллов, очевидно, происходило при максимально благоприятных стабильных условиях кристаллизации.

2. *Антискеленые формы роста.* Антискелетный рост проявляется в таком развитии октаэдрических граней, когда каждый последующий слой

треугольной формы имеет площадь меньшую, чем предыдущий. При этом формируются кристаллы с характерной параллельной штриховкой на рёбрах, реже - округлые кристаллы ромбододекаэдрического габитуса с параллельной штриховкой на гранях. При этом формируется округлый фронт роста, а во внутреннем строении наблюдаются округлые зоны роста. Такие зоны роста могут образовываться на разных этапах развития кристалла, иногда чередуясь с плоскогранными зонами [7, 8]. В результате незначительного растворения параллельная штриховка преобразуется в сноповидную, иногда создавая иллюзию развития дитригональных слоёв роста [5]. Антискелетные кристаллы, часто описываемые как «ламинарные октаэдры», наиболее широко распространены в кимберлитовых месторождениях, по крайней мере, Сибирской платформы [3]. Развитие антискелетного роста связано с примесным отравлением торцов растущих октаэдрических слоёв кристалла [см. 8].

3. *Смешанногабитусные формы роста.* Такие кристаллы образованы в результате одновременного развития октаэдрических и кубических граней. Постоянное соотношение интенсивности развития этих форм на всём протяжении роста с формированием кубооктаэдрических кристаллов описано только у единичных образцов [12]. В большинстве случаев кубические и октаэдрические сектора одновременно развивались только на начальных этапах роста, а затем кубические сектора роста выклинивались, и кристаллы приобретали форму октаэдра, часто визуально весьма совершенного [7]. Установлены и более сложные типы эволюции секториальных структур алмазов, в том числе пульсирующая смена форм роста [6]. Содержания таких кристаллов на некоторых месторождениях может достигать 30% [2]. Данные кристаллы, очевидно, следует выделять как разновидность I+II (разновидность II в классификации Ю.Л.Орлова – это жёлто-оранжевые алмазы, формой роста которых является куб). Хотя внешне они могут выглядеть как типичные кристаллы разновидности I. Наличие скрытых внутри них кубических секторов роста легко может быть установлено при наблюдении картин фотолюминесценции. Эволюция секториальных структур алмазов, как было показано экспериментально, обусловлена, прежде всего, изменением температуры минералообразующей среды [см. 7].

4. *Скелетные формы роста.* Смешанногабитусные кристаллы с совершенными однородными кубическими секторами роста встречаются среди природных алмазов редко [11, 12]. Гораздо более распространены алмазы, у которых в кубических секторах наблюдается характерная вогнутая зональность, образованная в результате скелетного роста [7, 13]. Описаны единичные смешанногабитусные кристаллы, у которых скелетные чашеобразные формы роста наблюдаются и во внешней морфологии [5]. При этом в одновременно развивавшихся октаэдрических секторах наблюдается обычная плоскогранная зональность. Скелетный рост кристаллов, как известно, может быть вызван различными причинами, в том числе, затруднённой диффузией, очень высокой скоростью роста, анизотропией скоростей роста различных простых форм.

5. *Друзоподобные формы переогранения*. В смешанногабитусных кри-

сталлах алмаза выклинивание кубических секторов с антискелетными формами роста происходит, как правило, резко. При этом образуются мелкие октаэдрические микрограньки, которые как бы приспосабливаются к неровным вогнутым поверхностям кубических секторов и, развиваясь, формируют своеобразные друзоподобные структуры роста (при этом алмаз остаётся монокристаллом) [7, 13]. Во внешней морфологии редких кристаллов на кубических поверхностях наблюдается своеобразный узор октаэдрических микровершинок [5]. Такие весьма необычные формы роста кристаллов связаны с резким изменением условий кристаллизации и переходом от скелетного роста кубических секторов к плоскогранному росту октаэдрических секторов.

Следует отметить, что среди алмазов разновидности I широко распространены кристаллы, внешние формы которых сформировалась не в процессе роста, а в результате посткристаллизационного растворения. На начальных этапах растворения на кристаллах алмаза формируется сноповидная штриховка, далее образуются округлые поверхности с характерным гранным швом, отвечающие по своему положению ромбододекаэдру и некоторым другим формам. Мнение об образование таких форм в результате растворения впервые было высказано А.Е.Ферсманом и В.Гольдшмидтом ещё в 1907 году [9]. Однако Ф.Вильямс, М.А.Гневушев, З.В.Бартошинский и другие исследователи в течение многих лет настаивали на том, что в природе алмазы растворяться не могут. Утверждалось, что образование сноповидной штриховки и округлых поверхностей с гранным швом – это результат развития «дитригональных форм роста» [1]. Итоги многолетней дискуссии были поведены в 1973 году в известной монографии Ю.Л.Орлова [5], в которой была убедительно доказана справедливость гипотезы растворения. Позднее эта гипотеза была прекрасно подтверждена экспериментально [10]. В настоящее время можно однозначно утверждать, что «дитригональных форм роста» у природных кристаллов алмаза не существует, как их не существует и ни у каких других минералов.

Исследования выполнены в рамках Государственного задания ИГЕМ РАН, тема FMMN-2024-0017.

Литература

1. Бартошинский З. В. Минералогическая классификация природных алмазов // Минералогический журнал. – 1983 – Вып. 5 – № 5 – С. 84-93.
2. Бокий Г. Б., Безруков Г. Н., Клюев Ю. А., Налетов А. М., Непша В. И. Природные и синтетические алмазы. – М.: Наука, 1986 – 221 с.
3. Костровицкий С.И., Специус З.В., Яковлев Д.А. и др. Атлас коренных месторождений алмаза Якутской алмазоносной провинции. – Мирный: АЛРОСА, 2015 – 480 с.
4. Орлов Ю.Л. Разновидности кристаллов и поликристаллических сростков алмаза // Новые данные о минералах СССР. Труды Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана. – 1965 – Вып. 16 – С. 141 – 154.
5. Орлов Ю.Л. Минералогия алмаза. 2-е изд. – М.: Наука, 1984 – 264 с.

6. Титков С.В., Сапарин Г.В., Обыден С.К. Эволюция секторов роста природных кристаллов алмаза по данными катодолюминесцентной топографии // Геология рудных месторождений. – 2002 – №5 – С.398-411.

7. Титков С.В. Ростовые дефекты в природных кристаллах алмаза и их генетическое значение // Проблемы рудной геологии, петрологии, минералогии и геохимии. Под ред. Н.П.Лаверова. – М.: ИГЕМ РАН, 2004 – С. 386-410.

8. Титков С.В., Новочадов С.Л., Прокофьев В.Ю., Терентьев С.А., Бортников Н.С. Характер распределения структурных дефектов в кристаллах природных алмазов с округлой зональностью по данным ИК-микроспектроскопии // Доклады РАН. Науки о Земле. – 2026 – Т. 530, № 1

9. Fersman A., Goldschmidt V. Der Diamant. – C.Winter's Universitätcbuchhandlung, 1911 – 274 p. (перевод: Ферсман А.Е.. Кристаллография алмаза. – М.: Наука, 1955 – 567 с.)

10. Khokhryakov A.F., Palyanov Yu.N. The evolution of diamond morphology in the process of dissolution: Experimental data // American Mineralogist. – 2007 – V. 92 – P. 909-917.

11. Lang A.R. Internal structure // The properties of diamond. Ed. Field J.E. –London: Academic Press, 1979 – P. 425-469.

12. Moore M. X-ray studies of the growth of natural diamond // Industrial Diamond Review. – 1988 – N2 – P.59-64.

13. Suzuki S., Lang A.R. Internal structures of natural diamonds revealing mixed-habit growth // Diamond Research (Suppl. Ind. Diam. Rev.). – 1976 – P. 39- 47.

ВКЛЮЧЕНИЯ МИНЕРАЛОВ В ПОЛУПРОЗРАЧНЫХ АЛМАЗАХ ИЗ РОССЫПЕЙ АНАБАРСКОГО АЛМАЗОНОСНОГО РАЙОНА (СЕВЕРО-ВОСТОК СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ)

Угапьева С.С.[1] (*sargylana-ugapeva@yandex.ru*),
Ощепкова М.Г.[1] (*oshchepkovamg28@mail.ru*),
Биллер А.Я.[1] (*n-biller@yandex.ru*),
Павлушин А.Д.[1] (*pavlushin@diamond.ysn.ru*),
Опарин Н.А.[1] (*nik3256-1989@yandex.ru*)

[1]*ИГАБМ СО РАН, г. Якутск*

Аннотация: Представлены результаты комплексного изучения минеральных включений в полупрозрачных кристаллах алмаза из россыпей Анабарского алмазоносного района (рр. Эбелях и Холомолоох). Установлены две основные парагенетические ассоциации включений: эклогитовая (гранаты гроссуляр-альмандин-пиропового состава, омфацит, рутил, пирротин) и сверхглубинная перидотитовая (гарцбургитовые гранаты с аномально высоким содержанием кнорингитового и мэйджоритового компонентов, оливин форстеритового состава), отражающие разные геодинамические обстановки в литосферной мантии под северной частью Сибирской платформы

Ключевые слова: *алмаз, минеральные включения, россыпи, Сибирская платформа, Анабарский район.*

Алмазы из россыпей северо-востока Сибирской палтформы традиционно привлекают внимание исследователей в связи с неоднозначностью их коренных источников. Сингенетичные включения минералов, законсервированные в алмазе, являются прямыми индикаторами состава мантийного субстрата и PT-условий кристаллизации, что делает их ключевым объектом при реконструкции глубинных процессов и прогнозировании коренных источников россыпей. Цель работы - комплексное минералогическое, геохимическое и спектроскопическое исследование включений минералов в полупрозрачных алмазах из россыпей северо-востока Сибирской платформы для установления их парагенетической принадлежности и PT-условий кристаллизации.

Кристаллы алмаза из россыпей р. Эбелях и Холомолоох представлены преимущественно кривогранными додекаэдроидами «уральского» типа (I разновидность по минералогической классификации Ю.Л. Орлова). Поверхность алмазов покрыта шагреневым микрорельефом, наблюдаются полосы пластической деформации вдоль (111), что указывает на значительное растворение. В изученных алмазах определены следующие включения минералов: *Гранаты* встречены в трёх образцах и подразделяются на два парагенезиса. Эклогитовый тип (образцы 6002, 6070) – изометричные жёлто-оранжевые включения размером до 200 мкм. Минальный состав гранатов отвечает аль-

мандин-пиропу со значительной примесью гроссулярового компонента (до 23,6 % gros). В образце (6070) дополнительно фиксируется мэйджоритовый компонент. В гранатах двух образцов содержания Na_2O превышают 0,07 мас. %, что согласно (Sobolev and Lavrent'ev, 1971) свидетельствует об их образовании в области повышенных давлений. Сверхглубинный гарцбургитовый тип (образец 6044) – малиновое включение изометричной формы, характеризуется типично дунит-гарцбургитовым парагенезисом, характерным для эталонных алмазоносных трубок Якутской кимберлитовой провинции (Соболев, 1974). Содержание Cr_2O_3 достигает 8,84 мас. % при низком CaO - 0,85 мас. %. При пересчете минального состава обнаруживается высокое содержание кноррингитового компонента - 21,5 % knor. и примесь мэйджорита - 0,3 % maj. (по Locock 2008). Такой минальный состав говорит о значительной глубине образования в мантии, отвечающему давлению выше 7-8 ГПа. *Оливин* обнаружен в кристаллах 6003 (р. Эбелях) и 7311 (р. Холомолоох) в виде октаэдрических включений размером 35-50 мкм. Химический состав однородный: содержание форстеритового компонента составляет 92,6–93,5 %, примесь NiO варьирует от 0,345 до 0,419 мас. %. Включения характеризуются постоянством состава от центра к краю, что типично для сингенетичных оливинов в алмазах перидотитового парагенезиса. *Клинопироксен – омфацит* установлен в кристалле 6070 в виде двух октаэдрических включений. Состав отвечает омфациту с содержанием жадеитового компонента 55,9-58,9 %, повышенным TiO_2 (0,88 мас. %) и Na_2O (6,48 мас. %), что характерно для эклогитовой ассоциации. *Рутил* обнаружен в том же кристалле 6070 в виде призматических включений, ассоциированных с сульфидным включением. В составе рутила присутствуют примеси Al_2O_3 (1,21-1,79 мас. %), Cr_2O_3 (0,08-0,13 мас. %), MgO (0,09-0,21 мас. %), что типично для рутилов эклогитового происхождения. *Сульфид* представлен пирротином (кристалл 6070) – крупное включение в центральной части алмаза, находящееся в «чёрной розетке» трещин. По составу включение соответствует моносульфидному твёрдому раствору (Mss) (S (34,52 мас. %), Fe (51,62 мас. %), примеси Ni (4,75 %), Cu (1,55 %) и Co (0,49 %)) и свидетельствует о сульфидной дифференциации в мантийных условиях.

Обнаруженные ассоциации включений демонстрируют два принципиально различных парагенезиса, отражающих разные геодинамические обстановки в литосферной мантии под северной частью Сибирской платформы:

Эклогитовый парагенезис (гранат + омфацит + рутил + пирротин) предположительно связан с переработкой корового материала при субдукции океанической коры. Повышенные содержания Na_2O (более 0,07 мас. %) и присутствие мэйджоритого компонента свидетельствуют об образовании в условиях повышенных давлений (Turkin and Sobolev, 2009; Sobolev and Lavrent'ev, 1971).

Дунит-гарцбургитовый сверхглубинный тип (хромистый гранат с высоким Knor и Maj + оливин) фиксирует деплетированный мантийный субстрат, обогащенный хромом, и давление, превышающее типичное для литосферных кимберлитов. Аномально высокое содержание кноррингитового компонента (21,5 %) и наличие мэйджорита в гранате из образца 6044 указывают на кристаллизацию при давлениях, превышающих 7 ГПа. Подобные гранаты

ранее описывались как индикаторы глубинных частей литосферы и переходной зоны мантии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант 25-27-20056).

Список литературы:

1. Соболев Н.В. Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. – Новосибирск: Наука, 1974. – 247 с.
2. Locock A.J. An Excel Spreadsheet to Recast Analyses of Garnet into End-Member Components // Comput. Geosci. – 2008. – Vol. 34. – P. 1769–1780.
3. Turkin A.I., Sobolev N.V. Pyrope-knorringite garnets: overview of experimental data and natural parageneses // Russian Geology and Geophysics. – 2009. – Vol. 50, Iss. 12. – P. 1169–1182.
4. Sobolev N.V., Lavrent'ev Ju.G. Isomorphic sodium admixture in garnets formed at high pressures // Contrib. Mineral. Petrol. – 1971. – Vol. 31. – P. 1–12.

УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ АЛМАЗООБРАЗУЮЩИХ РАСПЛАВОВ-ФЛЮИДОВ

Шацкий А.Ф. (*shatskiyantonf@gmail.com*)

ГЕОХИ РАН, г. Москва

Аннотация: Изучение включений в алмазах указывает на то, что состав мантийных алмазообразующих расплавов варьирует от калиевых алюмосиликатных с растворенным CO_2 до щелочных карбонатитовых (высоко и низкомагнезиальных) и ультракалиевых хлоридных. Непрерывные тренды промежуточных составов этих расплавов привели к предположению об их генетической связи.

Ключевые слова: *алмаз, включения, расплав, магма, мантия, тренды*

Экспериментально установлено, что при параметрах алмазообразования калиевые алюмосиликатные и карбонатные жидкости несмесимы и могут образовываться в результате плавления материала субдуцирующих океанических плит [1]. По составу, расплавы, полученные в экспериментах, напоминают высокомагнезиальные карбонатитовые и алюмосиликатные включения в алмазах из россыпей р. Эбелях и некоторых кимберлитовых трубок. Водно-хлоридные расплавы являются производными карбонатитовых расплавов, содержащих хлориды и воду. Их образование может происходить на фоне понижения температуры или при восстановлении карбонатной составляющей до свободного углерода (алмаза).

Взаимодействие низкомагнезиальных карбонатных расплавов, генерируемых в зонах субдукции, с перидотитовой мантией сопровождается реакцией обмена Ca-Mg в результате которой образуется клинопироксен, а карбонатный расплав становится высокомагнезиальным, как и большинство карбонатитовых включений в алмазах. Также установлено, что калиевые алюмосиликатные расплавы термодинамически неустойчивы в ультраосновной мантии [2,3].

Помимо образования расплавов, разогрев метапелитов выше 1200 °C на глубинах около 200 км сопровождается образованием граната и CO_2 флюида, который сохраняет свою устойчивость в составе эклогитового парагенезиса [4]. Эти результаты хорошо согласуются с находками CO_2 в виде включений в природных алмазах.

Полученные экспериментальные результаты позволяют сделать следующие заключения о генезисе алмазообразующих расплавов и флюидов:

(1) Несмесимые низкомагнезиальные карбонатитовые и калиевые алюмосиликатные расплавы, а также CO_2 флюид имеют субдукционное происхождение, сохраняют свою устойчивость в равновесии с минералами эклогитового парагенезиса [5,6] и неустойчивы в перидотитовой мантии [2].

(2) Образование высокомагнезиальных карбонатитовых расплавов происходило в ультраосновной мантии в результате частичного плавления

карбонатизированных перидотитов, либо в результате переуравновешивания расплавов субдукционного происхождения.

(3) Основу хлоридных расплавов составляют соли гидратированной океанической коры. Генетическую связь этих расплавов с другими алмазообразующими расплавами еще предстоит выяснить.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН).

Список литературы:

1. Shatskiy, A., Arefiev, A. V., Podborodnikov, I. V. & Litasov, K. D. Gondwana Research 75, 154-171, doi:10.1016/j.gr.2019.05.004 (2019).
2. Shatskiy, A., Bekhtenova, A., Podborodnikov, I. V., Arefiev, A. V. & Litasov, K. D. Lithos 374-375, 105725, doi:10.1016/j.lithos.2020.105725 (2020).
3. Shatskiy, A., Bekhtenova, A., Arefiev, A. V., Podborodnikov, I. V., Vinogradova,Y. G. & Litasov, K. D. Gondwana Research 101, 156-174, doi:10.1016/j.gr.2021.07.023 (2022).
4. Виноградова, Ю. Г., Шацкий, А. Ф. & Литасов, К. Д. Геохимия 66, 811-817, doi:10.31857/S0016752521080100 (2021).
5. Shatskiy, A., Bekhtenova, A., Podborodnikov, I. V., Arefiev, A. V., Vinogradova,Y. G. & Litasov, K. D. Gondwana Research In press, https://doi.org/10.1016/j.gr.2021.1010.1016, doi:10.1016/j.gr.2021.10.016 (2022).
6. Shatskiy, A., Bekhtenova, A., Podborodnikov, I. V., Arefiev, A. V. & Litasov, K. D. Chemical Geology 558, 119915, doi:10.1016/j.chemgeo.2020.119915 (2020).

ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗЕРЕН В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ АЛМАЗАХ

Ширяев А. А.[1] (*a_shiryaev@mail.ru*),
Генералов М. Е.[2] (*mgeneralov@mail.ru*),
Аверин А. А.[1] (*alx.av@yandex.ru*)

[1]ИФХЭ РАН, г. Москва, [2]Минмузей РАН, г. Москва

Аннотация: *В работе описаны спектры фотолюминесценции поликристаллических алмазов (разновидность VIII). Показано, что в ряде случаев в одном сростке присутствуют алмазные индивиды с контрастными наборами точечных дефектов. Наиболее вероятным механизмом образования таких алмазов является срастание монокристаллов различных генераций.*

Ключевые слова: *алмаз, фотолюминесценция, дефекты, поликристаллы*

В природных алмазах известно несколько сотен люминесцирующих центров, связанных с собственными (вакансии и межузельные атомы) и примесными дефектами. Однако обоснованные модели предложены только для небольшого числа люминесцирующих центров. Подавляющее большинство систематических спектроскопических исследований алмазов выполнено на монокристаллах, поликристаллические разновидности этого минерала (например, разновидности VI-IX по классификации Ю.Л.Орлова [1]) изучены существенно хуже. Мелко- и крупнозернистые поликристаллические сростки алмаза состоят из алмазных индивидов разных размеров (от 0.0n до 4-5 мм). Имеющиеся спектроскопические данные свидетельствуют о том, что большинство индивидов содержат азотные дефекты A, B и плейтелетс в различных концентрациях, а также набор люминесцирующих центров. С точки зрения спектроскопических свойств поликристаллы сходны с монокристаллами типа I по физической классификации [2].

При исследовании коллекции поликристаллических образцов (преимущественно разновидность VIII) из коллекции Минералогического музея РАН были обнаружены как нелюминесцирующие сростки, так и образцы с яркой люминесценцией (рис. 1). Особое внимание привлекает тот факт, что во многих образцах присутствуют индивиды алмаза с существенно разным цветом люминесценции, при этом такие зерна могут находиться в непосредственном контакте друг с другом. Цель настоящего исследования состоит в изучении спектров фотолюминесценции индивидуальных кристаллов алмаза из нескольких поликристаллов. Принадлежность образцов к музейной коллекции ограничивает выбор аналитических методов, в связи с этим, спектры фотолюминесценции исследованы только при комнатной температуре, для возбуждения использован лазер 405 нм.



Рис. 1. Фотографии образцов при УФ возбуждении. Часть поликристаллов не люминесцируют, часть демонстрирует однородное свечение всех кристаллитов, некоторые сростки содержат зерна с различным набором люминесцирующих дефектов.

Представленные на рис. 2 спектры фотолюминесценции индивидуальных алмазных кристаллитов и связующей массы иллюстрируют значительный разброс как интенсивности свечения, так и существенные спектральные различия между индивидами в одном поликристалле. В образцах отмечаются как хорошо известные центры (например, N3, S1), так и редкие и, возможно, неизвестные ранее люминесцирующие дефекты. Среди слабо изученных дефектов отметим дефект с бесфононной линией 498 нм с выраженными фононными повторениями с энергией 80 мэВ (рис. 2 B).

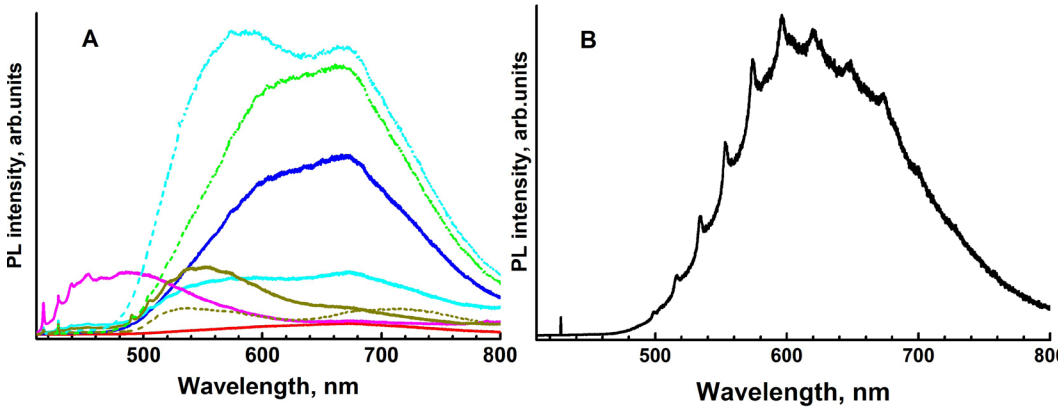


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции поликристаллических алмазов. A – спектры отдельных кристаллитов и связующей массы (пунктирные кривые) в образце FMM_1_83700. Единая шкала интенсивности. B – спектр нового дефекта (образец FMM_1_83712).

Наиболее логичным объяснением гетерогенности некоторых алмазных поликристаллов является предположение об их формировании в результате срастания алмазных кристаллитов разных генераций, а не единого процесса роста.

Список литературы

1. Орлов Ю. Л. Минералогия алмаза. – М.: Наука, 1973 – 222 с.
2. Бокий Г. Б., Безруков Г. Н., Клюев Ю. А., Налетов А. М., Непша В. И. – М.: Наука, 1986 – 220 с.

Минералогический музей
имени А.Е. Ферсмана РАН

310 ЛЕТ

КРИСТАЛЛОХИМИЧЕСКАЯ СЕКЦИЯ

посвящённая 90-летию
В. С. Урусова



29 сентября 2026 года

ГЕНЕТИЧЕСКАЯ КРИСТАЛЛОХИМИЯ И СТРУКТУРНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ МОДУЛЯРНЫХ МИНЕРАЛОВ: ОТ ПРОСТЫХ К СЛОЖНЫМ

Аксенов С.М.[1] (*aks.crys@gmail.com*),
Чуканов Н.В.[2] (*nikchukanov@yandex.ru*),
Расцветаева Р.К.[3] (*rast.crys@gmail.com*)

[1]*ФИЦ КНЦ РАН, г. Апатиты,*
[2]*ФИЦ ПХФ и МХ РАН, г. Черноголовка,* [3]*НИЦ КИ, г. Москва*

Аннотация: Явление модулярности кристаллических структур рассматривается на примере двух семейств цеолитоподобных минералов и неорганических соединений, относящихся к фельдшпатоидам групп канкринита и содалита, а также характеризующиеся наличием тетраэдрических сеток апофиллитового типа.

Ключевые слова: *генетическая кристаллохимия, модулярность, канкринит, содалит, апофиллит*

Модулярная кристаллохимия рассматривает сложные неорганические структуры как результат упорядоченной сборки из дискретных строительных блоков – модулей. Этот подход особенно плодотворен для анализа микропористых алюмосиликатов, где топология тетраэдрических сеток определяет не только кристаллохимическое разнообразие, но и физико-химические свойства материалов [1,6]. Чередование различных фрагментов создает предпосылки для образования гибридных структур и полисоматических серий, а различные способы укладки одних и тех же модулей – к политипии и OD (“order-disorder”) структурам [1,6]. При этом, проявление модулярности кристаллических структур хорошо согласуется с с представлениями о минимальной сложности структурной организации [8].

В рамках данного подхода рассмотрены два крупных семейства, основу которых составляют слоистые тетраэдрические модули – фельдшпатоиды групп канкринита и содалита [3–5] и структуры с сетками апофиллитового типа [2]. В обоих случаях число слоев в периоде повторяемости, способ их объединения и порядок чередования задают тип каркаса, систему полостей и, в конечном счете, свойства материалов.

Основу кристаллических структур фельдшпатоидов групп канкринита и содалита составляют строительные блоки, представляющие собой слои, сложенные шестичленными кольцами. В зависимости от их сдвига друг относительно друга возможны слои *A*, *B* и *C* – типов. Среди них можно выделить три основных семейства:

1. Двухслойные соединения канкринитового типа (СКТ) с последовательностью укладки слоев *AB* и топологией тетраэдрического каркаса типа **CAN**. Их отличительная черта – одномерная система широких 12-членных каналов, заполненных внекаркасными компонентами (Cl^-, CO_3^{2-}, SO_4^{2-}) и

молекулами H_2O.

2. Трехслойные соединения содалитового типа (ССТ) с последовательностью укладки слоев ABC и топологией тетраэдрического каркаса типа **SOD**. Это единственные кубические представители семейства, а тетраэдрический каркас образован исключительно содалитовыми полостями (*sod*-полостями). Благодаря наличию крупных полостей и системе пересекающихся каналов, они являются перспективными материалами.

3. Многослойные канкринитоподобные соединения (КПС) с числом слоев *N* от 4 до 36. Их период повторяемости вдоль оси *c* достигает 95 Å (кирхерит; *N* = 36). В их кристаллических структурах присутствуют разнообразные полости: канкринитовая (*can*), содалитовая (*sod*), лосодовая (*los*), лиотитовая (*lio*) и джузеппетитовая (*giu*) (Рис. 1). Последовательности укладки слоев однозначно связаны с набором полостей, что описывается уравнением:

$n_{can}h_{can}+n_{sod}h_{sod}+n_{los}h_{los}+n_{lio}h_{lio}+n_{giu}h_{giu}=3N$,

где n_i и h_i – количество и высота i-ой пустоты.

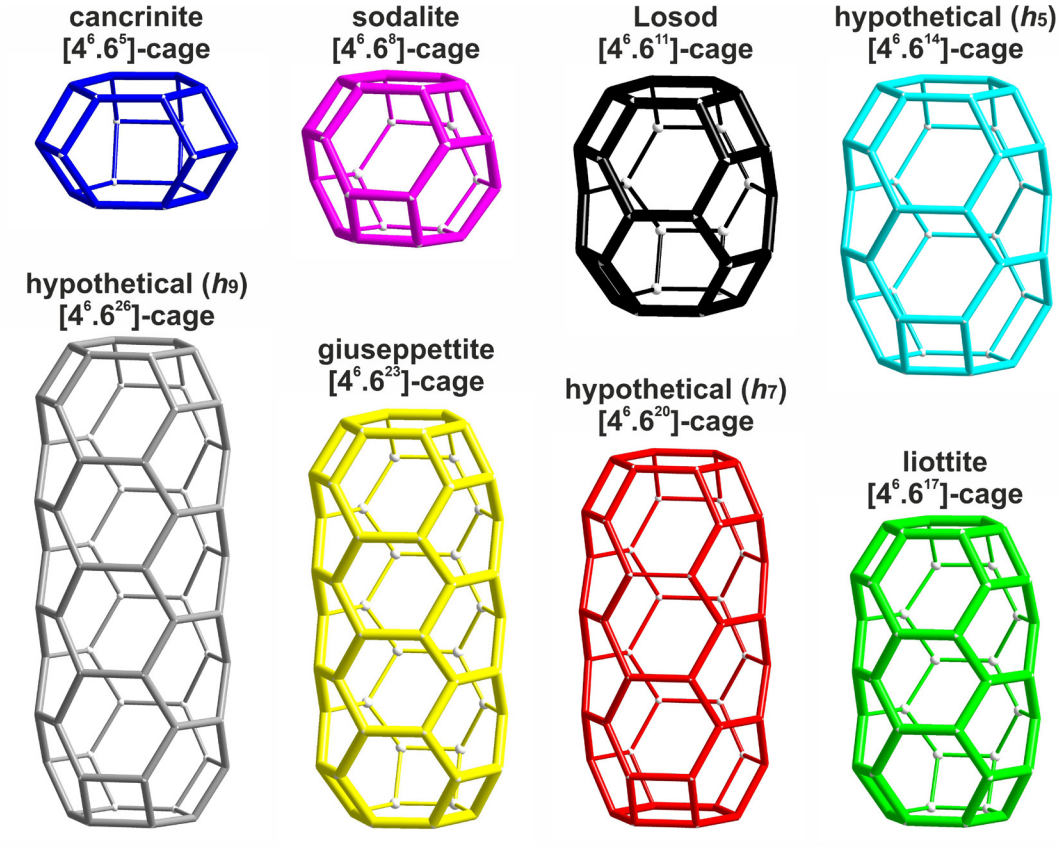


Рис. 1. Типы пустот (в том числе гипотетических) в представителях КПС.

Апофиллитовая тетраэдрическая сетка $[T_4O_{10}]^{q-}$ образована чередованием четырех- и восьмичленных колец в сотношении 1:1 и имеет символ

[$4^1 8^1$] [2,7]. Узлы такой сетки описываются символом Шлефли (4.8^2), а топологическое разнообразие определяется ориентацией тетраэдров относительно плоскости слоя. Различные ориентации, описываемые **ud**-матрицей, порождают различные стереоизомеры (Рис. 2).

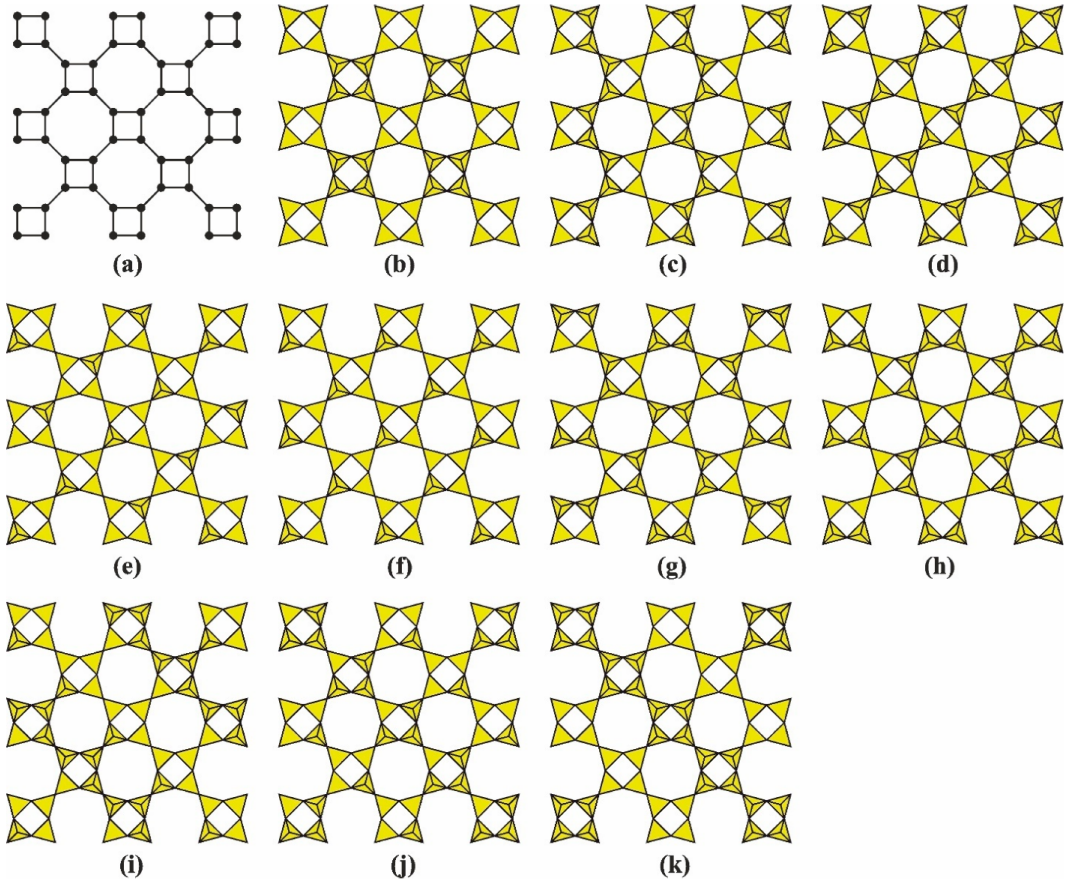


Рис. 2. Схематическое представление сетки с топологией $4^1 8^1$ (a) и геометрических стереоизомеров слоев [Si_4O_{10}] в структурах представителей группы апофиллита (b), кавансита (c), сейдита-(Ce) (d), маунтинита (e), шлыковита (f), карлетонита (g), KNARSI (h), VSH-12Cs (i), $K_2Sb(Si_4O_{10})(OH)$ (j) и $KEu_2(Si_4O_{10})F$ (k).

Наиболее представительное семейство состоит из силикатов, содержащих одинарные тетраэдрические $[Si_4O_9(OH)]^{3-}$ и $[Si_4O_{10}]^{4-}$ слои изомера шлыковитового типа, обнаруженные в кристаллических структурах минералов шлыковита и криптофиллита. Кроме того, такие слои были обнаружены в составе двойных слоев в структурах минералов группы родезита и их синтетических аналогов. Открытие шлыковита и криптофиллита подтвердило общие топологические и стереоизомерные особенности тетраэдрических слоев с топологией апофиллитового типа, а также возможность их конденсации с образованием многослойных силикатных полианионов. Образование двойнослойных полианионов можно представить как поликонденсацию слоев шлыковито-

вого типа через свободные апикальные вершины ($Ø^{ap}$) тетраэдров, ориентированных в противоположных направлениях, что приводит к формированию двойных слоев родезитового типа.

Дальнейшая прямая конденсация слоев шлыковитового типа маловероятна (или крайне редка), поэтому механизмы поликонденсации долгое время не рассматривались. Возможные пути превращения с использованием синтетического K,Sr-аналога родезита (AES-19) в качестве модели включали извлечение щелочноземельных элементов из исходной структуры с последующей топотактической конденсацией двойных слоев родезитового типа. На основе описанных предположений была предложена модель гипотетической каркасной структуры; однако до настоящего времени она не реализована ни в природных, ни в синтетических соединениях.

Определение кристаллической структуры минерала гюнтерблассита впервые выявило трехслойный полианион, сохраняющий топологию апофиллитового типа. Эта структура образуется путем вставки дополнительного TO_4-тетраэдра между одиночными [$T_4Ø^{br}_6Ø^{ap}_4$]-слоями шлыковитового типа и двойными [$T_8Ø^{br}_{13}Ø^{ap}_6$]-слоями родезитового типа, что приводит к образованию тройного [$T^{add}T_{12}Ø^{br}_{23}Ø^{ap}_6$]-слоя гюнтербласситового типа. Механизм конденсации гюнтерблассита (вставка дополнительных тетраэдров) предполагает путь к силикатам с протяженными тетраэдрическими блоками (с более чем тремя слоями шлыковитового типа) и, в конечном итоге, к цеолитоподобным каркасам типа **EDI**, **THO** или **NAT**.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ №26-17-00278.

Список литературы:

1. Аксенов С.М., Чаркин Д.О., Банару А.М. и др. Модулярность, политипия, топология и сложность кристаллических структур неорганических соединений: обзор // Журнал структурной химии. – 2023 – Т. 64, № 10 – С. 117102.

2. Aksenov S.M., Chukanov N.V., Rastsvetaeva R.K. et al. The crystal chemistry and topology of modular structures. III. 2D and 3D zeolites containing tetrahedral layers with the apophyllite-type topology // Molecules. – 2025 – V. 30, № 22 – P. 4477.

3. Chukanov N.V., Aksenov S.M. Structural features, chemical diversity, and physical properties of microporous sodalite-type materials: A review // International Journal of Molecular Sciences. – 2024 – V. 25 – P. 10218.

4. Chukanov N.V., Aksenov S.M., Pekov I.V. Infrared spectroscopy as a tool for the analysis of framework topology and extra-framework components in microporous cancrinite- and sodalite-related aluminosilicates // Spectrochimica Acta A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. – 2023 – V. 287 – P. 121993.

5. Chukanov N.V., Aksenov S.M., Rastsvetaeva R.K. Structural chemistry, IR spectroscopy, properties, and genesis of natural and synthetic microporous cancrinite- and sodalite-related materials: A review // Microporous Mesoporous Materials. – 2021 – V. 323 – P. 111098.

6. Ferraris G., Makovicky E., Merlino S. Crystallography of Modular Materials. – Oxford University Press, 2008 – 372 p.

7. Krivovichev S.V. Topology of microporous structures // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. – 2005. – V. 57, № 1 – P. 17–68.

8. Krivovichev S.V., Krivovichev V.G., Hazen R.M. et al. Structural and chemical complexity of minerals: an update // Mineralogical Magazine. – 2022 – V. 86, № 2 – P. 183–204.

КРИСТАЛЛОХИМИЯ И ТОПОЛОГИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР С СИЛЬНЫМИ ВОДОРОДНЫМИ СВЯЗЯМИ НА ПРИМЕРЕ ПРИРОДНЫХ ФОСФАТОВ И МИНЕРАЛОВ ГРУППЫ ЛАБУНЦОВИТА

Вайтиева Ю.А.[1] (yulia.vaitieva@yandex.ru),
Чуканов Н.В.[2] (nikchukanov@yandex.ru),
Аксенов С.М.[1] (*aks.crys@gmail.com*)

[1] *ФИЦ КНЦ РАН, г. Апатиты,* [2] *ФИЦ ПХФ и МХ РАН, г. Черноголовка*

Аннотация: Методами РСА, колебательной спектроскопии и BVSE-подхода изучена роль сильных водородных связей в структурах анапаита, сфенисцидита и минералов группы лабунцовита (МГЛ). Выявлены механизмы частичного протонирования PO_4-групп в анапаите, локализация NH_4^+ в полостях каркаса сфенисцидита и формирование водных ассоциатов $[H_2O]_4$ в каналах МГЛ.

Ключевые слова: *сильные водородные связи, кристаллохимия, топологический анализ, гетерополиэдрические каркасы, протонная проводимость*

Водные фосфаты железа и микропористые МГЛ привлекают интерес благодаря сложному строению, развитым системам водородных связей и потенциальным областям применения (катодные материалы, протонные электролиты). В данной работе проведено сравнительное исследование трёх структурных типов: сфенисцидита (микропористый каркас с NH_4^+), анапаита (слоистый фосфат с Fe^{2+}) и представителей МГЛ с высокой степенью гидратации. Особое внимание уделено количественной оценке вклада водородных связей в общую ковалентность с использованием COHP-анализа.

Кристаллическая структура сфенисцидита из Керченского железорудного бассейна (Крымский полуостров) базируется на тетраядерных кластерах $[M_4\varphi_{20}]$ (M = Fe^{3+}; φ = O^2, OH, H_2O^0), образованных четырьмя октаэдрами $M\varphi_6$ [1]. Соседние кластеры соединяются между собой тетраэдрами PO_4 (<P–O> = 1,529 Å и 1,533 Å), образуя гетерополиэдрический микропористый квазикаркас (Рис. 1). Крупные полости и каналы заполнены внекаркасными одновалентными катионами, в частности группой NH_4^+, которая частично замещена катионами K^+, а также внекаркасными молекулами воды. Топологические особенности минерала описываются следующим натуральным тайлингом: $[4^3]_6[4^2.8^2]_4[4^4][8^3]_2[4^3.8^3]_2$.

Топологический анализ катионной сетки в *0-1-2*-свободном представлении показал, что каркас сфенисцидита реализует топологический тип **3,4²,5,6T42**, ранее детально не описанный в неорганической химии. Установлено, что катионы NH_4^+ локализованы в тайлах типа **t-jnt**-1, а молекулы воды и OH^--группы – в наиболее крупных полостях $[4^3.8^3]$.

С использованием BVSE-подхода рассчитаны энергетические барьеры диффузии. Для протонов они составляют 0,91–1,05 эВ, что указывает на воз-

можность протонной проводимости. Установлена принципиальная возможность ионного обмена Na^+/K^+ в структуре, при котором наблюдается снижение значений энергетических барьеров до 0,15–0,20 эВ для Na^+ и 0,47–0,53 эВ для K^+.

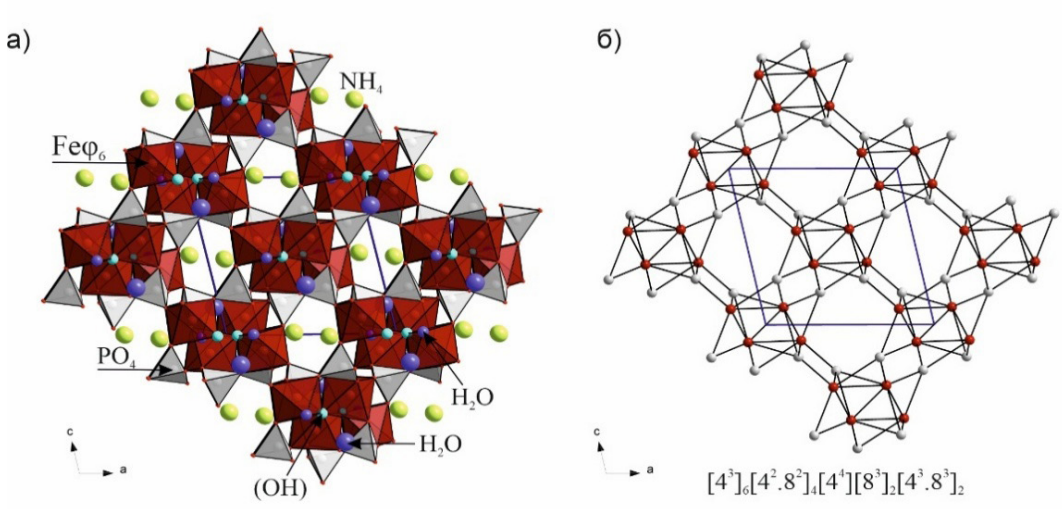


Рис. 1. Общий вид кристаллической структуры сфенисцидита с общей формулой $(NH_4)Fe^{3+}_2(PO_4)_2(OH)\cdot 2H_2O$ в проекции на плоскость *ac* (а); катионная сетка, описывающая топологические особенности кристаллической структуры сфенисцидита (б).

Кристаллическая структура анапаита из Эльтиген-Ортельского месторождения основана простыми кластерами $[Fe^{2+}(PO_4)_2(H_2O)_4]$ [3,4], в которых два PO_4 делят общие вершины с октаэдрами $Fe^{2+}\varphi_6$ (где $\varphi = O^{2-}, H_2O^0$) (Рис. 2). Соседние кластеры связываются полиэдрами $Ca\varphi_8$ (где $\varphi = O^{2-}, H_2O^0$), образуя гетерополиэдрический каркас с широкими каналами, вытянутыми вдоль оси ***a***. В каналах находятся молекулы воды, связанные с атомами кислорода фосфатных групп водородными связями: две сильные (с расстояниями *D*···*A* около 2.6 Å) и две средней силы (с расстояниями *D*···*A* в пределах 2,7–2,8 Å) (Табл. 1). Топологические особенности гетерополиэдрического каркаса описываются следующим натуральным тайлингом: $[4^4.6^2.8^2][3^8.4^2.8^2]$.

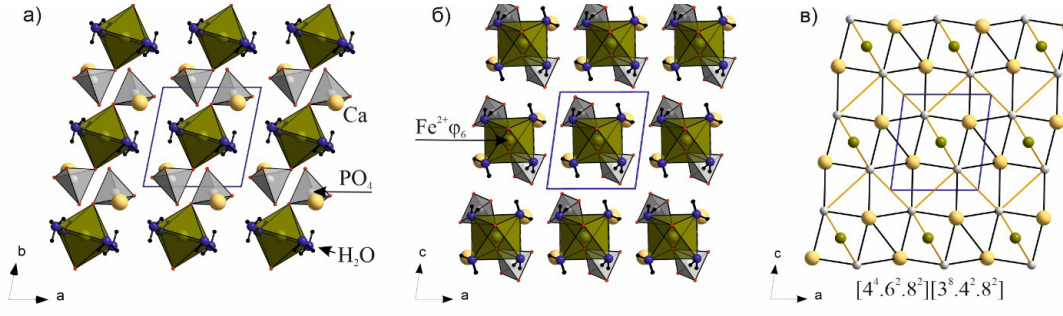


Рис. 2. Кристаллическая структура анапаита с общей формулой $Ca_2Fe^{2+}[PO_4]_2\cdot 4H_2O$, спроецированная на плоскости *ab* (а) и *ac* (б) без октаэдров $Ca\varphi_8$; катионная сетка, описывающая топологические особенности кристаллической структуры анапаита (в).

Табл. 1. Водородные связи в изученном образце анапаита.

D—H···A	*D*—H	H···*A*	*D*···*A*	∠*D*—H···*A*	Прочность водородной связи
H_2O2—$H1^{H2O}$···$O2^{vii}$	0,79 (3)	2,01 (3)	2,7813 (18)	165 (3)	Средней силы
H_2O1— $H1^{H2O}$ ···$O1^{vi}$	0,87 (3)	1,74 (3)	2,6001 (17)	170 (3)	Сильная
H_2O2— $H2^{H2O}$ ···$O4^{vi}$	0,87 (4)	1,87 (4)	2,7252 (17)	171 (4)	Средней силы
H_2O1— $H2^{H2O}$ ···$O4^{x}$	0,90 (3)	1,70 (3)	2,5921 (17)	175 (3)	Сильная

Коды симметрии: (vi) -*x*+2, -*y*+1, -*z*; (vii) *x*-1, *y*+1, *z*; (x) *x*-1, *y*, *z*; (xi) -*x*+1, -*y*+1, -*z*.

На основе данных ИК-спектроскопии и расчета BVS предложены два возможных сценария миграции протонов. В первой модели протон от молекулы H_2O1 протонирует атом кислорода O1 фосфатной группы; во второй модели — от молекулы H_2O2 на вершину O2. Показано, что система сильных водородных связей обеспечивает частичное протонирование фосфатных групп, что создает предпосылки для протонной проводимости в структуре анапаита (Рис. 3).

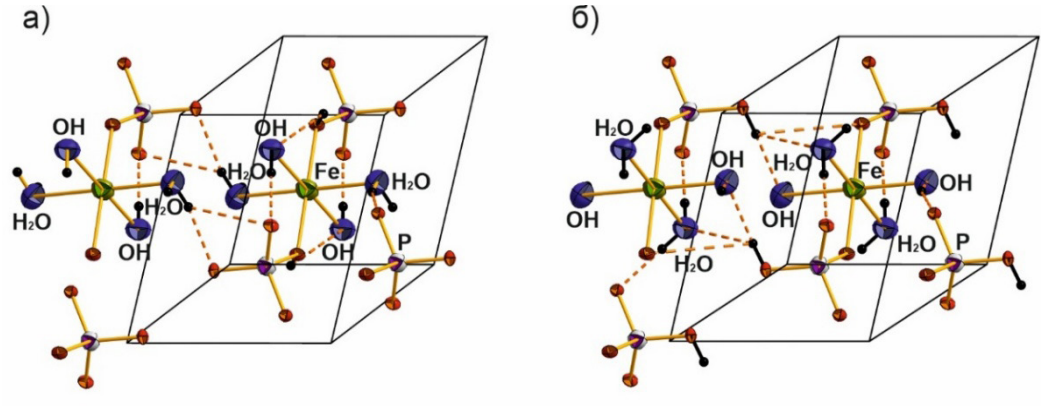


Рис. 3. Возможные модели статистически неупорядоченных локальных водородных связей в анапаите, основанные на различной заселенности позиций молекулами воды и гидроксильными группами. Характер заселенности лигандов гидроксильными группами или молекулами воды определяет тип химической связи.

Природные и синтетические микропористые цеолитоподобные соединения с гетерополиэдрическими каркасами, образованными как тетраэдрами, так и октаэдрами (или пятивершинниками), обладают широким структурным разнообразием благодаря различным способам конденсации полиэдров [5-7]. Были исследованы два образца МГЛ из Хибинского и Ловозерского щелочных массивов – промежуточных членов твердого раствора цепинит-Na–«цепинит-Ba»–цепинит-K, характеризующихся пр. гр. *C*2/*m* и высокой степенью гидратации.

Гетерополиэдрические *MT*-каркасы изученных образцов аналогичны

каркасам ранее описанных представителей МГЛ. Основные различия связаны с распределением внекаркасных катионов и молекул воды по *A*-, *B*-, *C*- и *D*-позициям. Основные особенности отражены в уточненных кристаллохимических формулах ($Z = 2$):

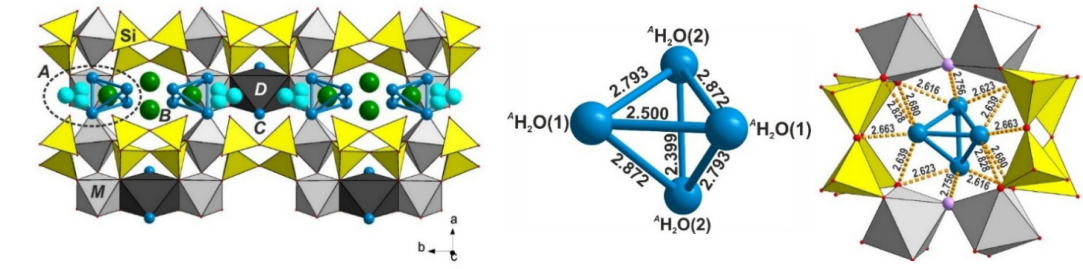
$|^{A}[Na_{0,84}K_{0,6}[(H_2O)_4]_{5,2}]^{B}K_{0,2}{}^{C}Ba_{0,25}{}^{D}[Ca_{0,35}Na_{0,15}Fe_{0,025}(H_2O)]|\{^{M1}(Ti_{1,2}Nb_{0,8})^{M2}(Ti_{1,1}Nb_{0,9})(O,OH)_4(Si_4O_{12})_2\}$ для образца **1**

И

$|^{A}[Na_{1,6}(H_2O,H_3O)_{0,4}]^{B}K_2{}^{C}(Ba_{0,51}Sr_{0,21})^{D}[Mn_{0,3}Ca_{0,2}(H_2O)](H_2O)_4|\{^{M1}(Ti_{1,94}Nb_{0,06})^{M2}(Ti_{1,88}Nb_{0,12})(O,OH)_4(Si_4O_{12})_2\}$ для образца **2**,

где фигурными скобками показан состав позиций гетерополиэдрического *MT*-каркаса, а прямыми – состав внекаркасных позиций.

В кристаллической структуре одного из образцов в широких каналах выявлены нейтральные тетраэдрические водные ассоциаты $[H_2O]_4$. Расстояния между атомами кислорода, располагающимися в вершинах $[H_2O]_4$-тетраэдра, варьируют от 2,40 до 2,83 Å, что свидетельствует о сильных водородных связях. Данные ассоциаты стабилизированы водородными связями с кислородами каркаса (расстояния O···O 2,62–2,83 Å). Короткое расстояние (2,756 Å) между молекулой воды и мостиковой (O,OH)-вершиной между октаэдрами указывает на частичное протонирование водного ассоциата с образованием сложного гидратного комплекса протона (Рис. 4).



(а) (б) (в)

Рис. 4. Нейтральные тетраэдрические водные $[H_2O]_4$-ассоциаты в каналах кристаллической структуры образца 1, которые преобладают в A-позиции кристаллической структуры над натрием (голубые шары) и калием (зеленые шары) (а). Расстояния между молекулами воды в $[H_2O]_4$-тетраэдре (б) и система водородных связей в каналах кристаллической структуры образца 1 (в); розовый шар – мостиковая (O,OH)-вершина между соседними MO_6-октаэдрами.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 26-17-00278.

Список литературы:

1. Cavellec, M., Riou, D., Ferey, G. Synthetic spheniscidite // Acta Crystallographica Section C: Crystal Structure Communications – 1994 – V. 50, P. 1379–1381.
2. Chukanov N.V., Vigasina M.F., Rastsvetaeva R.K., Aksenov S.M., Mikhailova J.A., Pekov I.V. The evidence of hydrated proton in eudialyte-group minerals based on Raman spectroscopy data // Journal of Raman Spectroscopy – 2022 – V. 53, P. 1188–1203.
3. Chukanov N.V., Rastsvetaeva R.K., Zubkova N.V., Vigasina M.F., Pekov I.V., Zolotarev A.A., Mikhailova J.A., Aksenov S.M. Spectroscopic characterization of extra-framework hydrated proton complexes with the extremely strong hydrogen bonds in microporous silicate minerals // Journal of Raman Spectroscopy – 2024 – V. 55, P. 581–597.
4. Asmis K.R., Pivonka N.L., Santambrogio G., Brümmer M., Kaposta C., Neumark D.M., Wöste L. Gas-Phase Infrared Spectrum of the Protonated Water Dimer // Science (80-.) – 2003 – V. 299, P. 1375–1377.
5. Rocha J., Lin Z. Microporous Mixed Octahedral-Pentahedral-Tetrahedral Framework Silicates // Reviews in Mineralogy and Geochemistry – 2005 – V. 57, P. 173–201.
6. Férey G. Hybrid porous solids: past, present, future // Chemical Society Reviews. – 2008 – V. 37, P. 191– 214.
7. Cheetham A.K., Férey G., Loiseau T. Open-Framework Inorganic Materials // Angewandte Chemie International Edition – 1999 – V. 38, P. 3268–3292.

РАЗВИТИЕ ИДЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ КРИСТАЛЛОХИМИИ В ТРУДАХ В.С.УРУСОВА

Еремин Н.Н.[1,2] (*neremin@mail.ru*)

[1]*Геологический факультет МГУ, г. Москва,* [2] *ИГЕМ РАН, г. Москва*

Аннотация: В докладе описывается развитие идей энергетической кристаллохимии сквозь призму научных исследований академика Урусова. Приводятся его основные публикации в этом направлении от пионерских работ 70-ых годов XX века до современных подходов, основанных на принципе энергетического минимума.

Ключевые слова: *энергетическая кристаллохимия, моделирование структур кристаллов, предсказание функциональных свойств материалов.*

Академик Урусов Вадим Сергеевич (1936-2015) – лауреат Государственной премии РФ в области науки и техники, лауреат премий РАН имени Ферсмана и Федорова, заведовал кафедрой кристаллографии и кристаллохимии Московского университета более 30 лет – с 1983 по 2025 год. За свою жизнь он опубликовал более 500 научных трудов, включая большое число монографий и учебников. Особо отметим, что последовательно развивая идеи, сформулированные еще Вернадским, Ферсманом и Виноградовым, он вывел на новый, уровень важнейший раздел науки об упорядоченном состоянии вещества – энергетическую кристаллохимию. Именно А.П. Виноградов, показав в свое время молодому аспиранту Урусову книгу геохимика Лебедева “Основы геоэнергетического анализа геохимических процессов”, фактически предопределил дальнейшую научную судьбу Вадима Сергеевича на многие десятилетия [1].

К середине 70-х годов XX-ого века Урусов смог последовательно накопить несколько тысяч ссылок, экспериментальных данных и прогнозных величин, кратких рефератов по самым различным вопросам кристаллохимии и энергетики кристаллов. Обладая таким уникальным собранием данных по энергетической кристаллохимии, он суммировал эти сведения в виде одноименной монографии в 1975 году [2]. Эта книга очень быстро стала библиографической редкостью, заинтересовав не только кристаллографов, но геологов, химиков и физиков. Более развернутое и глубокое содержание основной главы этой книги, посвященной энергетической теории твердых растворов, которой ученый очень активно занимался в 70-ые годы, было чуть позже оформлено в виде его докторской диссертации, а потом и монографии [3].

Бурное развитие с начала 80-ых годов вычислительной аппаратуры позволило В.С. Урусову и его ученикам перейти к решению проблем и задач, изложенным в этих монографиях на новом, уже количественном уровне. Его научная группа одной из первых в мире начала развивать метод компьютерного моделирования структуры и свойств природных и синтетических кристаллов путем минимизации энергии, которая вычисляется с помощью

потенциалов межатомного взаимодействия. Такой подход позволил теоретически прогнозировать не только чистые вещества и идеальные кристаллы с фиксированной стехиометрией, но и кристаллы с дефектами, вплоть до протяженных твердых растворов замещения. Это очень существенно приблизило результаты энергетического моделирования к реальной картине существования минерала в природе, а также поведения синтетического соединения в процессе роста в лабораторных условиях.

Первый удачный опыт таких расчетов был зафиксирован в кандидатской диссертации аспиранта Урусова Дубровинского Л.С. (1986) [4] и монографиях: «ЭВМ – моделирование структуры и свойств минералов» (1989) [5] и «Конструирование вероятных кристаллических структур минералов» (1990) [6]. Последняя книга до сих пор служит на кафедре кристаллографии МГУ одним из основных учебных пособий в курсе теоретической кристаллохимии для старших студентов и магистрантов. Выступая в 1986 году на защите диссертации Дубровинского, Урусов произнес следующую фразу: «Если бы 10 лет назад меня спросили, может ли теоретическое предсказание атомной структуры минерала конкурировать по точности с рядовым рентгеноструктурным анализом, я бы ответил категорически – «нет!». Теперь я думаю иначе и считаю, что уже виден тот день, когда уточнение кристаллической структуры будет быстрее и дешевле проводить теоретическим путем, а не экспериментально. А в тех случаях, когда мы сталкиваемся с отсутствием хороших кристаллов, нестабильными и неустойчивыми фазами, этот путь окажется единственно возможным».

Будущее показало правильность этого высказывания. В своих последующих работах Урусов и его ученики разработали новые методические подходы к моделированию локальной структуры и свойств твердых растворов, которые были систематизированы в ряде монографий, например, в [7].

Хочется подчеркнуть, что данное направление исследований не было единственной сферой научных интересов В.С.Урусова. Он внес также большой вклад в такие разделы науки, как геохимия твердого тела, теоретическая кристаллохимии, структурная минералогия, история и методология кристаллографии и кристаллохимии. Тем не менее, весьма символично, что последняя обзорная работа В.С.Урусова, вышедшая в свет уже после его кончины, была посвящена именно молекулярно-динамическому предсказанию с энергетических позиций кристаллических структур и радиационной устойчивости перспективных кристаллических матриц для иммобилизации высокоактивных радиоактивных отходов [8].

В XXI веке энергетическая кристаллохимия обрела новые, эффективные инструменты теоретического предсказания кристаллических структур и свойств минералов и неорганических соединений. Благодаря развитию квантово-химических подходов и совершенствованию методов межатомных потенциалов, физический эксперимент все чаще стал уступать математическому, как по точности, так и по возможностям. Внедрение (в том числе учениками Урусова) суперкомпьютерных технологий, эволюционных подходов [9] и алгоритмов машинного обучения [10] в энергетическую кристалло-

химию позволило, наконец, опровергнуть известную фразу, произнесенную в 1988 году главным редактором журнала Nature Дж. Мэддокса: «Одним из продолжающихся скандалов в физических науках является то, что остается в общем невозможно предсказать структуру даже простейших кристаллических веществ из знания их химического состава».

Сейчас уже достаточно просто с высокой степенью точности предсказывать функциональные свойства еще не синтезированных соединений, что намного облегчило экспериментаторам исследования в области направленного синтеза функциональных материалов, а также достоверно определять поведение химических соединений при экстремальных термодинамических условиях, часто недоступных в лабораторных условиях. И в этом видится большая заслуга В.С.Урусова - великого ученого, внесшего гигантский вклад в становление и развитие энергетического направления в кристаллохимии.

Список литературы:

1. 70 лет вместе со «стрелой времени». Материалы к научной биографии и библиографии академика РАН Урусова Вадима Сергеевича М.: М.: 2006 – 92 с.
2. Урусов В.С. Энергетическая кристаллохимия. М.: Наука, 1975 – 335 с.
3. Урусов В.С. Теория изоморфной смесимости. М.: Наука, 1977 – 251 с.
4. Дубровинский Л.С. Развитие методов теоретического предсказания и моделирования кристаллических структур минералов : Диссертация ... кандидата геолого-минералогических наук. М.,1986. – 284 с.
5. Урусов В.С., Дубровинский Л.С. ЭВМ-моделирование структуры и свойств минералов. – М.: МГУ, 1989 – 200 с.
6. Урусов В.С., Дубровинская Н.А., Дубровинский Л.С. Конструирование вероятных кристаллических структур минералов. М.: МГУ, 1990 – 128 с.
7. Урусов В.С., Еремин Н.Н. Атомистическое компьютерное моделирование структуры и свойств неорганических кристаллов и минералов, их дефектов и твердых растворов. М.: ГЕОС, 2012 – 428 с.
8. Гречановский А.Е., Урусов В.С., Еремин Н.Н. Изучение авторадиационных повреждений в минеральных матрицах методом молекулярной динамики // Журнал структурной химии – 2016 – Т. 57, № 6 – С. 1284–1304.
9. Oganov A.R., Glass C.W. Crystal structure prediction using evolutionary algorithms: principles and applications // J. Chem. Phys. – 2006 – V.124, art. 244704.
10. Marchenko E.I., Korolev V.V., Kobeleva E.A., Belich N.A., Udalova N., Eremin N.N., Goodilin E.A., Tarasov A.B. Machine learning recognition of hybrid lead halide perovskites and perovskite-related structures out of X-ray diffraction patterns // Nanoscale. – 2025 – № 5 – С. 2742–2752.

УТОЧНЕНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ СОБОЛЕВСКИТА PdBi

Иванова Л. А.[1] (*lidik_@mail.ru*),
Демина А. А.[1] (*demina0aa@ya.ru*),
Золотарев А. А.[2] (*aazolotarev@gmail.com*),
Белаковский Д. И.[3] (*dmzvr@mail.ru*),
Каримова О. В.[1] (*ov-karimova@mail.ru*)

[1] ИГЕМ РАН, г. Москва, [2] Институт наук о Земле СПбГУ, г. Санкт-Петербург,
[3]Минмузей РАН, г. Москва,

Аннотация: Определена кристаллическая структура минерала соболевскита PdBi. Минерал кристаллизуется в структурном типе никелина: структура гексагональная, пространственная группа $P6_3/mmc$, параметры элементарной ячейки a = 4,2242(4) Å, c = 5,7140(6) Å, V = 88,30(2) Å^3, Z = 2, R-фактор = 2,34 %.

Ключевые слова: *минералы платиновой группы, кристаллохимия, структура, соболевскит, структурный тип никелина.*

На сегодняшний день существует несколько моделей кристаллического строения минерала соболевскита PdBi в рамках различных пространственных групп симметрии. Авторы, впервые описавшие минерал, характеризуют его структуру в гексагональной пространственной группе $P6_3/mmc$ (параметры эл. яч. a = 4,23 Å, c = 5,69 Å) со структурным типом никелина [1]. Однако симметрия структур синтетических фаз состава PdBi заметно отличается: низкотемпературная α-модификация описывается моноклинной пространственной группой $P2_1$ (параметры эл. яч.: a = 7,200 Å, b = 10,660 Å, c = 8,708 Å, β = 89.70°), а высокотемпературная β-модификация (переход при температуре 210°C) характеризуется ромбической пространственной группой $Cmc2_1$ (параметры эл. яч.: a = 7,203 Å, b = 10,662 Å, c = 8,707 Å) [5, 3]. В работе [4] было выдвинуто предположение, что минерал соболевскит стоит считать смесью двух полиморфов PdBi.

Недавно авторами работы [2] с помощью высокотемпературных монокристальных рентгеновских исследований была найдена и описана еще одна полиморфная модификация синтетической фазы PdBi. Данная модификация получена при последовательном переходе ромбической модификации в более высокотемпературную, и описана при температуре выше 250°C. Она характеризуется ромбической пространственной группой *Cmcm* с параметрами элементарной ячейки: a = 3.6162(3) Å, b = 10.6446(8) Å, c = 4.4208(4) Å.

Все это обуславливает актуальность исследований кристаллической структуры минералов и синтетических фаз состава PdBi методами монокристального рентгеноструктурного анализа.

Для уточнения кристаллической структуры минерала соболевскита PdBi было проведено исследование зерна из образца халькопирит-пирротиновой

руды с минералами платиновой группы из коллекции Минералогического Музея им. А. Е. Ферсмана.

Химический анализ производился на сканирующем электронном микроскопе «JSM-5610LV» (JEOL, Ltd., Япония) при ускоряющем напряжении в 25kV, с энергодисперсионным спектрометром EDS Ultim Max100 (Oxford Instruments) в лаборатории кристаллохимии минералов ИГЕМ РАН. Предварительно была проведена калибровка на эталоне Co.

В одном из образцов (6267-7) было обнаружено зерно соболевскита PdBi (Sov) в халькопирите (Chp) (рис. 1). Зерно было без видимых включений, однородное. По результатам анализов была рассчитана эмпирическая формула: $Pd_{1.07}Bi_{0.93}$.

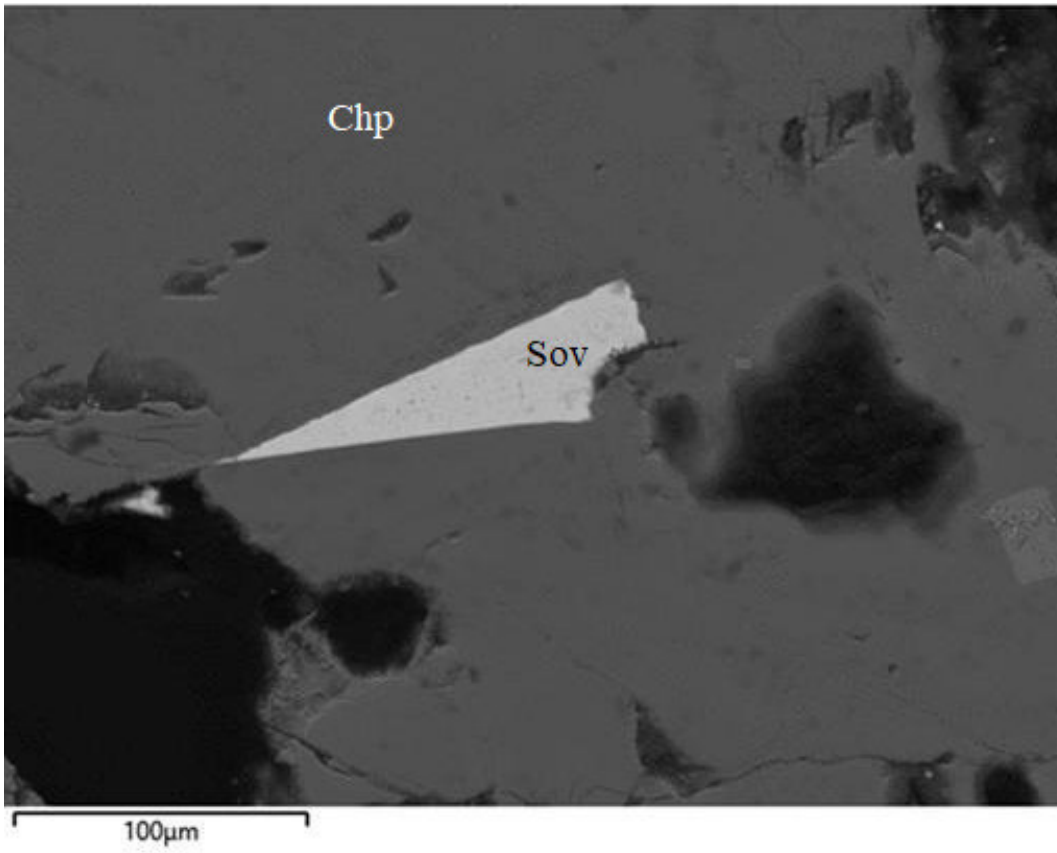


Рис. 1. Зерно соболевскита (Sov) в матрице халькопирита(Chp) в шлифе.

Затем зерно было извлечено из образца, повторно исследовано на электронном сканирующем микроскопе для подтверждения состава, однородности и отсутствия других фаз (рис. 2).

Извлеченное зерно было в дальнейшем исследовано с помощью рентгеноструктурного анализа. Набор экспериментальных интенсивностей был получен в полной сфере обратного пространства на монокристальном рент-

геновском дифрактометре Rigaku XtaLab Synergy-S, оснащенным высокостабильным острофокусным источником изучения PhotonJet-S (MoKα, 50 кВ, 1.0 мА) и высокоскоростным детектором HyPix-6000HE в РЦ «Рентгенодифракционные методы исследования» Научного парка СПбГУ.

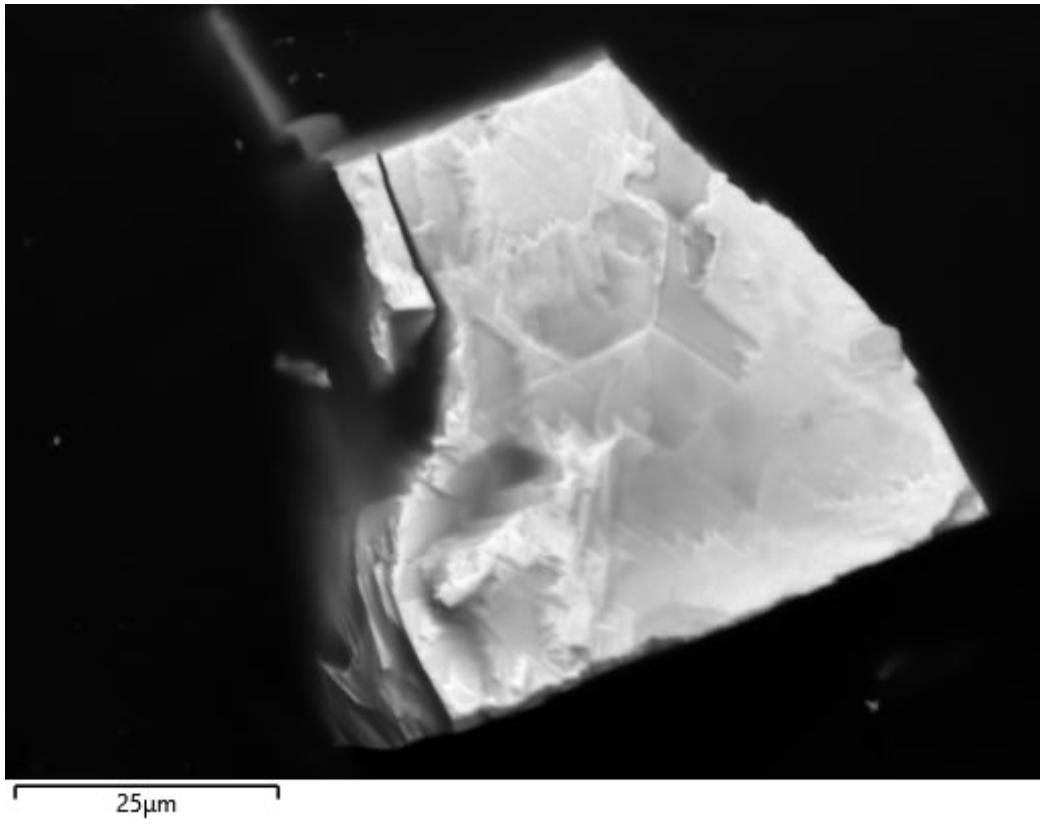


Рис. 2. Извлеченное зерно соболевскита (Sov).

Структура была решена прямыми методами в пространственной группе $P6_3/mmc$ и уточнена в анизотропном приближении колебаний всех атомов до значения *R*-фактора 2,34 % с помощью комплекса программ SHELX [6, 7]. Основные кристаллографические характеристики полученной при уточнении структуры соболевскита следующие: a = 4,2242(4) Å, c = 5,7140(6) Å, V = 88,30(2) Å^3, Z = 2.

Кристаллическая структура исследуемого минерала характеризуется структурным типом никелина NiAs, в которой атомы палладия занимают позицию никеля (позиция Уайкофф 2*a* с координатами (00½)) с точечной симметрией $\bar{3}m$, а атомы висмута – позицию мышьяка (позиция Уайкофф 2*d* с координатами (⅔⅓¼)) с точечной симметрией $\bar{6}m2$ (рис. 3).

Данную кристаллическую структуру можно описать как двуслойную плотнейшую упаковку из атомов висмута, в которой все октаэдрические пустоты заняты атомами палладия. Таким образом, полиэдрическая модель структуры представляет из себя колонки октаэдров $PdBi_6$, связанные между собой че-

рез общие вершины. Внутри колонок соединение октаэдров происходит через общие грани.

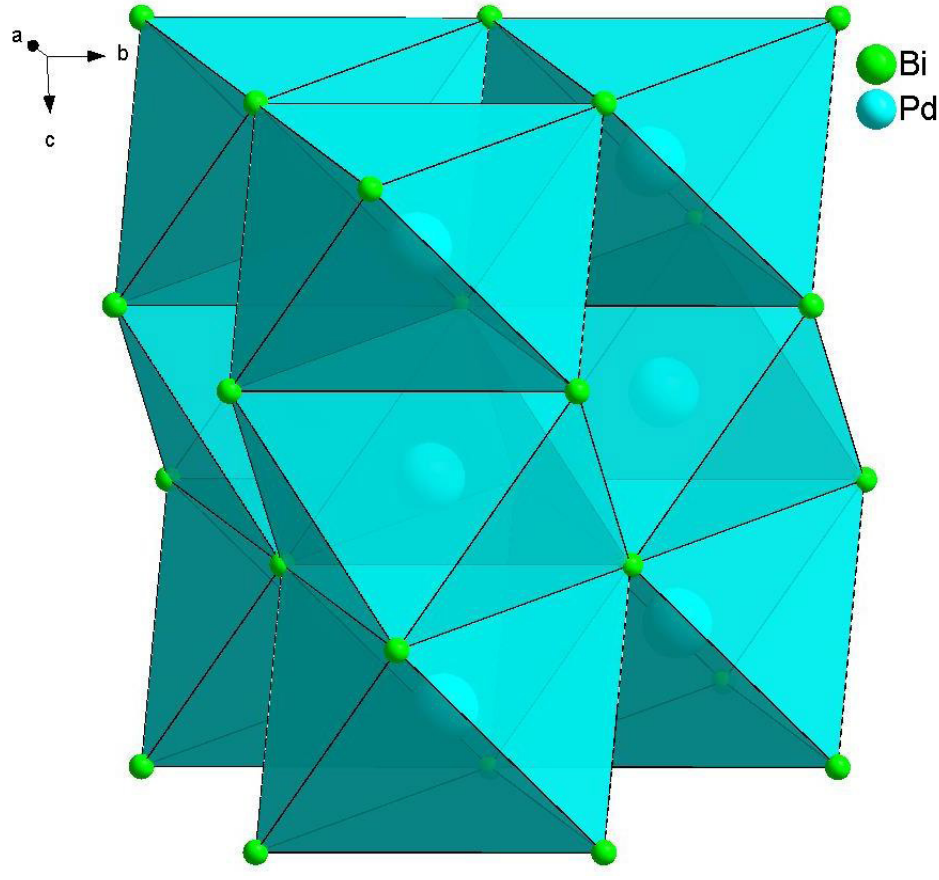


Рис. 3. Кристаллическая структура соболевскита PdBi.

Стоит отметить, что пространственные группы кристаллических структур всех известных на данный момент модификаций состава PdBi имеют между собой связь подгруппа-надгруппа: $P2_1 \leftrightarrow Cmc2_1 \leftrightarrow Cmcm \leftrightarrow P6_3/mmc$, что говорит о возможном существовании гомологического ряда, в которому структурный тип никелина является структурным прототипом, усложнение (и понижение симметрии, соответственно, из-за смещения атомов из частных позиций и искажения параметров элементарной ячейки) которого приводит к образованию низкосимметричных разновидностей с сохранением исходного химического состава.

В результате выполнения рентгеноструктурного анализа по данным монокристальной рентгеновской дифракции расшифрована кристаллическая структура минерала соболевскита PdBi. Выявлена взаимосвязь структуры минерала со структурами полиморфных модификаций синтетических фаз PdBi, которые образуют гомологический ряд.

Список литературы:

1. Евстигнеева Т. Л., Генкин А. Д., Коваленкер В. А. Новый висмутид палладия –соболевскит и номенклатура минералов системы PdBi–PdTe–PdSb // Зап. ВМО, 1975, Т. 104, №. 5, С. 568.
2. Каримова О. В., Золотарев А. А., Межуева А. А., Иванова Л. А., Чареев Д. А. Новый фазовый переход в соединении PdBi по данным *in-situ* высокотемпературной монокристальной дифракции // Кристаллография. 2025. Т. 70. № 3. С. 448-456
3. Хейкер Д.М., Жданов Г.С., Журавлев Н.Н. Рентгенографическое исследование структуры PdBi // ЖЭТФ. 1953. Т. 25. № 5. С. 621.
4. Bayliss P. Revised unit-cell dimensions, space group, and chemical formula of some metallic minerals //The Canadian Mineralogist, 1990, Т. 28, № 4, p. 751-755.
5. Okamoto H. The Bi–Pd (Bismuth–Palladium) System, Journal of Phase Equilibria, 1994, 15(2), p. 191-194.
6. Sheldrick G. M. A short history of SHELX // Acta Crystallographica Section A: Foundations of Crystallography, 2008, Т. 64, № 1, С. 112-122.
7. Sheldrick G.M "Crystal structure refinement with SHELXL" // Acta Crystallographica, 2015, C71, 3-8.

НОВЫЕ МИНЕРАЛОПОДОБНЫЕ ОКСОГАЛОГЕНИДЫ СВИНЦА С ГЛЕТОПОДОБНЫМИ СЛОЯМИ

Киреев В. Е.[1] (*kvad2000@yandex.ru*),
Чаркин Д. О.[1,2] (*d.o.charkin@gmail.com*),
Сийдра О. И.[1,3] (*siidra@mail.ru*),
Аксенов С. М.[1] (*aks.crys@gmail.com*)

[1]ФИЦ КНЦ РАН, г. Апатиты, [2]МГУ им. Ломоносова, г. Москва,
[3]СПбГУ, г. Санкт-Петербург.

Аннотация: В рамках данной работы мы сообщаем о синтезе, кристаллической структуре и некоторых спектроскопических характеристиках трех новых метастабильных слоистых оксогалогенидов свинца: $Pb_{25}O_{18}X_{14}$ (X = Cl, Br) и $Pb_{11}O_8Cl_6$.

Ключевые слова: *Свинец, оксогалогениды свинца, кристаллическая структура*

Химия оксогалогенидных соединений свинца, в которой почти в равной степени представлены как минеральные, так и синтетические фазы, быстро развивается благодаря открытию новых минеральных видов [2,4] и поиску выдающихся свойств у новых синтетических соединений [7]. Со структурной точки зрения, большая часть представителей демонстрирует слоистые кристаллы, происходящие от структуры глета, или тетрагональной (красной) полиморфной модификации оксида свинца(II). В них электронейтральные слои состоят из реберно-связанных анион-центрированных тетраэдров OPb_4. Электронейтральный характер этих слоев может быть изменен на положительно заряженный различными способами, например замещение в позиции O^{2-} на F^-, введение вакансии в кислородную подрешетку или замещение в позиции Pb^{2+} на катион с более высоким зарядом. В более сложных структурах эти механизмы обычно действуют совместно. Внедрение крупных многоатомных анионных частиц может потребовать образования крупных отверстий в глетовых слоях, что также влияет на подрешетку Pb^{2+}.

Несмотря на значительное число известных структур оксогалогенидов свинца и наличие их общей классификации [6], прогнозирование составов и структур новых представителей в настоящее время затруднено из-за разрозненности и неполноты структурных данных, включая модели, требующие дальнейшего уточнения. Особый интерес вызывают два соединения с предполагаемым составом $Pb_4O_3X_2$ (X = Cl, Br) [1], впервые полученные плавлением смесей 3PbO + PbX_2, но охарактеризованные лишь фрагментарно и без достаточных экспериментальных деталей; для них постулируется дефектная структура типа Nd_2O_2Te, однако надёжных подтверждений не представлено, а единственный достоверно расшифрованный оксогалогенид состава «432» — $Pb_4O_3I_2$ [7] — имеет совершенно иное строение. Кроме того, данные составы отсутствуют на актуальных фазовых диаграммах систем PbO–$PbCl_2$ и PbO–$PbBr_2$.

В рамках систематических исследований систем оксогалогенидов свинца мы обратили внимание на эти не полностью охарактеризованные соединения. Здесь мы сообщаем о получении, кристаллических структурах и некоторых спектроскопических особенностях двух известных оксогалогенидов свинца $Pb_{25}O_{18}X_{14}$ (X = Cl (**1**), Br (**2**)) и одного нового $Pb_{11}O_8Cl_6$ (**3**).

Параметры кристаллических структур соединений **1**-**3** приведены в таблице 1. Все изученные структуры могут быть описаны как сложные производные архетипической структуры Nd_2O_2Te (тетрагональный $PbBiO_2Cl$) и представляют собой чередование дефектных свинцово-кислородных слоёв, подобных глетовым ($[Pb_{24}O_{18}]^{14+}$ в структурах **1** и **2** и $[Pb_{11}O_8]^{6+}$ в структуре **3**) (рис. 1, 2), и галогенидных слоёв; при этом структуры **1** и **2** дополнительно включают октаэдрические анионы $[PbX_6]^{4-}$. Все три структуры обнаруживают тесное родство с соединениями $Pb_{31}O_{22}(Cl,Br)_{18}$ [3] и $Ba_8SrPb_{24}O_{24}Cl_{18}$ [5]. Однако, подобно $Pb_{31}O_{22}(Cl,Br)_{18}$ и в отличие от $Ba_8SrPb_{24}O_{24}Cl_{18}$, соединения **1**–**3**, по-видимому, являются метастабильными, поскольку не удаётся получить их твердофазными методами при субсолидусных условиях.

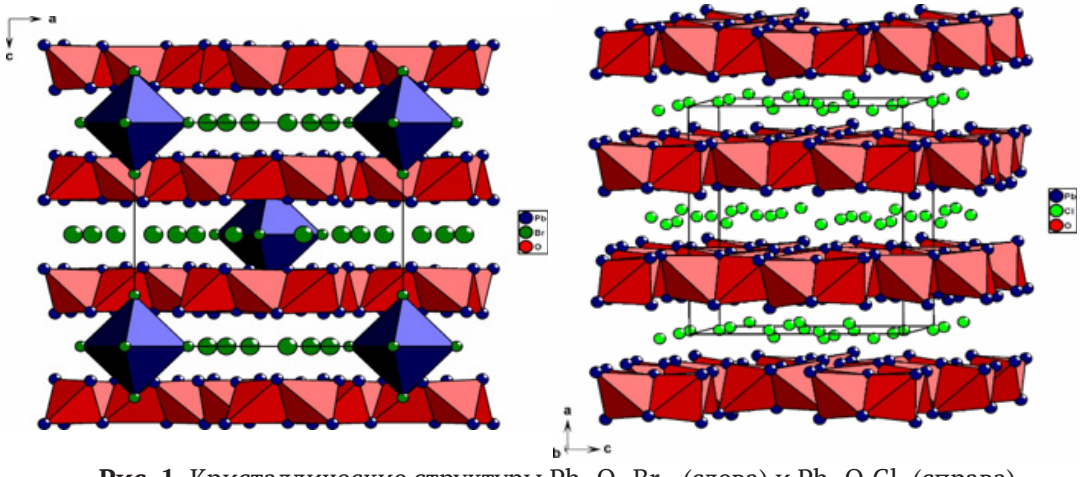


Рис. 1. Кристаллические структуры $Pb_{25}O_{18}Br_{14}$ (слева) и $Pb_{11}O_8Cl_6$ (справа).

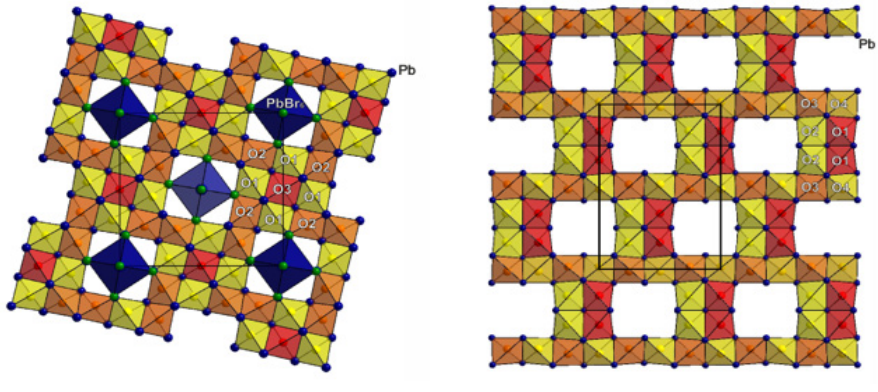


Рис. 2. Проекция дефектных глетовых слоев $[Pb_{24}O_{18}]^{14+}$ в структурах **1** и **2** (слева) и $[Pb_{11}O_8]^{6+}$ в структуре **3** (справа).

Табл. 1. Параметры элементарной ячейки для новых соединений.

Соединение	Пр. гр.	*a,* Å	*b*, Å	*c,* Å	*V*, Å^3
$Pb_{25}O_{18}Cl_{14}$	*I*4/*m*	14,1837(9)	14,1837(9)	12,9194(8)	2599,1(4)
$Pb_{25}O_{18}Br_{14}$	*I*4/*m*	14,4107(1)	14,4107(1)	13,3306(1)	2768,3(4)
$Pb_{11}O_8Cl_6$	*Pnma*	13,1290(4)	16,2219(5)	11,1683(4)	2378,59(1)

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 26-17-00278.

Список литературы:

1. Gasperin M. Sur la synthèse d'un oxychlorure de plomb. // Bull. Soc. Fr. Mineral. Cristallogr. – 1964 – V. 87. – P. 278 – 280.

2. Kasatkin A. V., Siidra O. I., Nestola F., Pekov I. V., Koshlyakova N. N., Chukanov N. V., Nzarchuk E. V., Molinari S., Rossi M. Napoliite, Pb_2OFCl, a new mineral from Vesuvius volcano, and its relationship with dimorphous rumseyite. // Mineral. Mag. – 2023 – V. 87, №5 – P. 711-718.

3. Krivovichev S., Siidra O., Nazarchuk E., Burns P., Dermeier W. Particular topological complexity of lead oxide blocks in $Pb_{31}O_{22}X_{18}$ (*X* = Br, Cl). // Inorg. Chem. – 2006. – V. 45, №. 10. – P. 3846–3848

4. Lepore G. O., Welch M. D. The crystal structure of parkinsonite, nominally $Pb_7MoO_9Cl_2$: a naturally occurring Aurivillius phase. // Mineral. Mag. – 2010 – V. 74. – P. 269–275.

5. Li Z., Zhang S., Xing W., Lin Z., Yao J., Wu Y. $Ba_8SrPb_{24}O_{24}Cl_{18}$: the first alkali-earth metal lead(II) oxyhalide with an intriguing multimember-ring layer. // Dalton Trans. – 2020 – V. 49 – P. 3667-3671.

6. Siidra O. I., Krivovichev S. V., Turner R. W., Rumsey M. S. Natural and Synthetic Layered Pb(II) Oxyhalides. // Minerals as Advanced Materials II. – 2011 – Springer, Berlin, Heidelberg.

7. Wu J., Jiao J., Maimaiti M., Li K., Zheng J., Zhang M. $Pb_4O_3I_2$: A Lead Oxyhalide IR Optical Crystal with an Unprecedented $1\infty[O_3Pb_4]$ Chain Featuring a Wide Transmittance Range and Large Birefringence // Inorg. Chem. – 2025 – V. 64, № 5 – P. 2176–2181.

ЭЛЕКТРООТРИЦАТЕЛЬНОСТЬ И ХИМИЧЕСКОЕ СРОДСТВО ЭЛЕМЕНТОВ

Артем Р. Оганов

[1] *Сколковский Институт Науки и Технологий, Большой бульв. 30с1, Москва, 121205, Россия.*

[2] *СберУниверситет, ул. Университетская д. 11, деревня Аносино, Истринский городской округ, 143581, Московская область, Россия.*

Чем обусловлено поведение химических элементов – в частности, в геологических системах, включая высокие температуры и давления? Как объяснить аномалии химии высоких давлений? В основу нашего подхода мы положили понятие электроотрицательности. Модифицировав шкалу Малликена, используя в качестве эталонного резервуара электронов вместо вакуума однородный электронный газ, а ключевыми величинами выступают энтальпии ионизации и присоединения электрона, нам удалось построить физически обоснованные шкалы электроотрицательности и химической жёсткости для всех элементов от водорода (Z=1) до кюрия (Z=96) вплоть до 96-го номера в диапазоне давлений до 5 миллионов атмосфер [1]. Этот фундаментальный теоретический каркас не только объясняет целый ряд аномалий химии высоких давлений — от образования нестехиометрических соединений (Na_3Cl, $NaCl_7$) и контринтуитивных переходов (например, перехода металл-диэлектрик в элементарном натрии) и аномально высоких валентностей (валентность V для цезия), — но и демонстрирует, что при сжатии периодический закон претерпевает кардинальную перестройку: натрий и магний становятся наиболее электроположительными элементами, обгоняя цезий, а железо приобретает свойства сильного акцептора электронов, тогда как никель ведёт себя подобно псевдоблагородному газу [1]. Предсказанное нами многократное возрастание разности электроотрицательностей между магнием и железом под давлением объясняет недавно открытые соединения этих (не реагирующих при нормальных условиях) элементов.

Кроме того, на основе этих фундаментальных результатов была разработана простая универсальная модель предсказания стабильности соединений, использующая классическую электроотрицательность Полинга и новый параметр «химического несоответствия»; эта модель продемонстрировала высокую (>87%) предсказательную точность и была применена для решения практических задач [2]. Таким образом, разработанная теория предоставляет минералогии и геохимии новый универсальный инструмент для прогнозирования химического поведения элементов в экстремальных условиях, открывая возможность предсказывать образование ранее неизвестных минеральных фаз, стабильных только в глубоких недрах планет, и по-новому интерпретировать геохимические процессы, идущие при сверхвысоких давлениях. Более того, эта модель позволяет по-новому взглянуть и на химию элементов при нормальных условиях.

Список литературы:

1. Dong, X., Oganov, A.R., et al., 2022, Proc. Natl. Acad. Sci. 119, e2117416119.
2. Oganov, A.R., Kostenko, M.G., 2026, Nature Communications 17, 929.

ТРАНСФОРМАЦИОННЫЕ МИНЕРАЛЫ КОЛЬСКОЙ ЩЕЛОЧНОЙ ПРОВИНЦИИ

Паникоровский Т. Л.[1] (*t.panikorovskii@ksc.ru*)

[1] *ФИЦ КНЦ РАН, г. Апатиты*

Аннотация: В работе приведены новые данные о трансформационных минералах Кольской щелочной провинции: рассмотрены ряды каркасных и слоистых титано- и цирконосиликатов в контексте передачи структурной информации. Обобщены механизмы переходов, изменения кристаллических структур, а также обобщены данные по существующим переходам.

Ключевые слова: *трансформационный, структура, минерал*

В рамках концепции наследия, предложенной академиком Н.П. Юшкиным совместно с А.П. Хомяковым для минералов, где каждый последующий являлся результатом преобразования предыдущего, было предложено новое понятие - трансформационного минерала [1]. В работе [2] были выделены следующие трансформационные серии: ломоносовит → мурманит, паракелдышит → келдышит, цирсиналит → ловозерит, казаковит → тисиналит, капустинит → литвинскит. В более поздних исследованиях было показано, что образование по схеме ломоносовит → мурманит в природе не наблюдается и невозможно при модельных экспериментах; однако достоверно подтверждено существование серии ломоносовит → β-ломоносовит. В последние годы трансформациям кристаллических структур, сопровождающимся природным катионным обменом, было выполнено научной группой чл.-корр. РАН И.В. Пекова, результатом которых стало выделиление следующих трансформационных серий: эпистолит → звягинит, мурманит → вигришинит, мурманит → кальциомурманит [3]. Развитию концепции трансформационных минералов значительное внимание уделено в работах Б.Е. Боруцкого [4].

В последние 15 лет нашим научным коллективом было обнаружено несколько новых переходов и сформулирована задача систематизации трансформационных минералов [5]. Собран значительный объем эмпирических данных, касающихся каркасных и слоистых титано- и цирконосиликатов. Описан трансформации, сопровождающие эволюцию минералов группы иванюкита, келдышита (Рис.1) и линтисита. Открытие нового минерала селивановаита подтвердило возможность внедрения Fe^{3+} в кристаллическую решетку мурманита с перестройкой гетерополиэдрического слоя. Похожие изменения были зафиксированы при включении Cd^{2+} в структуру мурманита, в то время как внедрение Pb^{2+} не вызывало аналогичных значительных изменений. Полученные нами данные были систематизированы, и в качестве основного условия для существования трансформационных серий был выделен принцип сохранения кристалличности при переходе от минерала-предшественника к новообразованному минералу. Иными словами, такие пере-

ходы должны осуществляться по схеме из монокристалла в монокристалл. В противном случае, например, при образовании бруновскиита происходит перекристаллизация с изменением структурного типа без сохранения информации о минерале-предшественнике.

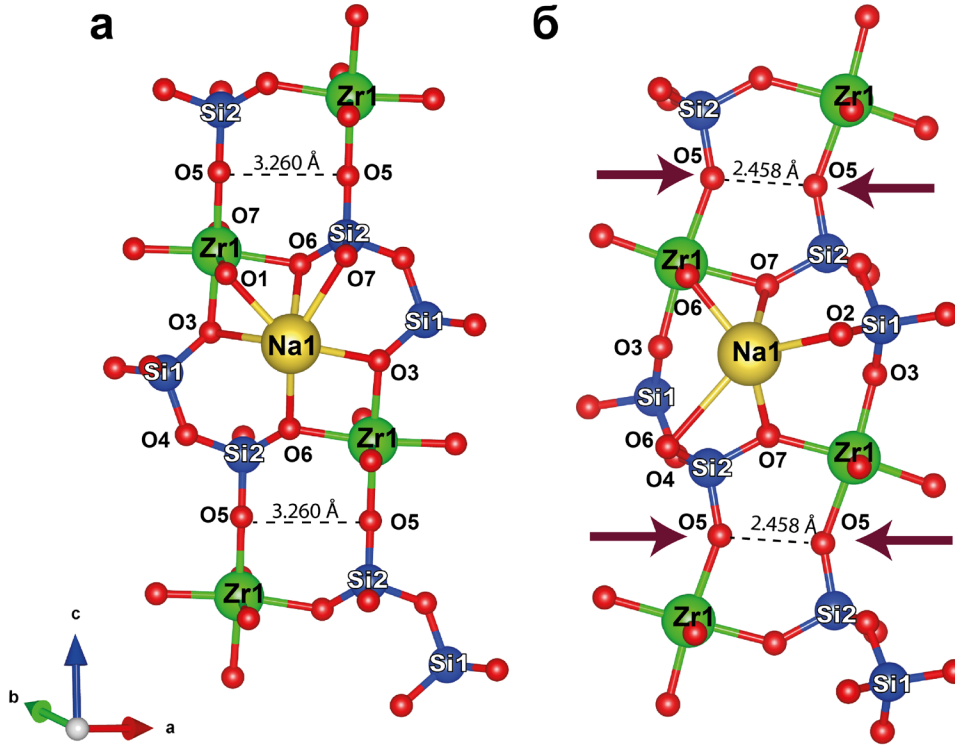


Рис. 1. Фрагменты кристаллических структур паракелдышита (а) и его трансформация при переходе в келдышит (б). Стрелками показано образование водородной связи между атомами кислорода.

Список литературы:

1. Юшкин Н. П., Хомяков А. П., Евзикова Н.З. Принцип наследования в минералогенезисе. Сыктывкар: Научные доклады, 1984, – 32 с

2. Хомяков А.П. Минералогия ультраагпаитовых щелочных пород. М.: Наука, 1990 – 196 с.

3. Пеков И.В., Лыкова И.С., Чуканов Н.В., Япаскурт В.О., Белаковский Д.И., Золотарев А.А.(мл.), Зубкова Н.В. Звягинит $NaZnNb_2Ti(Si_2O_7)_2O(OH,F)_3(H_2O)_{4+x}$ (x<1) – новый минерал группы эпистолита из Ловозерского щелочного массива (Кольский полуостров, Россия) // Записки РМО. – 2014 – Т. 143. Вып. 2. С. 45–63.

4. Боруцкий Б.Е. Онтогения и филогения посткристаллизационных процессов

минералообразования и опыт их использования для решения спорных вопросов геологической истории сложных геологических объектов на примере Хибинского массива //Материалы Юбилейного съезда Российского минералогического общества «200 лет РМО».10-13 октября 2017 года. СПб.: Санкт-Петербургский горный университет. – 2017. С. 7-9.

5. Паникоровский Т.Л., Самбуров Г.О., Николаев А.П., Базай А.В., Гойчук О.Ф., Пеков И.В., Кривовичев С.В. Трансформационная серия паракелдышит–келдышит: кристаллохимический механизм перехода, уточнение химической формулы и кристаллической структуры келдышита // Кристаллография. - 2025. - Т. 70. - №3. - С. 434-447. doi: 10.31857/S0023476125030106

КРИСТАЛЛЫ ГЛИНИСТЫХ МИНЕРАЛОВ В РОЛИ КВАЗИРИБОСОМ ПЕРВЫХ ПРОТООРГАНИЗМОВ

Чудецкий М. Ю. (*chudetsky@mail.ru*)

ИПНГ РАН, г. Москва

Аннотация: Две структурно-кристаллические особенности слоистых глинистых минералов могли определить направление предбиотической эволюции, обеспечив синтез и пространственную организацию первых биополимеров. Возможно, именно поэтому некоторые универсальные черты современной биохимии могут отражать это древнее минеральное наследие.

Ключевые слова: *кристаллы глинистых минералов, полипептиды, полинуклеотиды, амилоацил-тРНК-синтетазы, рибосомы.*

Одной из гипотез предбиотической эволюции является представление о каталитической роли глинистых минералов. Экспериментальные исследования, прежде всего работы James P. Ferris, показали, что монтмориллонит способен катализировать полимеризацию активированных нуклеотидов. Однако происхождение первых биополимеров остается нерешенной проблемой, поскольку их строение, вероятно, существенно отличалось от современных белков и нуклеиновых кислот, а сами глинистые минералы представляют собой чрезвычайно сложные кристаллохимические системы.

Концепция Alexander Graham Cairns-Smith впервые предложила рассматривать кристаллическую решетку глинистых минералов не только как каталитическую поверхность, но и как возможную матрицу организации первых информационных систем. Современные достижения кристаллографии, структурной биологии и вычислительной химии позволяют вновь обратиться к этой гипотезе уже на качественно новом уровне.

В данной работе проведено сравнительное сопоставление особенностей строения аминоацил-тРНК-синтетаз, рибосом и транспортных РНК с кристаллохимическими особенностями слоистых глинистых минералов в поисках структурного наследия предбиотической эволюции.

Возможные структурные аналогии между глинистыми минералами и современными биополимерами

Присоединение аминокислот к тРНК осуществляется аминоацил-тРНК-синтетазами с использованием энергии АТФ. В каталитическом центре фермента ион калия координирует фосфатные группы АТФ, формируя компактную кольцевую структуру [2].

С кристаллохимической точки зрения определенный интерес представляет сходство этой организации с кольцевыми силикатными мотивами на поверхности иллитов, где центральное положение также занимает ион калия. При локальных изоморфных фосфатных замещениях кремнекислородных тетраэдров, подобные структуры могли бы образовывать

каталитические центры, способные облегчать реакции конденсации аминокислот, нуклеотидов и образование смешанных рибонуклеопротеидных комплексов. Данная возможность пока остается гипотезой, требующей экспериментальной проверки.

Не менее примечательна пространственная организация аминоацил-тРНК-синтетаз. Их каталитические домены представлены двумя древнейшими классами, различающимися параллельной и антипараллельной архитектурой β-листов. Аналогично гофрированная структура некоторых слоистых глинистых минералов допускает эпитаксиальное соответствие между кристаллическими и белковыми структурами. Аргументом такой связи служат экспериментальные данные, показывающие способность некоторых глинистых минералов индуцировать переход отдельных белков из α-спиральной в β-конформацию и ускорять амилоидообразование [3], что свидетельствует о влиянии минеральной поверхности на пространственную организацию белковых молекул.

Возможная роль смешанослойных минералов в формировании структуры РНК

Рибосомная и транспортная РНК характеризуются развитой системой шпилек и петель, определяющих их пространственную организацию. В нашей предыдущей работе [1] было высказано предположение, что подобные структуры могли формироваться при взаимодействии полинуклеотидной цепи с поверхностью смешанослойных глинистых минералов попрёк слоистости (Рис.1). Этот эффект возникает при кристаллохимических превращениях смектитов, сопровождающихся симметричным распространением структурных изменений относительно исходного преобразованного слоя. Возникающие при этом периодические структурные «узоры» теоретически способны служить шаблоном – для регулярного самосложения полинуклеотидной цепи и формирования элементов вторичной структуры РНК - шпилек и петель. Проверка этой гипотезы возможна с использованием методов молекулярной динамики и квантово-химического моделирования.

Предлагаемая модель рассматривает глинистые минералы не только как возможные катализаторы предбиотических реакций, но и как **пространственные матрицы**, способные направлять самоорганизацию первых биополимеров. Если эта гипотеза подтвердится, некоторые универсальные особенности архитектуры современных белков и РНК могут рассматриваться как молекулярное наследие стартового минерального этапа биохимической эволюции. Современные методы структурной биологии, кристаллографии и компьютерного моделирования позволяют впервые перейти от качественных аналогий к количественной и экспериментальной проверке этой концепции.

Исследования выполнены в соответствии с госзаданием Института проблем нефти и газа РАН в рамках Государственного задания ФГБУН «ИПНГ РАН» (тема № 125021302095-2)

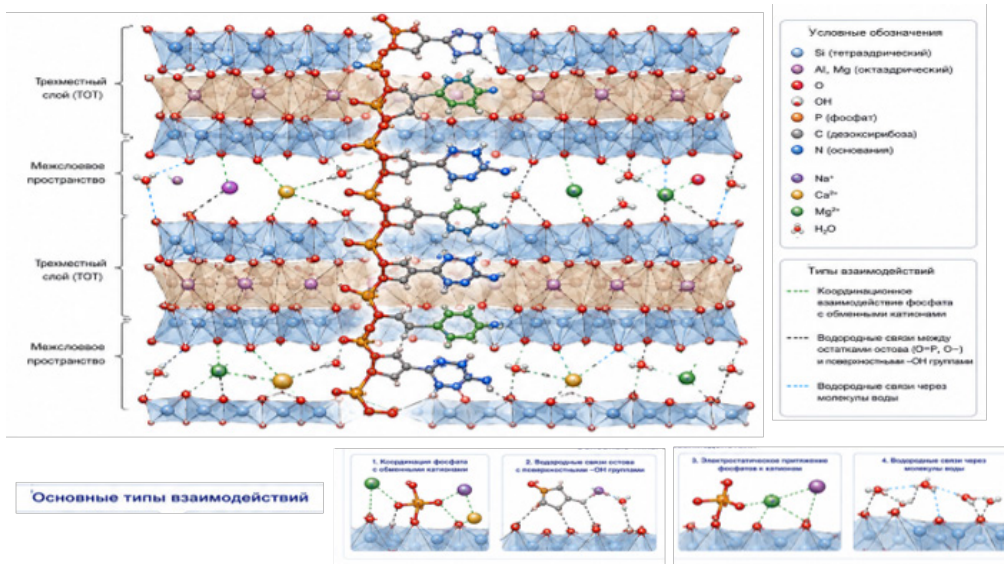


Рис.1. Взаимодействие цепи РНК со слоями монтмориллонита поперек слоистости

Список литературы:

1. Чудецкий М.Ю., Крупская В.В. Подобие между глинистыми минералами и нуклеиновыми кислотами // Биокосные взаимодействия: жизнь и камень. С-Пб. 2004. с. 81-84.

2. Dibrova D., Chudetsky M. Yu., Galperin M., Koonin E., Mulkidjanian A. The Role of Energy in the Emergence of Biology from Chemistry // Origins of Life and Evolution of the Biosphere. - Oct. 2012, Vol. 42, No. 5. P. 459–468.

3. Revault M., Quiquampoix H., Baron M.H. , Noinville S. Fate of prions in soil: Trapped conformation of full-length ovine prion protein induced by adsorption on clays // Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects Volume 1724, Issue 3, 5 August 2005, P. 367-374.

Минералогический музей
имени А.Е. Ферсмана РАН

310 ЛЕТ

НОВЫЕ И РЕДКИЕ МИНЕРАЛЫ



30 сентября 2026 года

МИНЕРАЛОГИЯ ЦЕЗИЯ

Агаханов А.А.[1] (*atali99@mail.ru*), **Паутов Л.А.**[1] (*pla58@mail.ru*), **Карпенко В.Ю.**[1] (mineralab@mail.ru)

[1] *Минмузей РАН, Москва*

Аннотация. Выполненная работа посвящена минералогии цезия в земной коре. Для образования собственно цезиевых минералов наиболее благоприятны широкопористые каркасные (и квазикаркасные), слоистые структуры или цепочечные структуры с широкими туннелями. На сегодняшний день известно 27 минералов цезия. Наибольшее разнообразие цезиевых минералов – 13, связано с агпаитовыми пегматитами и метасоматитами из щелочного граносиенитового массива Дараи-Пиёз (Таджикистан), с гранитными пегматитами литиевого и редкометально-самоцветного типов – 10, с гипергенными образованиями – 2, с низкотемпературными рудными месторождениями – 1, с вулканическими фумарольными полями – 1 и с ультраагпаитовыми пегматитами – 1. Образование природных твердых растворов Cs+ в первую очередь возможно с петрогенными K+ и Na+, в меньшей степени – Rb+, Tl+ и Li+, а также еще H_3O+ в гипергенных условиях. Полные изоморфные замещения между Cs, K, Rb, Tl и Li плохо проявлены, за исключением рядов: поллуцит [Cs] – анальцим [Na(H_2O)]; лондонит [Cs] – родицит [K] – туретит [Li]; фторапофиллит-(Cs) [Cs] – фторапофиллит-(K) [K].

Ключевые слова: *Цезий, талий, щелочные металлы, новые минералы, щелочные, ультраагпаитовые и гранитные массивы, гипергенные, эксгаляционные, гидротермальные образования, Дараи-Пиёз.*

На сегодняшний день известно 27 собственных минералов цезия. Все они, кроме поллуцита, являются редкими или даже редчайшими. Помимо поллуцита, относительно крупные выделения (более 1 см) образуют куплетскит-(Cs), лондонит, галхаит и, телюшенкоит. Размеры остальных минералов не превышают, как правило, 20 – 200 мкм.

Основные концентрации цезия связаны с гранитными пегматитами, (например пегматит Tanco, Канада; Калбинский хребет, Казахстан), но наибольшее разнообразие цезиевых минералов установлено в агпаитовых пегматитах и метасоматитах из щелочного граносиенитового массива Дараи-Пиёз (Таджикистан). На сегодняшний день здесь выявлено 13 собственных минералов цезия: куплетскит-(Cs) $(Cs,K)_2Na(Mn,Fe)_7(Ti,Nb)_2Si_8O_{24}(O,OH,F)$, телюшенкоит $CsNa_6[Be_2(Si,Al,Zn)_{18}O_{39}F_2]$, зеравшанит $Cs_4Na_2Zr_3(Si_{18}O_{45})(H_2O)$, сенкевичит $CsKNaCa_2TiO[Si_7O_{18}(OH)]$, соколоваит $CsLi_2AlSi_4O_{10}F_2$, менделеевит-(Ce) $Cs_6(\square,K)_6[(Ce,REE)_{23}Ca_7)_{30}(Si_{70}O_{175})(OH,H_2O,F)_{35}$, одигитриит $CsNa_5Ca_5[Si_{14}B_2O_{38}]F_2$, менделеевит-(Nd) $Cs_6(\square,K)_6[(Nd,REE)_{23}Ca_7)_{30}(Si_{70}O_{175})(OH,H_2O,F)_{35}$, фторапофиллит-(Cs) $CsCa_4(Si_8O_{20})F(H_2O)_8$, гармит $CsLiMg_2(Si_4O_{10})F_2$, горбуновит $CsLi_2(Ti,Fe)Si_4O_{10}(F,OH,O)_2$, крейтерит $(CsLi_2Fe^{3+}Si_4O_{10}(F,OH)_2$ и поллуцит $(Cs,Na)AlSi_2O_6{\bullet}nH_2O$ ($n < 1$). Все они кроме поллуцита, были открыты в этом массиве и на сегодняшний день являются эндемиками, за исключением

куплетскита-(Cs) и соколоваита Вторая находка куплетскита-(Cs) был сделана на западном склоне Ильменских гор (Ю. Урал) в амазонитовом пегматите в фенитах контактового ореола миасскитов. Соколоваит найден еще в четырех местах (Аргентине, Китае, Чехии и Мексике), все они были связаны с гранитными пегматитами литиевого типа.

Гранитные пегматиты литиевого и редкометально-самоцветного типов на сегодняшний день являются второй геологической формацией по многообразию минералов цезия, которых здесь выявлено 10 видов: поллуцит, цезплюмтантит $(Cs,Na)_2(Pb,Sb^{+3})_3Ta_8O_{24}$, наньпингит $Cs(Al,Mg,Fe^{2+},Li)_2(Si_3Al)O_{10}(OH,F)_2$, маккриллисит $NaCs(Be,Li)Zr_2(PO_4)_4•1$-$2H_2O$, лондонит $(Cs,K,Rb)Al_4Be_4(B,Be)_{12}O_{28}$, пеззоттаит $Cs(Be_2Li)Al_2Si_6O_{18}$, раманит-(Cs) $Cs[B_5O_6(OH)_4]•2H_2O$, джонкойвулаит-(Cs) $Cs[Be_2B]Mg_2Si_6O_{18}$, цезиокенопирохлор $□Nb_2(O,OH)_6Cs_{1-x}$ и соколоваит.

Еще пять цезиевых минералов связаны с образованиями иного генезиса. Маргаритасит $(Cs,K,H_3O)_2(UO_2)_2(V_2O_8)•H_2O$ – с гипергенными низкотемпературными гидротермалитами в кислых вулканических туфах. Цезийфармакоседерит $CsFe^{+3}_4[(AsO_4)_3(OH)_4]$ $4H_2O$ – с гипергенными низкотемпературными гидротермалитами в риолитовых и дацитовых пирокластических вулканических породах. Цезиодимит $CsKCu_5O(SO_4)_5$ – с эксгаляционными системами окислительного типа в вулканических фумарольных полях. Галхаит $(Cs,Tl)(Hg,Cu,Zn)_6(As,Sb)_4S_{12}$ – с низкотемпературными гидротермальными месторождениями ртути. Паутовит $CsFe_2S_3$ – с ультраагпаитовыми пегматитами.

Наряду с 27-ю минеральными видами, включенными в официальный список КНМНМ ММА нами установлено еще 11 потенциально новых собственных минералов цезия. Восемь предположительно новых минеров цезия происходят из щелочного массива Дараи-Пиёз (Таджикистан): калиевые аналоги менделеевита-(Ce) $Cs_6K_6[(Ce,REE)_{23}Ca_7)_{30}(Si_{70}O_{175})(OH,H_2O,F)_{35}$ и менделеевита-(Nd) $Cs_6K_6[(Nd,REE)_{23}Ca_7)_{30}(Si_{70}O_{175})(OH,H_2O,F)_{35}$, цезиевый аналог астрофиллита $(Cs,K)_2Na(Fe,Mn)_7(Ti,Nb)_2Si_8O_{24}(O,OH,F)$, цезиевый аналог токкоита $(Cs,K)_2Ca_4Si_7(O,OH,F)_4$, ниобиевый аналог соколоваита $CsLi_2NbSi_4O_{10}(O)_2$, цезиевый аналог калюжныита-(Ce) $NaCsCaSrCeTi(Si_8O_{21})OF(H_2O)_3$ и два поллуцито подобных минералов – $Cs_2ZnSi_5O_{12}$ и $Cs_2BeSi_5O_{12}$. Другие потенциально новые минералы цезия встречены в Ильменского щелочного массива (Ю. Урал) (ниобиевый аналог куплетскита-(Cs) $(Cs,K)_2Na(Mn,Fe)_7(Nb,Ti)_2Si_8O_{24}(O,OH,F)$), в гранитного редкометально-самоцветного пегматита Сакавалана (Sakavalana), Мадагаскар (танталовый аналог цезиокенопирохлора $□Ta_2(O,OH)_6Cs_{1-x}$) и из эксгаляционной минералообразующей системы окислительного типа вулкана Толбачик, Камчатка (цезиевый аналог вульфита $(Cs,K)_3NaCu_4O_2(SO_4)_4$).

В табл. 1 приведены краткие сведения о минералах-концентраторах цезия, в которых он не является видообразующим. Эти минералы отобраны по количественному критерию: включены только те, для которых известны анализы с содержанием Cs_2O (либо Cs для бескислородных соединений) не менее

0.2 мас.%.

Для цезиевых минеров в большинстве случаев известны прямые структурные аналоги, в которых вместо Cs в соответствующих позициях (полостях) доминируют другие компоненты, включая вакансии и молекулы воды (указаны в квадратных скобках): у поллуцита это анальцим [$Na(H_2O)$], у куплетскита-(Cs) – куплетскит [K] и наливкинит [Li], у маргаритасита – карнотит [K], у наньпингита – мусковит [K] и парагонит [Na], у маккриллисита – гайнесит [Na], у лондонита – родицит [K] и туретит [Li], у телюшенкоита – лейфит [Na] и эйрикит [K], у пеззоттаита – берилл [вакансия или H_2O], у паутовита – расвумит [K] и пикополит [Tl], у сенкевичита – тинаксит [K], у соколоваита – полилитионит [K], у раманита-(Cs) – раманит-(Rb) [Rb], у кирхгоффита – лисицынит [K], у галхаита – воронцовит [Tl] и ферроворонцовит [Tl], у цезиодимита – криптохалцит [K], у цезийфармакоседерита – фармакоседерит [K], у фторапофиллита-(Cs) – фторапофиллит-(K) [K] и фторапофиллита-(NH_4) у горбуновита – орловит [K], у гармита – тайниолит [K], у цезийфармакосидерита – соответствующие аналоги группы фармакосидерита ([K], [Na], [H_3O], [Tl], [Pb]). Лишь у зеравшанита, одигитриаита, менделеевита-(Ce) и менделеевита-(Nd) отсутствуют структурные аналоги без видообразующего цезия, а у крейтерита, джонкойвулаита-(Cs) и пирохлороподобных танталатов цезплюмтантита и цезиокенопирохлора неизвестны прямые аналоги, где другие катионы преобладали бы над Cs.

Как мы видим, возможные «партнеры» Cs^+ в природных твердых растворах в первую очередь петрогенные K^+ и Na^+, в меньшей степени – редкие Rb^+, Tl^+ и Li^+, а также H_3O^+, Pb^{2+} в гипергенных условиях.

Для вхождения крупнейшего катиона цезия наиболее благоприятны широкопористые каркасные (и квазикаркасные) структуры, слоистые структуры или цепочечные структуры с широкими туннелями.

Цезий в собственных минералах в основном обнаруживает четкую тенденцию к обособлению, отделяясь, в первую очередь, от калия. С рубидием, более близким к цезию по ионному радиусу и свойствам, чем калий, цезий также не образует в сколь-либо значимые изоморфные. Родственные связи, кристаллохимические и геохимические, у рубидия с калием намного ярче проявлены, чем с цезием.

В природных соединениях цезий с рубидием несут черты халькофильного поведения, концентрируясь в составе специфических сульфидов, содержащих крупные полости-«фонари» (галхаит-воронцевит) или обладающих туннельной структурой (члены серии: расвумит-паутовита-пикополит).

В природных твердых растворах полные изоморфные замещения между Cs, K, Rb, Tl и Li плохо проявлены, за исключением рядов: поллуцит [Cs] – анальцим [$Na(H_2O)$]; лондонит [Cs] – родицит [K] – туретит [Li]; фторапофиллит-(Cs) [Cs] – фторапофиллит-(K) [K].

Таблица 1. Цезийсодержащие минералы

Минерал	Упрощенная формула	**Cs_2O (Cs*), мас. %**	Условия нахождения	Место-нахождения (примеры)	Источники
Расвумит	KFe_2S_3	до 2.9*	Ультраагпаи-товые фельдшпатоид-ные породы	Mont Saint-Hilaire (Канада)	Chakhmouradian et al., 2001
Авогадрит	$(K,Cs)BF_4$	до 7.0*)	Возгоны фумарол	Vesuvius, Campania, и Vulcano, Lipari Islands (Италия)	Palache et al., 1951
«Гидроксинатро-микролит» [Натровистантит]	$(Na,Bi,Sb^{+3})_2Ta_2O_6(H_2O,Cs)$ $(Na,Cs)Bi(Ta,Nb,Sb)_4O_{12}$	4.1	Гранитные пегматиты литиевого типа	Koktokay (Китай)	Волошин и др., 1983
Берилл (воробьевит)	$[R^+(H_2O)_z]_x[Be_{3-x}Li_xAl_2Si_6O_{18}]$, где $R = (Cs_{1-z}Na_z)$	до 8.3	Гранитные пегматиты редкометально-самоцветного типа	Липовка и Мокруша, Ср. Урал; пегматиты Калифорнии (США)	Вернадский, 1908; Ненадкевич, 1911; Якубович и др., 2009
Анальцим	$NaAlSi_2O_6 \bullet nH_2O$ (n < 1)	до 16.9	Гранитные пегматиты литиевого типа	Вороньи тундры, Кольский п-в	Пеков, Кононкова, 2010
Гидроксикено-микролит [Цезстибтантит]	$(□,Na,Sb^{+3})_2Ta_2O_6(H_2O,Cs)$ $[(Cs,Na)_2Sb_3Ta_4O_{12}]$	5.4 – 7.4	Гранитные пегматиты литиевого типа	Вороньи тундры, Кольский п-ов	Волошин и др., 1981
Филлотунгстит	$(H_2O,M)_x(W,Fe)(O,OH)_{5\ y}H_2O$ (M = Ca, Cs, Pb, K)	0.77-2.18*	Гидротермальное полиметаллическое месторождения	Шахта Клара, Обервольфах, Баден-Вюртемберг (Германия)	Walenta, K, 2086, Grey et.at., 2013

Лейфит	$NaNa_6[Be_2(Si,Al,Zn)_{18}O_{39}F_2]$	до 1.4	Ультраагпаитовые пегматиты	Илимаусак (Гренландия)	Petersen et al., 1994
Калиевый полевой шпат	$KAlSi_3O_8$	до 1.0	Гранитные пегматиты литиевого типа	Вороньи тундры, Кольский п-в	Минералы, 2003; Пеков, Кононкова, 2010
Рубиклин	$RbAlSi_3O_8$	0.5-2.2	Гранитные пегматиты литиевого типа	Вороньи тундры, Кольский п-в	Teertstra et al., 1997, Пеков, Кононкова, 2010
Бацит	$Be_3Sc_2(Si_6O_{18})$	от 0.31 до 2.93	Гранитные пегматиты	Кент (Казахстан), Tørda (Норвегия), Baveno (Италия)	Чистякова и др., 1968; Juve, Bergstøl, 1990; Gramaccioli et al., 2000
Биотит	$K(Mg,Fe)_3AlSi_3O_{10}(OH,F)_2$	до 7.1	Гранитные пегматиты литиевого типа и ореолы вокруг них	Гольцы, В. Саян (Россия), S. Dakota (США)	Hess, Fahey, 1932; Минералы, 1992
Мусковит	$KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$	до 1.2	Гранитные пегматиты литиевого типа	Вороньи тундры, Кольский п-в; Varutresk (Швеция)	Минералы, 1992; Пеков, Кононкова, 2010
Лепидолит	$K(Li,Al)_3(Si,Al)_4O_{10}(F,OH)_2$	до 1.0	Гранитные пегматиты литиевого типа	Вороньи тундры, Кольский п-в	Пеков, Кононкова, 2010
Полилитионит	$KLi_2AlSi_4O_{10}(F,OH)_2$	до 6.2	Гранитные пегматиты литиевого типа	Вороньи тундры, Кольский п-в	Пеков, Кононкова, 2010
Волошинит	$Rb(LiAl_{1.5}\square_{0.5})[Al_{0.5}Si_{3.5}O_{10}](F,OH)_2$	1.0–2.1	Гранитные пегматиты литиевого типа	Вороньи тундры, Кольский п-в	Пеков и др., 2009а; Пеков, Кононкова, 2010
Ниобокуплетскит	$K2Na(Mn,Fe^{2+})_7(Nb,Zr,Ti)_2Si_8O_{26}O_2(OH)_4(O,F)$	0.03–0.29	Щелочные постмагматические образования	Матча (Киргизия)	Паутов и др., 2012
Наливкинит*	$LiKNaFe^{2+}{}_7Ti_2(Si_8O_{24})O_2(OH)_4F$	0.2–1.9	Щелочные постмагматические образования	Дараи-Пиёз (Таджикистан)	Агаханов и др. 2008; Uvarova et al., 2008b

Родицит	$(K,Cs)Al_4Be_4(B,Be)_{12}O_{28}$	1.7–6.4	Гранитные пегматиты редкометально-самоцветного типа	Сарапулка и Шайтанка, Ср. Урал, многие пегматиты Мадаскара	Rose, 1834; Damour, 1882; Lacroix, 1910; Pring et al., 1986; Pekov et al., 2010
Гайнесит	$(Na,Cs)_2(Be,Li)(Zr,Zn)_2(PO_4)_4 * 1\text{-}2H_2O$	1.9–2.2	Гранитные пегматиты литиевого типа	Nevel, Maine (США)	Moore et al., 1983; Foord et al., 1994
Аверьевит	$Cu_5O_2(VO_4)_2 * CuCl * (Cs,K,Rb)Cl$	3.4 (на эл.)	Возгоны фумарол	Толбачик, Камчатка	Вергасова и др., 1998
Юсуповит	$Na_2Zr(Si_6O_{15})(H_2O)_3$	2.2–3.3	Щелочные постмагматические образования	Дараи-Пиёз (Таджикистан)	Agakhanov et al., 2015
Булгакит	$Li_2CaFe^{2+}{}_7Ti_2(Si_8O_{24})O_2(OH)_4F$	0.1–0.4	Щелочные постмагматические образования	Дараи-Пиёз (Таджикистан)	Agakhanov et al., 2016
Криптохалцит	$K_2Cu_5O(SO_4)_5$	0.7–1.1	Возгоны фумарол	Толбачик, Камчатка	Pekov et al., 2018
Гидроксикено-пирохлор	$(□,Sb^{+3},Na)_2Nb_2O_6(H_2O,Cs)$	13.71–15.75	Гранитные пегматиты редкометально-самоцветного типа	Sakavalana (Мадагаскар)	Biagioni et al., 2018
Воронцовит	$Tl(Hg_5Cu)_{\Sigma 6}As_4S_{12}$	0.0–0.7	Гидротермальный золотоносные месторождения, карлинского типа	Воронцовское золоторудное месторождение, С. Урал	Kasatkin et al., 2018
Ферроворонцовит	$Tl(Fe_5Cu)_{\Sigma 6}As_4S_{12}$	0.2–0.8	Гидротер-мальный золото-носные месторож-дения, карлинско го типа	Воронцовское золоторудное месторождение, С. Урал	Kasatkin et al., 2018
Алеутит	$[Cu_5O_2](AsO_4)(VO_4) * Cu,K,Pb,Rb,Cs,)Cl$	0.1–0.3	Возгоны фумарол	Толбачик, Камчатка	Siidra et al., 2019

Авдеевит	$(Na,Cs)(Be_2Li)Al_2(Si_6O_{18})$	6.1–6.8	Гранитные пегматиты редкометально-самоцветного типа	Месторождении Кат Чей, район Кьяукм, штат Шан (Мьянма)	Агаханов и др., 2020
Летниковит-(Ce)	$(Nao)Ca_2Ce_2[Si_7O_{17}(OH)]F_4(H_2O)_4$	0.4–0.7	Щелочные постмагматические образования	Дараи-Пиёз (Таджикистан)	Agakhanov et al., 2023
Калюжныит-(Ce)	$NaKCaSrCeTi(Si_8O_{21})OF(H_2O)_5$	3.6–4.2	Щелочные постмагматические образования	Дараи-Пиёз (Таджикистан)	Agakhanov et al., 2024
Туретит	$LiAl_4Be_4(B_{11}Be)O_{28}$	3.4–5.7	Гранитные пегматиты редкометально-самоцветного типа	Sakavalana (Мадагаскар)	Hatert et al., 2025
Шабазит-Ca	$Ca_4[Al_4Si_8O_{24}]*12H_2O$	0.60-1.20	Метасоматические и гидротермальные образования	Мариискоe (Малышевское) м-ние, Ср. Урал	Карпов и Агаханов, 2025
Шабазит-K	$(K,Na,Ca)_4[Al_4Si_8O_{24}]*12H_2O$	0.28–0.75	Метасоматические и гидротермальные образования	Мариискоe (Малышевское) м-ние, Ср. Урал	Карпов и Агаханов, 2025
Баратовит	$KLi_3Ca_7Ti_2(Si_6O_{18})_2(F,OH)_2$	до 2.4	Щелочные постмагматические образования	Дараи-Пиёз (Таджикистан)	данные авторов

Список литературы

1. Агаханов А.А., Степаненко Д.А., Зубкова Н.В., Паутов Л.А., Пеков И.В., Касаткин А.В., Карпенко В.Ю., Агаханова В.А., Шкода Р., Бритвин С.Н., Пущаровский Д.Ю. Авдеевит – Na-доминантный щелочной берилл: установление статуса минерального вида и новые данные // ЗРМО. 2020. Т. 149. №6. С. 1-19.

2. Агаханов А.А., Паутов Л.А., Уварова Ю.А., Соколова Е.В., Хавторн Ф., Карпенко В.Ю. Наливкинит, $Li_2NaFe^{2+}{}_7Ti_2(Si_8O_{24})O_2(OH)_4F$, новый минерал из группы астрофиллита с Дараи-Пиёзского массива (Таджикистан) // Новые данные о минералах. 2008. Вып. 43. С. 5-13.

3. Вергасова Л.П., Старова Г.Л., Филатова С.К., Ананьев В.В. Аверьевит $Cu_5(VO_4)_2O_2 * nMX$ – новый минерал вулканических эксгаляций // Доклады РАН. 1998. Т. 359. С. 804–807.

4. Вернадский В.И. О воробьевите и химическом составе бериллов // Тр. Геол. Музея им. Петра Великого Имп. Академии Наук. 1908. Т. II. С. 81-102

5. Волошин А.В., Ю.П. Меньшиков, Я.А. Пахомовский, Л.И. Полежаева. Цезстибтантит (Cs, Na)$SbTa_4O_{12}$ – новый минерал из гранитных пегматитов // ЗВМО. 1981. №3. С. 345–351.

6. Волошин А.В., Пахомовский Ю.А., Степанов В.И., Тюшева Ф.Н. Натровистантит (Na,Cs)Bi(Ta,Nb,Sb)$_4O_{12}$ – новый минерал из гранитных пегматитов // Минералогический журнал. 1983. Т. 5. № 2. С. 82–86.

7. Карпов А.О., Агаханов А.А. Cs-содержащий шабазит из Мариинского (Малышевского) изумрудно-бериллиевого месторождения, Средний Урал // Минералогия. 2025. Т. . №4. С. 5-20.

8. Минералы. Справочник. 1992. Т. IV, вып. 1. Силикаты со структурой, переходной от цепочечной к слоистой. Слоистые силикаты. М., Наука, 599 с.

9. Минералы. Справочник. Т. V, вып. 2. Каркасные силикаты. Силикаты с разорванными каркасами. Полевые шпаты. М.: Наука. 2003. 583 с.

10. Ненадкевич К.А. Материалы к познанию химического состава минералов России. VI. Цезиевый берилл (воробьевит) // Тр. Геол. Музея им. Петра Великого Имп. Академии Наук, 1911. Т. V. В. 2. С 53-56.

11. Паутов Л.А., Карпенко В.Ю., Агаханов А.А. Ниобокуплетскит из Матчинского массива (Кыргызстан) // Новые данные о минералах. 2012. Вып. 47. С. 5-25.

12. Пеков И.В., Кононкова Н.Н., Агаханов А.А., Белаковский Д.И., Казанцев С.С., Зубкова Н.В. Волошинит – новая рубидиевая слюда из гранитных пегматитов Вороньих тундр (Кольский полуостров) // ЗРМО. 2009. № 3. С. 90-100.

13. Пеков И.В., Кононкова Н.Н. Рубидиевая минерализация в редкометальных гранитных пегматитах Вороньих тундр (Кольский полуостров, Россия) // Геохимия. 2010. № 7. С. 741-760.

14. Чистякова М.Б., Минералогия и генетические особенности храсталеносных пегматитов Кента (Центральный Казахстан) // Труды Минералогического музея. АН СССР. 1974. В. 23. С. 113–176.

15. Якубович О.В., Пеков И.В., Стил Я.М., Масса В., Чуканов Н.В. Роль щелочных металлов в формировании производных структурных мотивов на основе берилла: сравнительная кристаллохимия воробьевита и пеззоттаита // Кристаллография. 2009.

T. 54. №3. C. 432-445.

16. Agakhanov A.A., Pautov L.A., Karpenko V.Y., Sokolova E.V., Abdu Y.A., Hawthorne F.C., Pekov I.V., Siidra O.I. Yusupovite, ideally Na2Zr(Si6O15)(H2O)3, a new mineral species from the Darai-Pioz alkaline massif and its implications as a new microporous filter for large ions // Americ. Miner. 2015. Vol. 100. Pt.7 P. 1502 – 1508.

17. Agakhanov A.A., Pautov L.A., Sokolova E.V., Abdu Y.A., Hawthorne F.C., Karpenko V.Y. Two astrophyllite – group minerals, bulgakite and nalivkinite: bulgakite, a new mineral from the Darai-Pioz alkaline massif, Tajikistan and revision of the crystal structure and chemical formula of nalivkinite // Canad. Mineral. 2016. Vol. 54. Pt. 1. P. 33-48.

18. Agakhanov A.A., Sokolova E., Cámara F., Karpenko V.Yu., Hawthorne F.C., Pautov L.A., Kasatkin A.V., Pekov I.V., Agakhanov V.A. Letnikovite-(Ce), (Na □)$Ca_2Ce_2[Si_7O_{17}(OH)]F_4(H_2O)_4$, a new mineral from the Darai-Pioz alkaline massif, Tajikistan: mineral description, crystal structure and a new single $[Si_7O_{17}(OH)]$ sheet. Mineralogical Magazine. 2023. Vol. 87. No. 6. P. 807-818.

19. Agakhanov A.A., Sokolova E., Karpenko V.Yu., Hawthorne F.C., Pautov L.A., Kasatkin A.V., Agakhanov V.A. and Pekov I.V. Kalyuzhnyite-(Ce), $NaKCaSrCeTi(Si8O_{21})OF(H_2O)_5$, a new mineral from the Darai-Pioz alkaline massif, Tien-Shan mountains, Tajikistan: mineral description, crystal structure and a new dou-ble (Si8O21) sheet. Mineralogical Magazine. 2024. Vol. 88. No. 1. P. 19-30.

20. Biagioni C., Meisser N., Nestola F., Pasero M., Robyra M., Roth P., Schnyder C. and Gieré R. Hydrokenopyrochlore, (□,#)$_2Nb_2O_6 \cdot H_2O$, a new species of the pyrochlore supergroup from the Sahatany Pegmatite Field, Antananarivo Province, Madagascar // Eur. J. Mineral. 2018. Vol. 30. Pt. 4.C. 869-876.

21. Chakhmouradian A.R., Mitchell R.H., Horváth L. Rb-Cs-enriched rasvumite and sectorial loparite-lueshite intergrowths from the Mont Saint-Hilaire alkaline complex, Quebec, Canada // GAC-MAC Ann. Mtg. Abstract with Program. St. Johns. 2001. Vol. 26. P. 24.

22. Damour A. Sur la rhodizite // Bull. Soc. Fr. Minér. 1882. Vol. 5. P. 98-103.

23. Gramaccioli C.M., Diella V., Demartin F., Orlandi P., Camposrini I. Cesian bazzite and thortveitite from Cuassi Al Monte, Varese, Italy: a comparison with the material from Baveno and inferred origin // Canad. Miner. 2000. Vol. 38. Pt. 6. P. 1409-1418.

24. Grey I.E., Mumme W.G., Macrae M. Lead-bearing phyllotungstite from the Clara mine, Germany with an ordered pyrochlorehexagonal tungsten bronze intergrowth structure // Mineralogical Magazine. 2013. Vol. 77. P. 57–67.

25. Juve G. and Bergstøl S. Caesian Bazzite in Granite Pegmatite in Tordal, Telemark, Norway // Mineralogy and Petrology. 1990. Vol. 43. P. 131-136.

26. Hatert F., Depret M., Bomal F., Pezzotta F., Vignola P., Wälltm M., Lefèvre D.P., Škoda R., Kasatkin A.V., Agakhanov A.A., Zubkova N.V., Bonazzi M., Zanetti A., Rotiroti N., Rispledente A. Torutite, $LiAl_4Be_4(B_{11}Be)O_{28}$, a new borate mineral from the Ambalabe pegmatite, Madagascar \\ The Canadian Journal of Mineralogy and Petrology. 2025. Vol. 63. Pt. 3. P. 867-878.

27. Hess F.L., Fahey J.J. Cesium biotite from Custer country, S Dakota // Amer. Miner. 1932. Vol. 17. № 5. P. 173-176.

28. Lacroix A. Nouvelles observations sur les minéraux des pegmatites de Madagascar // Bull. Soc. Fr. Minér. 1910. Vol. 33. P. 37-53.

29. Kasatkin A.V., Nestola F., Agakhanov A.A., Škoda R., Karpenko V.Y., Tsyganko M.V.,

Plášil J. Vorontsovite, $(Hg_5Cu)_{\Sigma 6}TlAs_4S_{12}$, and Ferrovorontsovite, $(Fe_5Cu)_{\Sigma 6}TlAs_4S_{12}$: The Tl- and Tl-Fe-Analogues of Galkhaite from the Vorontsovskoe Gold Deposit, Northern Urals, Russia // Minerals. 2018. Vol. 8. No 5. P. 185.

30. Palache C., H. Berman, C. Frondel // Dana's system of mineralogy. 1951. (7th edition). V. II. P. 97–98.

31. Pekov I.V., Yakubovich O.V., Massa W., Chukanov N.V., Kononkova N.N., Agakhanov A.A., Karpenko V.Yu. Londonite from Urals and new aspects of crystal chemistry of the rhodizite-londonite series // Canad. Miner. 2010. Vol. 48, Pt. 2. P. 241-254.

32. Pekov I.V., Koshlyakova N.N., Zubkova N.V., Agakhanov A.A., Pushcharovsky D.Y., Yapaskurt V.O., Belakovskiy D.I., Vigasina M.F., Sidorov E.G., Britvin S.N. Cryptochalcite, K2Cu5O(SO4)5, and cesiodymite, $CsKCu_5O(SO_4)_5$, two new isotypic minerals and the K–Cs isomorphism in this solid-solution series // Eur. J. Mineral. 2018. Vol. 30. No 2. P. 399–402.

33. Pring A., Din V.K., Jefferson D.A., Thomas J.M. The crystal chemistry of rhodizite: a re-examination // Miner. Mag. 1986. Vol. 50. P. 163-172.

34. Rose G. Über den Rhodizit, eine neue Mineralgattung // Poggendorf's Ann. Phys. Chem. 1834. Vol. 33. P. 253-256.

35. Shannon R.D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides // Acta Cryst. 1976. A32. P. 751-767.

36. Shannon R.D., Prewitt C.T. Effective ionic radii in oxides and fluorides // Acta Cryst. 1969. C. 25. P. 925-945.

37. Siidra O.I., Nazarchuk E.V., Agakhanov A.A., Polekhovsky Y.S. Aleutite [Cu5O2](AsO4)(VO4)·(Cu0.5□0.5)Cl, a new complex salt-inclusion mineral with Cu2+ substructure derived from a Kagome-net // Mineral. Magaz. 2019. Vol. 83. No 6. P. 847- 853.

38. Uvarova Y.A., Sokolova E.V., Hawthorne F., Agakhanov A.A., Pautov L.A. The crystal structure of nalivkinite a new lithium member of astrophyllite croup // Canad. Miner. 2008b. Vol.46. Pt. 3. P. 651-659.

39. Walenta K. Phyllotungstit, ein neues sekund¨ares Wolframmineral aus der Grube Clara im mittleren Schwarzwald // Neues Jahrb. Mineral. 1984. P. 529–535.

О ПРИРОДЕ ОКРАСКИ ГОЛУБОГО И ЗЕЛЕНОГО ТУГТУПИТА ИЗ ЛОВОЗЁРСКОГО МАССИВА (КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ)

Булах М.О.[1] (*bulahmo@my.msu.ru*), **Шендрик Р.Ю.**[2] (*roshen@yandex.ru*), **Япаскурт В.О.**[1], **Пеков И.В.** (*igorpekov@mail.ru*)

[1]*МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва,*
[2] *Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск*

Аннотация. Необычные по окраске голубая и светло-зеленая разновидности тугтупита из Ловозёрского щелочного массива (Кольский полуостров) изучены методами электронно-зондового микроанализа, спектроскопии оптического поглощения, КРС и ЭПР. Показано, что окраска этих разновидностей связана с замещением части Cl на анион-радикал $S_3^{\bullet-}$, который ранее в тугтупите не был известен.

Ключевые слова: *тугтупит, бериллосиликат, группа содалита, полисульфидные группы, спектр оптического поглощения, фотохромизм*

Тугтупит – редкий в природе содалитоподобный бериллосиликат с идеализированной формулой $Na_8[Be_2Al_2Si_8O_{24}]Cl_2$, впервые описанный в 1960 году в ультраагпаитовых пегматитах сразу двух щелочных массивов – это Илимаусак (Южная Гренландия) и Ловозеро (Кольский полуостров) и [4, 8]. Позднее этот минерал был обнаружен также в щелочных пегматитах горы Эвеслогчорр в Хибинах (Кольский полуостров) [1] и в ксенолите щелочного сиенита в массиве Сент-Илер (Канада) [7].

Для музейных и частных минералогических коллекций тугтупит интересен не только из-за редкости и красоты (зачастую этот минерал окрашен в яркий малиновый, красный или розовый цвет, благодаря чему даже используется как экзотический драгоценный камень), но и благодаря присущим ему способностям к люминесценции и тенебресценции (фотохромизму). Фотохромизм тугтупита, выраженный в появлении у желтых, бледно-розовых и бесцветных образцов красной / малиновой окраски разной густоты за считанные минуты или даже секунды под действием ультрафиолетовых лучей, связывают с присутствием в минерале примесной серы (в формах S_2^{2-}, $S_2^{\bullet-}$ или S_4^{2-}), замещающей хлор. Предполагается, что быстрая смена цвета в данном случае обусловлена образованием либо лилового хромофора $S_4^{\bullet-}$ по схеме $S_4^{2-} + S_2^{\bullet-} \leftrightarrow S_4^{\bullet-} + S_2^{2-}$, либо центра окраски F_{Cl}^- (вакансия в позиции хлора, захватившая электрон): $S_2^{2-} + \square^0_{Cl} \leftrightarrow S_2^{\bullet-} + \square^-_{Cl}$ [3, 5, 6]. Вместе с тем, в природе известны находки, пусть и весьма редкие, голубых и зеленых разностей тугтупита, особенности которых (в т.ч. природа окраски) ранее не исследовались.

В настоящей работе образцы голубого и светло-зеленого тугтупита (рис. 1) изучены методами сканирующей электронной микроскопии, микрорентгеноспектрального (электронно-зондового) анализа, спектроскопии оптического поглощения, спектроскопии комбинационного рассеяния света (рамановской) и электронно-парамагнитного резонанса (ЭПР).

Обе эти необычные по окраске разновидности тугтупита происходят из пегматитовой жилы Сиреневой, вскрытой рудником Умбозеро на г. Аллуайв в северо-западной части Ловозёрского массива, и ассоциируют с уссингитом, ломоносовитом, манганонептунитом, борнеманитом, шизолитом, терскитом, эгирином, беловитом-(Ce) и витуситом-(Ce) [2].

Для изученных образцов характерен стехиометричный состав каркаса с соотношением Si : Al ≈ 4 : 1 (содержание Be не определялось). Крупные катионы, которые могли бы замещать Na, электронно-зондовым методом не зафиксированы. Количество примесной серы составило 0.08–0.17 мас. % S, что отвечает 0.02–0.05 атома S на формулу.

Под действием длинноволновых УФ-лучей (λ = 365 нм) у голубого и зеленого тугтупита возникает ярко-оранжевая люминесценция, однако после облучения окраску минерал не меняет. В спектрах оптического поглощения образцов наблюдается широкая полоса с максимумом в районе 580–600 нм (рис. 2), которая у содалитоподобных алюмосиликатов обычно относится к анион-радикалу $S_3^{\bullet-}$, являющемуся синим хромофором [5]. Данные ЭПР (интенсивный сигнал с g-фактором 2.036) и КР-спектроскопии (серия характерных для $S_3^{\bullet-}$ полос в диапазоне 1500–3600 $см^{-1}$) подтверждают присутствие группы $S_3^{\bullet-}$ в голубом и зеленом тугтупите. Зеленая окраска может быть связана с нахождением в минерале одновременно $S_3^{\bullet-}$ и $S_2^{\bullet-}$ (желтый хромофор).

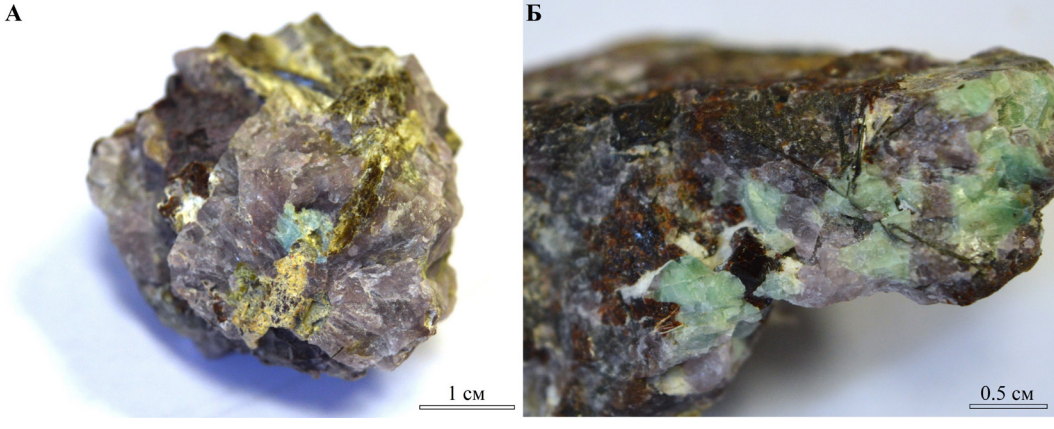


Рис. 1. Зерна голубого (А) и зеленого в сочетании с голубым (Б) тугтупита, врастающие в уссингит, в ассоциации с ломоносовитом, манганонептунитом и эгирином (пегматитовая жила Сиреневая, рудник Умбозеро, Ловозёрский массив, Кольский полуостров).

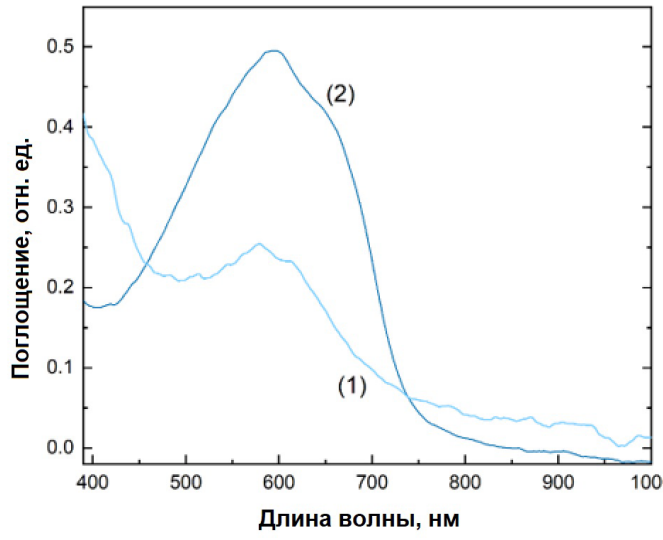


Рис. 2. Спектры оптического поглощения светло-зеленого (1) и голубого (2) тугтупита.

Исследования выполнены в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова, госбюджетная тема № 121061600049-4.

Список литературы:

1. Меньшиков Ю.П., Пахомовский Я.П., Яковенчук В.Н. Бериллиевая минерализация в жильных образованиях Хибинского массива // Записки ВМО – 1999 – Т. 128, № 1 – С. 3–14.

2. Пеков И.В. Ловозерский массив: история исследования, пегматиты, минералы. М., Земля, 2001, 432 с.

3. Платонов А.Н., Таращан А.Н., Беличенко В.П., Поваренных А.С. Спектроскопическое исследование сульфидной серы в некоторых каркасных алюмосиликатах // Конституция и свойства минералов – 1971 – Вып. 5 – С. 61–72.

4. Семенов Е.И., Быкова А.В. Бериллосодалит // Доклады АН СССР – 1960 – Т. 133 – С. 1191–1193.

5. Chukanov N.V., Shchipalkina N.V., Shendrik R.Yu., Vigasina M.F., Tauson V.L., Lipko S.V., Varlamov D.A., Shcherbakov V.D., Sapozhnikov A.N., Kasatkin A.V., Zubkova N.V., Pekov I.V. Isomorphism and mutual transformations of S-bearing components in feldspathoids with microporous structure // Minerals – 2022 –Vol. 12 – Article 1456.

6. Gaft M., Panczer G., Nagli L., Yeates H. Laser-induced time-resolved luminescence of tugtupite, sodalite and hackmanite // Phys. Chem. Miner. – 2009 – Vol. 36 – P. 127–141.

7. Horvath L., Gault R.A. The Mineralogy of Mont Saint-Hilaire, Quebec // Min. Rec. – 1990 – Vol. 21, N 4 – P. 281–359.

8. Sørensen H. Beryllium minerals in a pegmatite in the nepheline syenites of Ilimaussaq, South West Greenland // Inter. Geol. Congress, Rep. 21st Session, Norden – 1960 – P. 31–35.

БАРИЕВЫЕ ФОСФАТЫ НАДГРУППЫ АПАТИТА ИЗ МЕСТОРОЖДЕНИЯ АПАТИТОВЫЙ ЦИРК (ХИБИНЫ, КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ)

Карпов А. О.[1,2] (*karpovao@my.msu.ru*), **Касаткин А. В.**[2], **Савченко Е. Э.**[3], **Агаханов А. А.**[2], **Паутов Л. А.**[2], **Пеков И. В.**[1]

[1] МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, г. Москва; [2] Минералогический музей имени А.Е. Ферсмана РАН, г. Москва; [3] Геологический институт КНЦ РАН, г. Апатиты

Аннотация: Методами сканирующей электронной микроскопии, электронно-зондового микроанализа и КР-спектроскопии охарактеризованы фторалфорсит (в том числе его высококальциевая разновидность), мияхисаит, куаннерсуит и барийсодержащий фторапатит из месторождения Апатитовый цирк (гора Расвумчорр, Хибинский щелочной массив, Кольский полуостров). Для перечисленных бариевых фосфатов надгруппы апатита это второе в мире место находки, а для фторафлосита и мияхисаита также новый генетический тип.

Ключевые слова: *фторалфорсит, мияхисаит, куаннерсуит, фторапатит, надгруппа апатита, изоморфизм, лакунарный апатит, фосфат бария, Хибинский щелочной массив, Арктика*

Барий является в целом малохарактерным элементом для минералов надгруппы апатита. Из 48 входящих в неё минеральных видов только пять содержат Ba в качестве видообразующего компонента: это алфорсит $Ba_5(PO_4)_3Cl$, фторалфорсит $Ba_5(PO_4)_3F$, мияхисаит $(Sr,Ca)_2Ba_3(PO_4)_3F$, мореландит $Ca_2(Ba,Pb)_3(AsO_4)_3Cl$ и куаннерсуит-(Ce) $NaCeBa_3(PO_4)_3F_{0.5}Cl_{0.5}$. Богатые барием апатитоподобные минералы известны в нескольких геологических обстановках: это специфические обогащенные Ba метаморфические породы (так, алфорсит был открыт в санборнитовых кварцитах из штата Калифорния в США [1], фторалфорсит – в пирометаморфитах из пустыни Негев в Израиле [2], а мияхисаит – в метаманганолитах месторождения Симохараи в Японии [3]), метаморфогенные месторождения лонгбанского типа (здесь Ba входит в состав гедифана $Ca_2Pb_3(AsO_4)_3Cl$ и его Ba-доминантного аналога мореландита [4]) и щелочные породы, их пегматиты и метасоматиты. Малая примесь бария довольно часто фиксируется в минералах надгруппы апатита из щелочных пород, однако её члены, содержащие более 0.1 атома на формулу (далее – а.ф.) Ba (> 3 мас. % BaO), здесь очень редки. Помимо фосфата с видообразующим Ba – куаннерсуита-(Ce), открытого в ультраагпаитовом пегматите на плато Куаннерсуит в массиве Илимаусак в Гренландии [5] и высокобариевого (до 1 а.ф. Ba) беловита-(Ce) $NaCeSr_3(PO_4)_3F$ из пегматитового тела Шкатулка на горе Аллуайв в Ловозерском массиве [6], отметим находку богатого барием гидроксилапатита из лампроитов Западного Кимберли (Австралия), содержащего до 0.35 а.ф. Ba (до 12.5 мас. % BaO) [7].

Нами в образце микроклин-нефелиновой породы из месторождения Апатитовый цирк (гора Расвумчорр, Хибинский щелочной массив, Кольский полуостров)

обнаружена целая серия бариевых фосфатов надгруппы апатита: фторалфорсит, мияхисаит, куаннерсуит и обогащённый Ba фторапатит. Наиболее распространённым фосфатом бария здесь является фторалфорсит: он образует мелкие (до 20 мкм) вростки во фторапатите и субпараллельные (вероятно, синтаксические) агрегаты с фторапатитом, изредка отдельные зёрна до 0.2 мм. Химический состав фторалфорсита широко варьирует: он содержит от 3.5 до 4.8 а.ф. Ba, от 0 до 1.5 а.ф. Ca и от 0 до 0.8 а.ф. Sr; точки анализа с содержанием Ca > 1 а.ф. попадают в поле потенциально нового минерального вида с идеализированной формулой $Ca_2Ba_3(PO_4)_3F$. Мияхисаит и куаннерсуит встречаются существенно реже. Мияхисаит в среднем содержит 0.4 а.ф. Ca, а куаннерсуит – 0.3 а.ф. Sr и 0.1 а.ф. Ca; отношение Ce/La в куаннерсуите близко к 1. Срастающийся с куаннерсуитом мияхисаит представлен ранее неизвестной Na-REE разновидностью, содержащей до 0.15 а.ф. Na и до 0.15 а.ф. LREE. Ассоциирующий с фторалфорситом фторапатит необычно богат барием: он содержит до 0.35 а.ф. Ba (до 10.5 мас. % BaO). Также фторапатит содержит до 0.2 а.ф. Na (до 1.1 мас. % Na_2O); натрий в него скорее всего входит в соответствии с лакунарной схемой изоморфизма, т.е. с участием вакансии в позиции дополнительного аниона: $Na^+ + \square^0 \rightarrow Ca^{2+} + F^-$. Для фторалфорсита (и его высококальциевой разновидности), мияхисаита и фторапатита из изученного образца получены КР-спектры, причём для мияхисаита [и вообще соединения с составом $Sr_2Ba_3(PO_4)_3F$] КР-спектр получен впервые.

Для всех обсуждаемых бариевых фосфатов это второе в мире и первое в России место находки, а для фторалфорсита и мияхисаита также принципиально новый генетический тип: ранее эти минералы не были известны в щелочных породах. Особый интерес эта находка представляет ещё и потому, что несмотря на многолетнюю историю изучения Хибинского массива и выдающееся разнообразие в нём, с одной стороны, бариевых минералов, а с другой – членов надгруппы апатита, здесь никогда не находили апатитоподобных минералов, обогащённых барием.

Исследования выполнены в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова (№ госрегистрации 121061600049-4).

Список литературы:

1. Newberry N.G., Essene E.J., Peacor D.R. Alforsite, a new member of the apatite group: the barium analogue of chlorapatite // American Mineralogist. 1981. Vol. 66. N 9–10. P. 1050–1053.

2. Krzątała A., Skrzyńska K., Cametti G., Galuskina I., Vapnik Y., Galuskin E. Fluoralforsite, $Ba_5(PO_4)_3F$ – a new apatite-group mineral from the Hatrurim Basin, Negev Desert, Israel // Mineralogical Magazine. 2023. Vol. 87. N 6. P. 866–877.

3. Nishio-Hamane D., Ogoshi Y., Minakawa T. Miyahisaite, $(Sr,Ca)_2Ba_3(PO_4)_3F$, a new mineral of the hedyphane group in the apatite supergroup from the Shimoharai mine, Oita Prefecture, Japan // Journal of Mineralogical and Petrological Sciences. 2012. Vol. 107. N 3. P. 121–126.

4. Dunn P.J., Rose R.C. Morelandite, a new barium arsenate chloride member of the apatite group // Canadian Mineralogist. 1978. Vol. 16. N 4. P. 601–604.

5. Friis H., Balić-Žunić T., Pekov I.V., Petersen O.V. Kuannersuite-(Ce), $Ba_6Na_2REE_2(PO_4)_6FCl$, a new member of the apatite group, from the Ilímaussaq alkaline complex, south Greenland: description and crystal chemistry // The Canadian Mineralogist. 2004. Vol. 42. N 1. P. 95–106.

6. Пеков И.В. Генетическая минералогия и кристаллохимия редких элементов в высокощелочных постмагматических системах. Дисс. д.г.-м.н. М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2005. 404 с.

7. Edgar A.D. Barium-and strontium-enriched apatites in lamproites from West Kimberley, Western Australia // American Mineralogist. 1989. Vol. 74. N 7–8. P. 889–895.

ПЕРВАЯ НАХОДКА ЦИРКОНИЙСОДЕРЖАЩИХ ГРАНАТОВ В КИМБЕРЛИТАХ ЯКУТИИ

Опарин Н.А.[1] (*nik3256-1989@yandex.ru*),
Корсаков А.В.[2] (*korsakov@igm.nsc.ru*),
Олейников О.Б.[1] (*olei-oleg@yandex.ru*)

[1]ИГАБМ СО РАН, г. Якутск, [2]ИГМ им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск

Аннотация: Впервые в Якутской кимберлитовой провинции, в трубке Манчары Хомпу-Майского поля (Центральная Якутия) установлены Zr-содержащие гранаты – кимцеит и керимасит. Кристаллизация цирконийсодержащих гранатов связана с локальным обогащением цирконием остаточного расплава.

Ключевые слова: *Хомпу-Майское поле, трубка Манчары, кимберлит, кимцеит, керимасит*

Редкие минералы супергруппы гранатов [4]: кимцеит ($Ca(Zr,Ti)_2(Si,Al^{3+})_3O_{12}$) и керимасит ($Ca(Zr,Ti)_2(Si,Fe^{3+})3O_{12}$) впервые обнаружены в трубке Манчары Хомпу-Майского поля (Центральная Якутия). Данное поле расположено на северном склоне Алданской антеклизы [12] и входит в состав Якутской кимберлитовой провинции [2]. Трубка сложена серпентинизированным и карбонатизированным порфировым кимберлитом с высокими содержаниями Zr (среднее содержание 890 ppm). Такие содержания Zr близки к концентрациям этого элемента в кальцитовых кимберлитах силлов Вэссэлтон [15], в которых также присутствуют цирконийсодержащие гранаты [6]. Ранее они были диагностированы в карбонатитах щелочного массива Магнет Коув [5] и вулкана Керимаси [16], базальтовых лавах острова Стромболи [9], породах вулканического комплекса Сабатини [11], лампрофировых дайках Маратон [10] и Аиллик [13], в скарнах месторождений Высока-Златно [14] и Вилюй [3].

В кимберлитовых породах цирконийсодержащие гранаты диагностированы только в силлах Вэссэлтон [7] и трубке Нью Эландс [8]. Считается, что циркониевые минералы в кимберлитах образовались в результате концентрации несовместимых элементов в остаточном расплаве [7].

Диагностика и изучение цирконийсодержащих гранатов проводилось с использованием микрозондового анализатора Jeol JXA-8230 с волновым спектрометром и КР-картирования на системе Aprуon в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск).

Цирконийсодержащие гранаты встречаются в серпентиновом матриксе кимберлита локально, иногда образуя скопления и сростки (рис. 1). Размер отдельных зерен не превышает 50 мкм. Они сопровождаются микрозёрнами гидрограната андрадитового состава и ассоциируют с кальциртитом, кальцитом, перовскитом, минералами группы шпинели, апатитом и флогопитом. Для кристаллов цирконийсодержащих гранатов характерно скелетно-зональ-

ное строение (рис. 1). Ядра таких кристаллов могут быть как однородными (рис. 1, а, б), так и зональными (рис. 1, б, в). Однородные ядра по составу соответствуют керимаситу. По строению зональных ядер (зоны I, II и III) кристаллов можно сделать вывод об их неравномерном росте [1]. Отсутствие зон II и III на одной из сторон скелетно-зонального кристалла граната (рис. 1, г) может свидетельствовать об односторонней кристаллизации навстречу потоку питающего флюида. На внешней границе зоны III (рис. 1, в), в местах контакта с внутренней границей зоны IV, наблюдаются следы растворения, что может указывать на перерыв в кристаллизации. Зона I по составу соответствует либо керимаситу, либо кимцеиту (табл. 1), зона II – Zr-содержащему шорломиту (табл. 1), зона III – Al-содержащему андрадиту с примесью ZrO_2 до 0,71 мас. %, зона IV – андрадиту (табл. 1). От центра к краю в зонах I–III повышаются содержания Ca и Si и уменьшается Zr, при относительно выдержанных концентрациях Al, Mg, Ti и Fe (рис. 1, д, е; табл. 1). Пониженными аналитическими суммами характеризуются как краевая зона IV скелетного строения, которая имеет губчатую структуру (рис. 1), так и ксеноморфные крупные (до 50 мкм) и мелкие (1,5–2 мкм) выделения граната андрадитового состава, (рис. 1, а). Данные КР-спектроскопических исследований указывают на их гидрогранатовую природу (рис. 2).

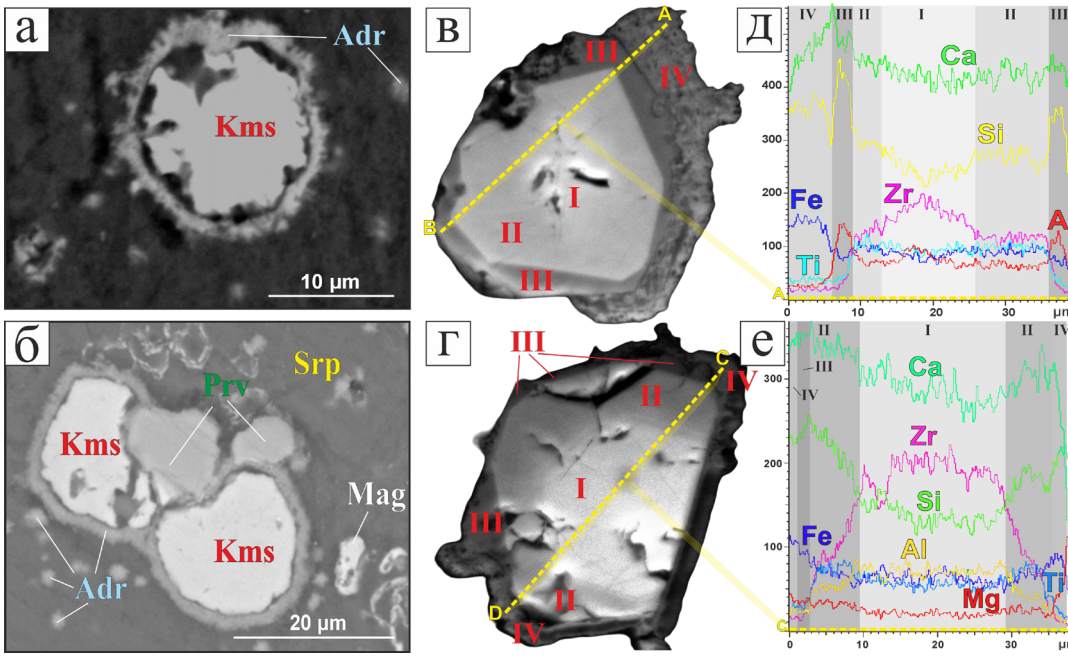


Рис. 1. Скелетно-зональные кристаллы граната из кимберлита трубки Манчары: а – скелетно-зональный кристалл граната с гомогенным по составу ядром (BSE), б – сросток скелетно-зональных кристаллов граната и зерен перовскита (BSE), в, г – скелетно-зональные кристаллы граната с зональными ядрами (BSE), д – распределение химических элементов вдоль линии сканирования A-B; е – распределение химических элементов вдоль линии сканирования C-D. Условные обозначения минералов: Kms – керимасит, Adr – гидрогранат андрадитового состава, Srp – серпентин, Prv –

перовскит, Mag – магнетит.

КР-картирование подтверждает смену состава в зональных кристаллах граната от центра к краю (рис. 2), а наличие для внешней скелетной зоны двух линий – 3568 и 3688 $см^{-1}$ (рис. 2), отвечающих изоморфизму $Si4^{+} \leftrightarrow 4OH^{-}$, позволяет отнести ее к гидрогранату андрадитового состава.

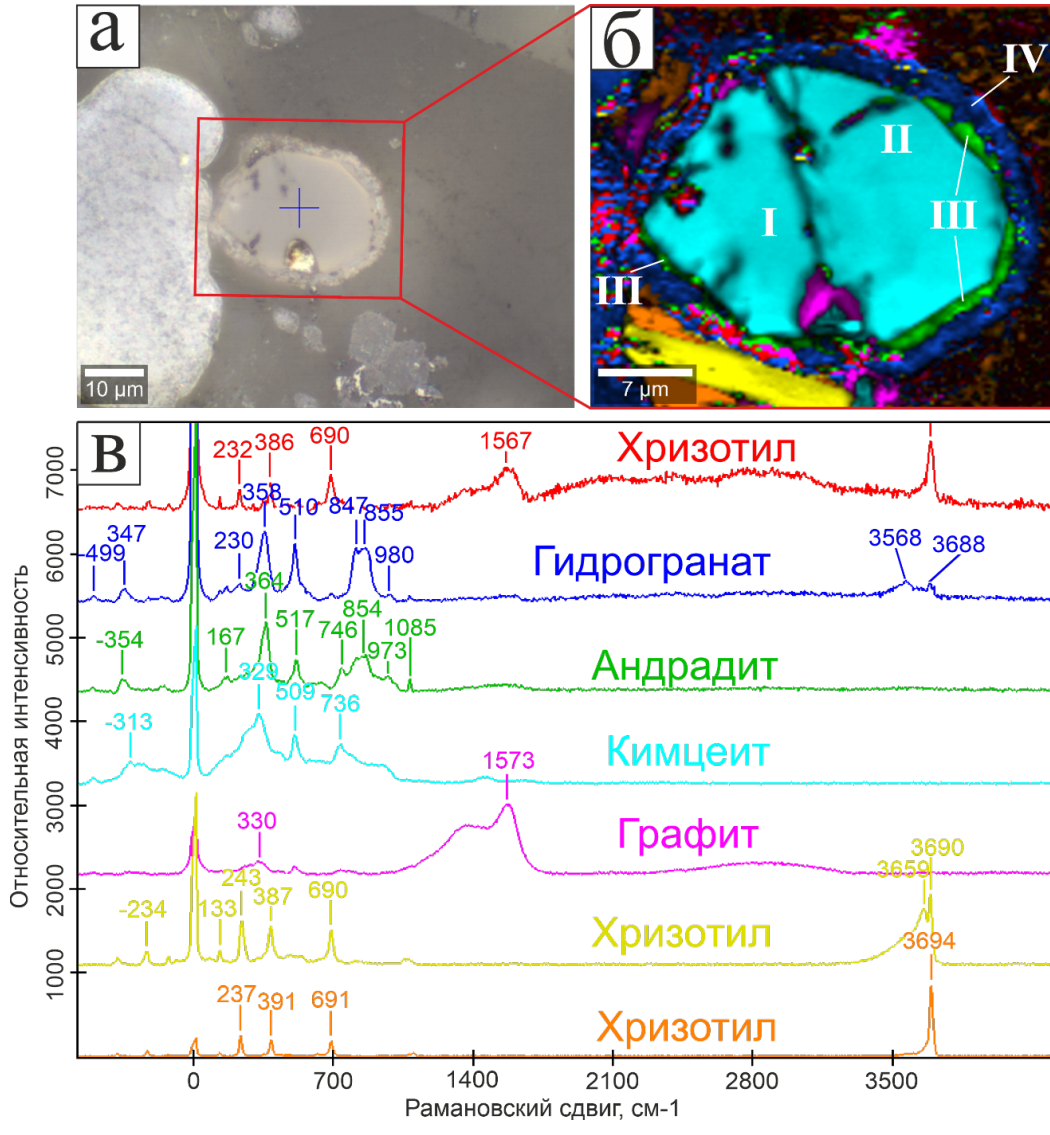


Рис. 2. Результаты КР-спектроскопического картирования скелетно-зонального кристалла граната: а – изображение кристалла в отраженном свете и выбранная область для КР-картирования; б – КР-карта этого кристалла; в – КР-спектры минералов, цвета спектров соответствуют цветам зон на КР-карте.

Табл. 1. Представительные составы скелетно-зональных кристаллов граната из кимберлита трубки Манчары, мас. %.

№	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO_2	9,94	8,48	21,1	21,39	24,4	22,70	34,56	34,75
TiO_2	5,89	6,83	11,3	9,35	11,17	11,39	5,84	5,11
ZrO_2	37,57	35,11	18,55	20,26	12,5	13,69	4,59	2,68
HfO_2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,34	0,00	0,71
Al_2O_3	6,6	7,74	7,16	7,03	3,68	4,01	6,11	4,82
FeOtot	13,17	12,22	9,77	9,19	14,06	13,29	13,47	16,06
MgO	0,00	0,00	2,71	2,91	2,74	1,86	2,52	1,55
CaO	28,22	27,95	30	30,27	30,63	30,99	33,25	32,75
Сумма	101,39	98,33	100,59	100,4	99,18	98,29	100,34	97,91
Минерал	Керимасит		Кимцеит		Шорломит		Андрадит	

Примечание. Анализы 1-4 соответствуют зоне I, 5 и 6 – зоне II, 7 и 8 – зоне III (от центра к краю зональных кристаллов граната).

Цирконийсодержащиее гранаты из трубки Манчары характеризуются более высокими концентрациями циркония и низкими титана относительно керимасита кимберлитовых силлов Вэссэлтон [7] и циркониевого шорломита дайки Нью Эландс [8]. Керимасит из кимберлитов трубки Манчары отличается более высокими содержаниями титана относительно минерала из карбонатитов вулкана Керимаси [16], Магнет Коув [5] и скарнов месторождения Высока-Златно [14], обладая при этом близкими содержаниями циркония. Схожими с гранатом из трубки Манчары строением и концентрациями титана и циркония характеризуются кристаллы из месторождения Вилюй [3].

В кимберлитах силлов Вэссэлтон [7] и дайки Нью Эландс [8] цирконийсодержащие гранаты представлены единичными мелкими ксеноморфными гомогенными по составу кристаллами, погруженными в кальцит-хлоритовую основную массу. По мнению отдельных исследователей такие гранаты являются первичной фазой основной массы и кристаллизовались непосредственно из кимберлитового расплава [8]. Проведенные кристаллохимические расчеты, согласно утвержденной IMA номенклатуре [4], показали, что в силлах Вэссэлтон минерал является керимаситом, в то время как в дайке Нью Эландс соответствует циркониевому шорломиту. Гомогенное строение зерен установлено и у керимасита базальтовых лав острова Стромболи [9], шошонитовых базальтов вулканического комплекса Сабатини [11] лампрофиров дайки Аиллик [13], ультраосновного лампрофира дайки Маратон [10] и карбонатитов Магнет Коув [5].

В отличие от этих находок цирконийсодержащие гранаты трубки Манчары имеют скелетно-зональное строение, что сближает их с гранатами из

скарнов Cu-Au месторождения Высока-Златно [14] и месторождения Вилюй, в котором они являются продуктами ретроградного изменения высокотемпературных мелилитовых скарнов [3].

Таким образом, с учётом скелетно-зонального строения и фрагментарного распространения гранатов в кимберлитах трубки Манчары их формирование относится к заключительным стадиям становления трубки под воздействием флюида/расплава, обогащенного Zr. Высокие концентрации Zr в флюиде/расплаве могут быть связаны с его повышенными содержаниями в протокимберлитовом расплаве, обусловленными контаминацией цирконий-содержащим материалом пород, слагающих каналы внедрения кимберлитовых расплавов.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИГАБМ СО РАН (проект FUFG-2024-0007). КР-картирование выполнено в рамках государственного задания ИГМ СО РАН (FWZN-2026-0002).

Список литературы:

1. Жабин А.Г. Онтогения минералов. Агрегаты. М.: Наука, 1979 – 278 с.
2. Олейников О.Б., Стифеева М.В., Опарин Н.А., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Ощепкова М.Г. U-Pb (ID-TIMS)-возраст перовскита из кимберлитов трубки Манчары (Хомпу-Майское кимберлитовое поле, Центральная Якутия) // Доклады Российской Академии Наук. Науки о Земле. – 2024 – Т. 517, № 2 – С. 203–207.
3. Galuskina I. O., Galuskin E. V., Dzierzanowski P., Armbruster T., Kozanecki M. A natural scandian garnet // American Mineralogist. – 2005 – V. 90 – P. 1688–1692.
4. Grew E. S., Locock A. J., Mills S. J., Galuskina I. O., Galuskin E. V., Halenius U. Nomenclature of the garnet supergroup // American Mineralogist. – 2013 – V. 98, № 4 – P. 785–811.
5. Milton C. Kimzeyite, a zirconium garnet from Magnet Cove, Arkansas // American Mineralogist. – 1961 – V. 46 – P. 533–548.
6. Mitchell R. H. Accessory rare earth. strontium, barium and zirconium minerals in the Benfontein and Wesselton calcite kimberlites, South Africa // Kimberlites Related Rocks and Mantle Xenoliths CPRM Special Publication. Araxa, Brazil: 1994. CPRM Special Publication. – 1994 – P. 115–128.
7. Mitchell R. H. Kimberlites, Orangeites, and Related Rocks. Boston, MA: Springer US, 1995 – 410 p.
8. Mitchell R., Meyer H. Mineralogy of micaceous kimberlites from the New Elands and Star Mines, Orange Free State, South Africa // International Kimberlite Conference Extended Abstracts. – 1986 – P. 75–77.
9. Munno R., Rossi G., Tadini C. Crystal chemistry of kimzeyite from Stromboli, Aeolian Islands, Italy // American Mineralogist. – 1980 – V. 65 – P. 188–191.
10. Platt R., Mitchell R. The Marathon Dikes. I: Zirconium-rich titanian garnets and manganoan magnesian ulvospinel-magnetite spinels // American Mineralogist. – 1979 – V. 64 – P. 546–550.

11. Schingaro E., Scordari F., Capitanio F., Parodi G., Smith D. C., Mottana A. Crystal chemistry of kimzeyite from Anguillara, Mts. Sabatini, Italy // European Journal of Mineralogy. – 2001 – V. 13, № 4 – P. 749–759.

12. Smelov A.P., Timofeev V.F. The age of the North Asian Cratonic basement: an overview. Gondwana Research. – 2007 – V. 12. – P. 279–288.

13. Tappe S., Foley S. F., Jenner G. A., Heaman L. M., Kjarsgaard B. A., Romer R. L., Stracke A., Joyce N., Hoefs J. Genesis of Ultramafic Lamprophyres and Carbonatites at Aillik Bay, Labrador: a Consequence of Incipient Lithospheric Thinning beneath the North Atlantic Craton // Journal of Petrology. – 2006 – V. 47, № 7 – P. 1261–1315.

14. Uher P., Milovská S., Milovský R., Koděra P., Bačík P., Bilohuščin V. Kerimasite, $\{Ca_3\}[Zr_2](SiFe^{3+}_2)O_{12}$ garnet from the Vysoká-Zlatno skarn, Štiavnica stratovolcano, Slovakia // Mineralogical Magazine. – 2015 – V. 79, № 3 – P. 715–733.

15. White J., Sparks R., Bailey K. et al. Kimberlite sills and dykes associated with the Wesselton kimberlite pipe, Kimberley, South Africa // South African Journal of Geology. – 2012 – V. 115(1) – P. 1–32.

16. Zaitsev A. N., Williams C. T., Britvin S. N., Kuznetsova I. V., Spratt J., Petrov S. V., Keller J. Kerimasite, $Ca_3Zr_2(Fe^{3+}_2Si)O_{12}$ a new garnet from carbonatites of Kerimasi volcano and surrounding explosion craters, northern Tanzania // Mineralogical Magazine. – 2010 – V. 74, № 5 – P. 803–820.

НОВЫЙ СУЛЬФАТ СИСТЕМЫ K_2SO_4–NA_2SO_4–$CUSO_4$ ИЗ ФУМАРОЛЬНЫХ ЭКСГАЛЯЦИЙ ВУЛКАНА ТОЛБАЧИК (КАМЧАТКА)

Потехина Н.В.[1] (*potekhinanv@my.msu.ru*),
Пеков И.В.[1] (*igorpekov@mail.ru*),
Бритвин С.Н.[2] (*sergei.britvin@spbu.ru*),
Жегунов П.С.[3] (*pavel.zhegunov@bk.ru*)

[1] *Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва,*
[2] *Институт наук о Земле СПбГУ, г. Санкт-Петербург,*
[3] *Институт вулканологии и сейсмологии РАН, г. Петропавловск-Камчатский*

Аннотация: Новый безводородный сульфат системы K_2SO_4–Na_2SO_4–$CuSO_4$ с идеализированной формулой $KNaCu(SO_4)_2$ найден в эксгаляциях фумаролы Арсенатной (Второй конус Северного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения 1975-1976 гг, вулкан Толбачик, Камчатка). Параметры моноклинной элементарной ячейки нового сульфата следующие: a = 15.9726(10), b = 9.5084(6), c = 9.0660(6) Å, β = 94.1610(10)°, V = 1373.26(15) Å^3. Эмпирическая формула, в которой компоненты распределены с учётом структурных данных: $(K_{1.90}Na_{0.05})_{\Sigma1.95}Na_{1.00}(Na_{0.66}Ca_{0.34})_{\Sigma1.00}(Cu_{1.29}Na_{0.35}Zn_{0.14}Mg_{0.14}Al_{0.06}Mn_{0.02})_{\Sigma2.00}(S_{1.00}O_4)_4$ (Z = 4). Новый минерал близкородственен майзланиту $K_2NaCa(ZnNa)(SO_4)_4$.

Ключевые слова: *новый минерал, щёлочно-медный сульфат, безводородные сульфаты меди, кристаллохимия, вулкан Толбачик, Камчатка*

Новый минерал с идеализированной формулой $KNaCu(SO_4)_2$ [упрощенная структурная формула $K_2NaNaCu_2(SO_4)_4$, $Z = 4$] найден нами в высокотемпературных сульфатных инкрустациях (т.н. «голубых корках») в активной фумароле Арсенатной на Втором шлаковом конусе Северного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения 1975-1976 гг (вулканический массив Толбачик, Камчатка). В этих же «голубых корках» ранее нами был открыт купродобровольскиит $Na_4Cu(SO_4)_3$ (Shchipalkina et al., 2025) – медный аналог добровольскиита $Na_4Ca(SO_4)_3$. «Голубые корки» – это типичные образования зоны безводородных Cu-содержащих сульфатов, которая в фумароле Арсенатной богата разнообразными минералами системы K_2SO_4–Na_2SO_4–$CuSO_4$. Целый ряд щёлочно-медных сульфатов здесь – эндемики фумарол Толбачика: саранчинаит $Na_2Cu(SO_4)_2$, петровит $Na_{12}Cu_2(SO_4)_8$, купродобровольскиит $Na_4Cu(SO_4)_3$, вульфит $K_3NaCu_4O_2(SO_4)_4$.

Новый сульфат встречен в ассоциации с купродобровольскиитом $Na_4Cu(SO_4)_3$, промежуточными членами ряда лангбейнит $K_2Mg_2(SO_4)_3$ – кальциолангбейнит $K_2Ca_2(SO_4)_3$, ангидритом, санидином, гематитом, эвхлорином $KNaCu_3O(SO_4)_3$, крашенниниковитом $KNa_2CaMg(SO_4)_3F$, сильвином и теноритом. Он образует вростки неправильной формы размером до 0.15 мм в купродобровольскиите (рис.).

Параметры моноклинной элементарной ячейки нового сульфата сле-

дующие: a = 15.9726(10), b = 9.5084(6), c = 9.0660(6) Å, β = 94.1610(10)°, V = 1373.26(15) Å^3. Кристаллическая структура нашего минерала (определена по монокристальным данным, R_1 = 0.0289) аналогична структуре его синтетического аналога– сульфата $KNaCu(SO_4)_2$ (Borisov et al. 2021). Её главным элементом является каркас $[Cu(SO_4)_2]^{2-}$, состоящий из Cu-центрированных пятивершинников (или искажённых октаэдров, при включении шестого атома O в первую координационную сферу), соединённых вершинами с тетраэдрами SO_4. Калий и натрий в структуре нового сульфата упорядочены: катионы K^+ заселяют одну позицию в крупных каналах, а Na^+ – две позиции в каналах с меньшим размером полостей. Эмпирическая формула, в которой компоненты распределены с учётом структурных данных: $(K_{1.90}Na_{0.05})_{\Sigma 1.95}Na_{1.00}(Na_{0.66}Ca_{0.34})_{\Sigma 1.00}(Cu_{1.29}Na_{0.35}Zn_{0.14}Mg_{0.14}Al_{0.06}Mn_{0.02})_{\Sigma 2.00}(S_{1.00}O_4)_4$.

Родственен новому сульфату майзланит $K_2NaCa(ZnNa)(SO_4)_4$, Z = 4, недавно открытый в фумароле Ядовитой, которая располагается неподалёку от фумаролы Арсенатной (Siidra et al., 2020). Для него характерно более сложное упорядочение катионов. Помимо калия и натрия видообразующими компонентами в майзланите выступают также кальций и цинк. В нашем новом сульфате зафиксировано 1.9 мас.% ZnO (= 0.14 атома на формулу, ниже: а.ф., Zn) и 3.2 мас.% CaO *(*= 0.3 а.ф. Ca*);* в то же время, в майзланите содержание CuO достигает 4.8 мас.% (= 0.4 а.ф. Cu). Можно предположить существование изоморфной системы $^{M1}K_2{}^{M2}Na^{M3}Na^{M4}Cu_2(SO_4)_4$ – $^{M1}K_2{}^{M2}Na^{M3}Na^{M4}Zn_2(SO_4)_4$ – $^{M1}K_2{}^{M2}Na^{M3}Ca^{M4}(ZnNa)(SO_4)_4$ – $^{M1}K_2{}^{M2}Na^{M3}Ca^{M4}(CuNa)(SO_4)_4$, в которой при значительном увеличении содержания кальция происходит упорядочение натрия и кальция по двум позициям. При этом замещение Ca → Na сопровождается вхождением Na в позицию Cu (или Zn). Таким образом, для минералов этой системы реализуется следующая обобщённая схема изоморфизма: $^{M3}Ca^{2+} + {}^{M4}Na^+ \rightarrow {}^{M3}Na^+ + {}^{M4}(Cu,Zn)^{2+}$.

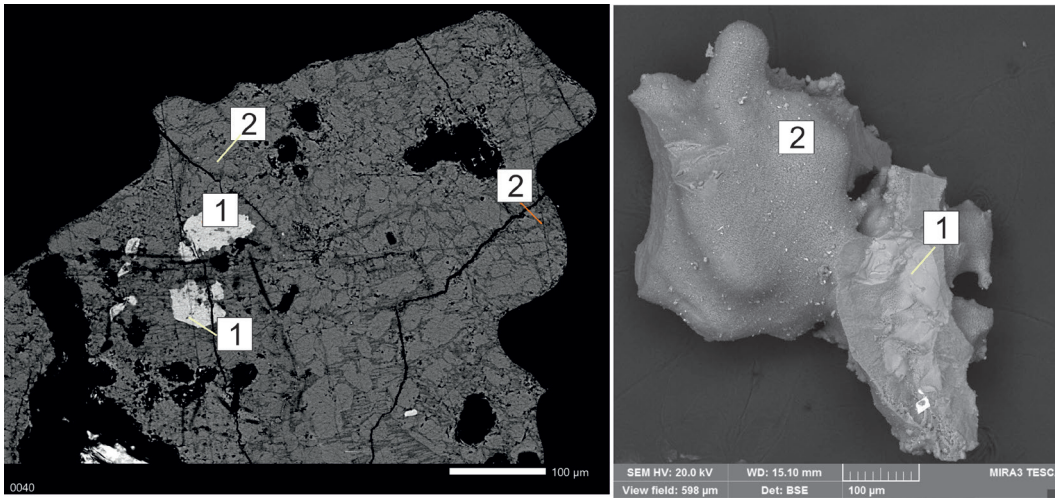


Рис. Агрегаты купродобровольскиита (2) с врастками нового сульфата $KNaCu(SO_4)_2$ (1) из «голубых корок» фумаролы Арсенатной. Изображения получены под сканирующим электронным микроскопом в режиме отражённых электронов.

Список литературы:

1. Borisov A.S., Siidra O.I., Kovrugin V.M., Golov A.A., Depmeier W., Nazarchuk E.V., Holzheid A. Expanding the family of mineral-like anhydrous alkali copper sulfate framework structures: new phases, topological analysis and evaluation of ion migration potentialities // Journal of Applied Crystallography. – 2021 – V. 54, P. 237-250.

2. Shchipalkina N.V., Pekov I.V., Koshlyakova N.N., Belakovskiy D.I., Zubkova N.V., Agakhanov A.A., Britvin S.N., Nazarova M.A. A new mineral cuprodobrovolskyite $Na_4Cu(SO_4)_3$ from the Tolbachik volcano (Kamchatka, Russia) and the relationships in the family of natural anhydrous Na-Cu sulfates // Mineralogical Magazine. – 2024 – V. 88, P. 49-60.

3. Siidra O.I., Nazarchuk E.V., Zaitsev A.N., Shilovskikh V.V. Majzlanite, $K_2Na(ZnNa)Ca(SO_4)_4$, a new anhydrous sulfate mineral with complex cation substitutions from Tolbachik volcano // Mineralogical Magazine. – 2020 – V. 84, P. 153-158.

ПЕРВЫЙ ПРИМЕР ШИРОКОГО ИЗОМОРФИЗМА S – SE В КИСЛОРОДНЫХ МИНЕРАЛАХ: РЯД ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ ЛИНАРИТ–МУНАКАТАИТ ИЗ ЗОНЫ ГИПЕРГЕНЕЗА ПАЛЕОФУМАРОЛ ГОРЫ 1004 (ВУЛКАНИЧЕСКИЙ МАССИВ ТОЛБАЧИК, КАМЧАТКА)

Стрельников М.В.[1,2] (*sva240319600@yandex.ru*),
Пеков И.В.[1] (*igorpekov@mail.ru*),
Зубкова Н.В.[1] (*n.v.zubkova@gmail.com*),
Япаскурт В.О.[1] (*yvo72@geol.msu.ru*),
Мусихин К.А.[1] (*ametrin2243@gmail.com*),
Гридчина В.М.[3] (*vasilisa.gridchina@gmail.com*)

[1] *Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва,*
[2] *МГРИ, г. Москва,*
[3] *НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва*

Аннотация: Впервые в природе зафиксирован полный ряд твёрдых растворов между природными оксосолями S и Se – от линарита без Se до мунакатаита с 1,4 атома на формулу (а.ф.) Se. Селен присутствует в этих минералах в основном в виде Se^{4+}, меньшей частью – в виде Se^{6+}. Установлена новая Cr-содержащая (до 0,22 а.ф. Cr^{6+}) разновидность мунакатаита.

Ключевые слова: *линарит, мунакатаит, изоморфизм, сера, селен, кристаллическая структура, КР-спектроскопия, зона гипергенеза вулканических фумарол, вулкан Толбачик, Камчатка*

Изоморфизм между S и Se в бескислородных минералах обычен и его можно назвать относительно хорошо изученным. В то же время, об изоморфизме между этими халькогенами в природных оксосолях известно очень мало. На сегодня единственным примером, позволяющим уверенно предположить существование полного твёрдого раствора между кислородными минералами S и Se, являются минералы серии линарит – мунакатаит $Pb_2Cu_2(Se^{4+}O_3)(SO_4)(OH)_4$ (см., например, [1,2]). Однако существование протяженного ряда твердых растворов между ними до настоящей работы только предполагалось.

В ходе изучения зоны гипергенеза палеофумарол Горы 1004 – моногенного вулкана, относящегося к вулканическому массиву Толбачик на Камчатке, нами обнаружены линарит и мунакатаит (рис. 1) с широко варьирующим химическим составом. Они находятся в кавернах базальтового шлака в ассоциации друг с другом, а также с хризоколлой, атакамитом, англезитом, церусситом, брошантитом и реликтовыми эксгаляционными теноритом и гематитом. Для линарита наиболее характерны друзы призматических кристаллов, достигающих 1 см, синего цвета. Мунакатаит образует пучки расщеплённых игольчатых кристаллов голубого, изредка зелёного цвета, размер которых достигает 2 мм.

Методом энергодисперсионного электронно-зондового анализа (сканирующий электронный микроскоп Jeol JSM IT-500) установлено, что содержание SO_3 в минералах серии линарит – мунакатаит здесь варьирует от 6,0 до 20,0 мас.%, что отвечает диапазону 0,60–2,01 атома на формулу (ниже – а.ф.) S, а SeO_2 – от 0,00 до 18,7 мас.% (0,00–1,41 а.ф. Se) [рис. 1]. Также обнаружена ранее неизвестная Cr-содержащая разновидность мунакатаита (именно она имеет зелёный цвет), содержащая –от 0,00 до 2,7 мас.% CrO_3 (0–0,22 а.ф. Cr).

Согласно КР-спектроскопии (EnSpectr Green), селен в изученных минералах ряда линарит–мунакатаит находится в двух валентных состояниях: Se^{4+} [преобладающее; интенсивная линия на 790 см$^{-1}$ – ν_3 $(Se^{4+}O_3)^{2-}$] и Se^{6+} [второстепенное; слабоинтенсивная линия на 825 см$^{-1}$ – ν_1 $(Se^{6+}O_4)^{2-}$]. Исключение составляет мунакатаит с 1,1–1,4 а.ф. Se, в КР-спектрах которого с увеличением содержания Se интенсивность линии на 825 см$^{-1}$ сильно возрастает и в кристаллах с 1,35–1,40 а.ф. Se превышает интенсивность линии на 790 см$^{-1}$.

Методом рентгеноструктурного анализа (дифрактометр XcaliburS, Mo*K*α-излучение) изучен монокристалл мунакатаита, содержащий 1,06 а.ф. Se. Параметры его моноклинной элементарной ячейки: a = 9.764(3), b = 5.6585(18), c = 9.266(3) Å, β = 102.53(4)°, V = 499.8(3) Å^3, пространственная группа $P2_1/m$; $R1$ = 0.0983. В его кристаллической структуре выделяются две неэквивалентные позиции T. В позицию $T2$, возглавляемую Se^{4+}, входит 0,08 а.ф. S, а в позицию $T1$, возглавляемую S, – 0,14 а.ф. Se^{6+} в тетраэдрической координации, что соответствует данным КР-спектроскопии. Структурная формула этого кристалла такова: $Pb_2Cu_2{}^{T1}[(S_{0.86}Se^{6+}{}_{0.14})O_4]^{T2}[(Se^{4+}O_3)_{0.92}(SO_4)_{0.08}](OH)_4$ (Z = 2).

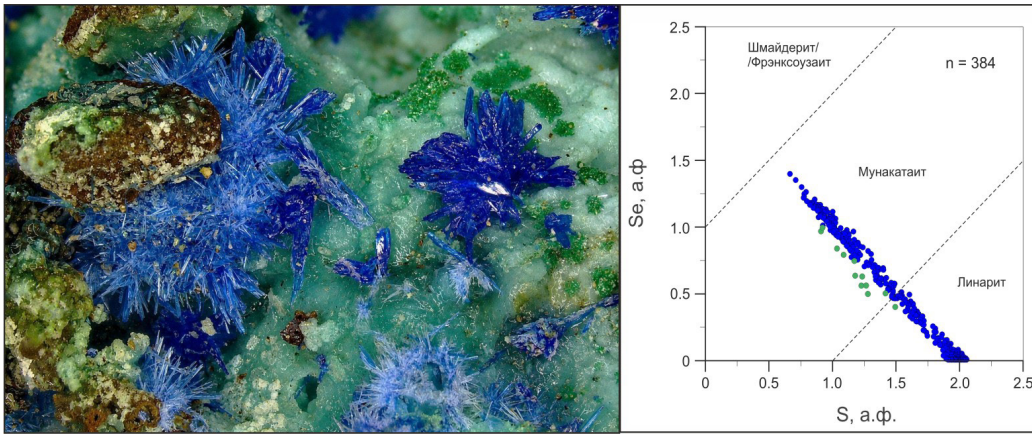


Рисунок 1. Слева – друзы призматических кристаллов линарита (синий), вместе с пучками игольчатых кристаллов мунакатаита (голубой) нарастающие на хризоколлу (бледно-зелёная) и брошантит (насыщенно зелёный). Справа – соотношение S и Se в минералах серии линарит – мунакатаит из зоны гипергенеза палеофумарол Горы 1004, выраженное в атомах на формулу (а.ф.), отвечающую Z = 2. Зелёным цветом отмечены анализы, где Cr > 0,5 мас.% CrO_3.

Между линаритом и мунакатаитом в зоне гипергенеза палеофумарол Горы 1004 реализуется полный ряд твёрдых растворов. Это первый пример полного ряда между кислородными минералами S и Se. Основной валентной формой селена в этих минералах является Se^{4+}, однако, согласно КР-спектроскопии, некоторая часть его находится в состоянии Se^{6+}. В мунакатите, содержащем от 1,1 до 1,4 а.ф. Se, пропорционально общей концентрации этого компонента возрастает содержание Se^{6+}. Это вкупе с результатами рентгеноструктурного анализа позволяет предположить, что в минералах структурного типа линарита после того как позиция *T*2 окажется нацело заполненной Se^{4+}, селен начинает входить в S-доминантную позицию *T*1, причем этот тетраэдр $(S^{6+}O_4)^{2-}$, в отличие от тетраэдра ($T2O_4$), преимущественно замещается на тетраэдрический же анион $(Se^{6+}O_4)^{2-}$. Помимо этого, нами впервые обнаружена Cr-содержащая (0,22 а.ф. Cr) разновидность мунакатаита, где тетраэдр (CrO_4), очевидно, замещает тетраэдр (SO_4).

Исследования выполнены при поддержке РНФ, проект № 25-17-00005 (М.В.С., И.В.П., Н.В.З., К.А.М., В.М.Г.)

Список литературы:

1. Бадьянова Л. В., Касаткин А. В., Чуканов Н. В., Шкода Р., Ханин Д. А. Мунакатаит: первая находка на территории Российской Федерации // Новые данные о минералах. – 2021 – Т. 55, № 2 – С. 51–55.
2. Sejkora J., Černý P., Černý P. The occurrence of rare selenate, munakataite, at mine dump of the Lill mine, Příbram (Czech Republic) // Bulletin Mineralogie Petrologie. – 2010 – Т. 18, № 2 – С. 87–90.

K-Ba-Fe-ТИТАНАТЫ В ПОРОДАХ ТОМТОРСКОГО МАССИВА, РЕСПУБЛИКА САХА (ЯКУТИЯ)

Шарыгин В. В.[1] (*sharygin@igm.nsc.ru*),
Лазарева Е. В.[1] (*lazareva@igm.nsc.ru*),
Ращенко С. В.[1] (*rashchenko@igm.nsc.ru*),
Белякова А. Ю.[1] (*abelyakova@igm.nsc.ru*),
Xian H.[2] (*xianhaiyang@gig.ac.cn*),
Нигматулина Е. Н.[1] (*helena@igm.nsc.ru*),
Жмодик С. М.[1] (*zhmodik@igm.nsc.ru*)

[1] *Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия*
[2] *Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, China*

Аннотация: Сделан обзор по K-Ba-Fe(V)-титанатам в гипергенных и магматических породах массива Томтор. Выявлены минералы групп кричтонита и прайдерита.

Ключевые слова: *группа кричтонита, группа прайдерита, Ba-аналог кричтонита, генримейерит, $Ba(Ti_6Fe^{3+}_2)O_{19}$, маннардит, $KTi_7V^{3+}O_{16}$, $K_2Ti_7Fe^{2+}O_{16}$*

Томторский щелочно-карбонатитовый массив располагается в арктической зоне Сибири, Республика Саха (Якутия) и с ним связано крупное месторождение богатых Sc-Y-Nb-REE руд (три участка: Буранный, Северный и Южный), которое располагается над карбонатитовым ядром массива [1-4]. Редкометалльные руды и нижележащие сидеритовые породы, в основном рассматриваются как продукты выветривания карбонатитов и силикатных пород массива. В целом, массив Томтор является погребенной интрузией: сам массив и руды перекрываются пермскими, юрскими и четвертичными рыхлыми отложениями. Все это, не способствовало обширным минералого-петрографическим исследованиям, поскольку основным источником образцов являлся керн скважин, которые бурились в пределах месторождения и большинство из них не достигало интрузивных пород. Данная работа посвящена K-Ba-Fe(V)-титанатам, которые были обнаружены как в гипергенных (руды и сопутствующие породы), так и в магматических породах Томтора.

Изначально K-Ba-Fe-титанаты были выявлены в породах сидеритового горизонта (скв. 308, гл. 74-75 м) на участке Южный месторождения Томтор [4]. Позднее они были обнаружены в Sc-Y-Nb-REE рудах с гётитом (маннардит, скв. 326, гл. 28.8 м, участок Южный), а затем и в магматических породах (K- и Ba-минералы группы прайдерита: доломитовые карбонатиты, скв. Г2, гл. 216.5–217 м, и ийолиты, скв. 21, гл. 34.5 м) [1].

Главными компонентами сидерит-гидрослюдистых пород являются сидерит, гидрослюда (Al-глауконит – иллит ?), каолинит и горсейксит (группа плюмбогуммита). Второстепенные и акцессорные минералы представлены рутилом, анатазом, Ba-Fe-титанатами («томторит», «уджаит») цирконом,

монацитом-(Ce), фторапатитом, брэдлеитом, ханнешитом, флогопитом, сульфидами (пирит, сфалерит, галенит), рабдофаном-(Ce), хромитом, баритом и кальцитом. Ba-Fe-титанаты, хромит, рутил и циркон, скорее всего, представляют собой реликты окружающих интрузивных пород массива Томтор [2-4].

Доминирующий Ba-Fe-титанат («томторит») является представителем группы кричтонита [5], а второй титанат («уджаит») относится к группе прайдерита надгруппы голландита [7]. Оба минерала изучены достаточно хорошо (структура, химический состав, Раман, EELS). Они образуют хорошо ограненные зерна (до 50-200 μm), часто срастания между собой (рис. 1). Их взаимоотношения указывают на то, что прайдеритовая фаза более ранняя, чем кричтонитовая фаза. При этом зерна «уджаита» частично замещены сидеритом, тогда как зерна «томторита» лишь немного резорбированы сидеритом и гидрослюдой [4].

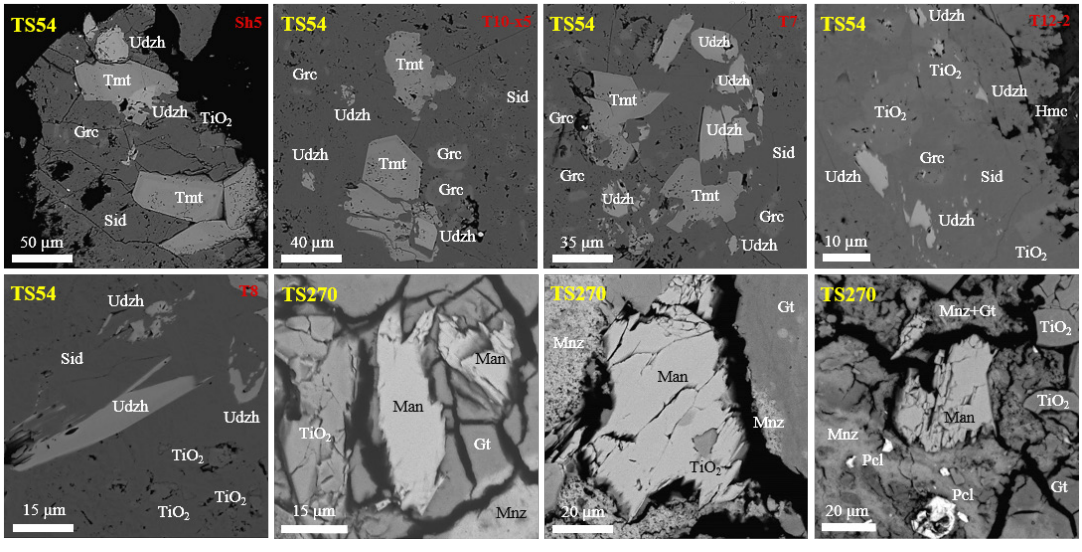


Рис. 1. K-Ba-Fe-и Ba-V-титанаты в гипергенных породах массива Томтор: в гидрослюдисто-сидеритовой породе (TS54) и в гётитовой породе (TS270), BSE изображения. Условные обозначения: Sid – сидерит, Mnz – монацит-(Ce), Tmt – «томторит», группа кричтонита, Udzh – «уджаит», Ba-Fe^{3+}-титанат, группа прайдерита, Grc – горсейксит, группа плюмбогуммита, Hm – гидрослюда; TiO_2 – полиморф TiO_2, Man – маннардит, Gt – гётит, Pcl – минерал группы пирохлора.

«Томторит» имеет идеальную формулу $BaMnFe^{2+}{}_2(Fe^{3+}{}_4Ti_2)Ti_{12}O_{38}$ (пр. группа *R*-3, параметры ячейки: *a* = 10.447(2) Å, *c* = 20.882(4) Å; *V* = 1973.8(7) Å^3; *Z* = 3) и по составу является Ba-аналогом кричтонита $SrMnFe^{2+}{}_2(Fe^{3+}{}_4Ti_2)Ti_{12}O_{38}$. Расшифровка кристаллической структуры показала наличие шести доминантных позиций *M*0-*M*5 и четырех позиций *X*1-*X*4, которые заполнены лишь на 10%. Скорее всего, между *M* и *X* позициями происходит обмен катионами, что приводит к появлению вакансий в *M* позициях, прежде всего в *M*2. Состав «томторита» существенно варьирует, особенно в пределах соседствующих *M*0,

*M*2 и *M*3 позиций. Минерал содержит (в мас.%, n=281, WDS): BaO - 3.7-4.4, TiO_2 - 58.3-62.4, FeO_{tot} - 20.5-24.6, ZrO_2 – 0.4-2.4, Nb_2O_5 – 1.504.5, Cr_2O_3 и V_2O_3 – 0.2-1.5, ZnO – 0.1-0.9, SrO и PbO – 0.1-0.7, Na_2O – 0.3-0.6, K_2O – 0.2-1.0. Иногда в кристаллах фиксируется зональность с чередованием зон, обогащенных Nb, Nb+K, K, K-Fe-Nb и Cr. Концентрации гипотетических K- и Na-миналов могут достигать 25-30 мол. % (каждый), а эмпирический состав «томторита» близок к $(Ba_{0.5}Na_{0.25}K_{0.25})Mn^{2+}(Fe^{2+}_{1.5}Fe^{3+}_{0.5})(Fe^{3+}_{4}Ti_2)Ti_{12}O_{38}$ (табл. 1).

«Уджаит» имеет идеальную формулу $Ba(Ti_6Fe^{3+}_2)O_{19}$ (пр. группа *I*4/*m*, параметры ячейки: *a* =10.174(2) Å, *c* = 2.967(2) Å, *V* = 307.1(2) Å^3, *Z* = 2) и является Fe^{3+}-аналогом генримейерита $Ba(Fe^{2+}Ti_7)O_{16}$ и Ba-аналогом прайдерита $K(Ti_7Fe^{3+})O_{16}$ [7, 10]. Его структура соответствует голландитовому типу, где двойные цепочки $(Ti,Fe)O_6$-октаэдров вдоль оси с образуют каналы, а позиция внутриканального катиона частично вакантна. Иногда видна зональность: центр обогащен Cr, а край – K. Вариации состава (в мас.%, n=62, WDS): TiO_2 – 61.9-67.9, Nb_2O_5 – 0.0-0.4, Cr_2O_3 – 0.4-4.5, V_2O_3 – 0.4-2.2, FeO_t – 11.6-14.6, BaO – 12.0-17.5, PbO – 0.0-0.6, K_2O – 0.6-2.5 (табл. 1). В миналах (в мол.%): $Ba(Fe^{3+}_2Ti_6)O_{19}$ – 51.8-70.0, прайдерит – 10.3-39.8, генримейерит – 0.0-9.9, редледжеит – 1.2-20.7, маннардит – 1.4-9.9.

Для этих двух титанатов были проведены TEM-EELS исследования с целью выяснения соотношения Fe^{2+} и Fe^{3+} в структурах по методу [9]. Для «томторита» максимальное значение Fe^{3+}/Fe_{tot} составляют 0.33, а для «уджаита» - 0.53. Эти данные сильно отличаются от значений для эмпирических формул этих минералов (0.72 и 0.86, соответственно). Такие различия свидетельствуют о том, что нужно искать новый метод для определения Fe^{3+}/Fe_{tot} по спектрам EELS в таких сложных и многокомпонентных структурах, коими являются изученные титанаты. Согласно EELS в «томторите» марганец представлен в виде Mn^{2+}.

Маннардит $BaTi_6V^{3+}_2O_{16}$ был выявлен в тонкослоистых рудах с большим количеством чёрных прослоев. Породы содержат минералы групп плюмбогуммита и пирохлора, ажурные биоморфные агрегаты монацита-(Ce), Ti-Fe-V-Nb-Ba агрегат (гётит), TiO_2 полиморф (брукит) и сидерит. Маннардит приурочен к гётитовым прослоям и образует удлиненные кристаллы. Вариации состава (в мас.%, n=37, WDS+EDS): TiO_2 – 61.0-63.2, Nb_2O_5 – 0.5-2.3, Cr_2O_3 – 0.2-0.9, V_2O_3 – 13.3-16.1, FeO_t – 1.9-3.0, BaO – 15.4-17.3, K_2O – 1.1-1.8 (табл. 1). В миналах (в мол.%): маннардит – 63-78, прайдерит – 17-26, генримейерит – 1-24, редледжеит – 1-4.

В доломитовых карбонатитах, которые образуют отдельные фрагменты в карбонатитовых брекчиях, также был обнаружен минерал группы прайдерита [1, 6]. Он, скорее всего, является первичным минералом карбонатита (содержит включения доломита, рис. 2), но пока выявлен только в анкеритовой зоне (замещение доломита анкеритом). K-Fe-титанат образует удлинённые кристаллы (размер – до 50 μm, рис. 2) и срастания с анатазом или другим полиморфом TiO_2. По своему составу этот минерал существенно отличается от других K-Fe-титанатов - прайдерита $KTi_7Fe^{3+}O_{16}$ и джеппеита $K_2Ti_6O_{13}$. Рентгеновские исследования для него пока не проводились. Рамановские спектры

однозначно показали, что этот минерал следует относить к группе прайдерита. Вариации состава (в мас.%, n=94, WDS+EDS): TiO_2 – 73.0-77.8, Nb_2O_5 – 0.0-3.0, Cr_2O_3 – 0.0-0.1, V_2O_3 – 1.9-8.7, FeO_t – 6.2-11.0, CaO – 0.5-1.2, BaO – 0.0-0.8, K_2O – 8.6-9.5 (табл. 1).

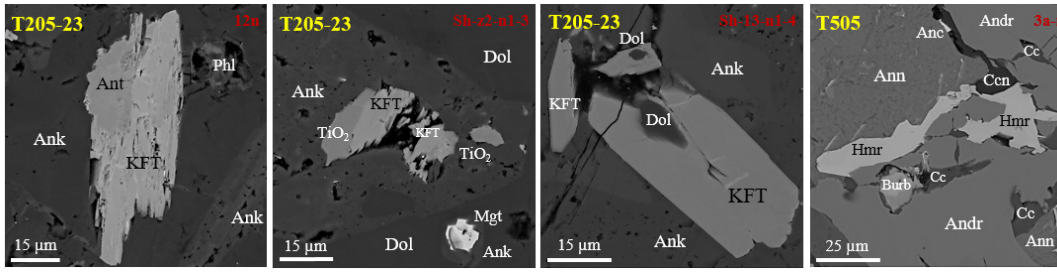


Рис. 2. Минералы группы прайдерита в доломитовом карбонатите (T205-23) и в ийолите (T505) массива Томтор, BSE изображения.

Условные обозначения: KFT – K-Fe-титанат, группа прайдерита, Hmr – генримейерит, Ant – анатаз, TiO_2 – неидентифицированный полиморф TiO_2, Ank – анкерит, Dol – доломит, Phl – флогопит, Mgt – магнетит, Ann – аннит, Cc – кальцит, Andr – Ti-содержащий андрадит, Ccn – (SO_4)-содержащий минерал группы канкринита, Burb – бурбанкит, Anc – анкилит-(Ce).

Таблица 1. Химический состав (в мас.%) минералов групп кричтонита и прайдерита из пород массива Томтор.

Mineral	*n*	TiO_2	ZrO_2	Nb_2O_5	Cr_2O_3	V_2O_3	Fe_2O_3*cal*	FeO*cal*	MnO	MgO	ZnO	CaO	BaO	SrO	PbO	Na_2O	K_2O	Сумма
Tmt	*281*	60.38	0.99	2.61	0.41	0.45	18.07	6.27	4.60	0.11	0.40	0.12	3.97	0.26	0.29	0.45	0.47	99.84
Udzh	*62*	62.61	0.00	0.15	2.54	1.14	12.80	1.91	0.01	0.00	0.02	0.04	17.01	0.02	0.22	0.09	1.56	100.10
Man	*38*	62.28	0.00	1.14	0.47	15.08	1.79	0.88	0.00	0.00	0.00	0.00	16.45	0.00	0.04	0.00	1.45	99.59
Hmr	*14*	64.71	0.00	0.00	0.01	1.41	8.39	5.32	0.00	0.00	0.00	0.49	18.95	0.00	0.00	0.02	0.34	99.65
KFT	*94*	75.49	0.00	1.33	0.01	4.19	4.44	4.64	0.04	0.00	0.00	0.94	0.19	0.00	0.00	0.00	9.25	100.52

n - число анализов, условные обозначения смотри Рис. 1-2. Fe_2O_3 и FeO рассчитаны по балансу зарядов.

Эмпирическая формула K-Fe-титаната из карбонатита – $(K_{1.39}Ca_{0.12}Ba_{0.01})(Ti_{6.68}Fe^{2+}_{0.46}V^{3+}_{0.40}Fe^{3+}_{0.39}Nb_{0.07})O_{16}$ и соответствует составу, промежуточному между $KTi_7V^{3+}O_{16}$ (40), $KTi_7Fe^{3+}O_{16}$ (23), $K_2Ti_7Fe^{2+}O_{16}$ (24) и $(Ca,Ba)(Ti_6Fe^{3+}_2)O_{16}$ (13 мол.%). Следует отметить, что минералы состава $KTi_7V^{3+}O_{16}$ и $K_2Ti_7Fe^{2+}O_{16}$ ранее не отмечались в природе, а гипотетические составы с внутритоннельным заполнением равным двум позициям вообще не рассматривались в классификации надгруппы голландита [7], хотя такие соединения известны в материаловедении. Изучение нового минерала, коперникита $K(Ti_7Cr^{3+})O_{16}$, показало, что заполнение тоннеля до 1.5 позиций вполне возможно [8].

Среди силикатных интрузивных пород массива Томтор, Ba-Fe-титанат был обнаружен в ийолитах (нефелин + пироксен ± флогопит). Он был выявлен в ассоциации с Ti-андрадитом, аннитом, карбонатами (кальцит, анкилит-(Ce),

бурбанкит), минералом группы канкринита (рис. 2). Вариации состава (в мас.%, n=14, EDS): TiO_2 – 62.3-67.7, V_2O_3 – 0.8-2.2, FeO_t – 11.3-14.0, CaO – 0.2-1.0, BaO – 18.2-19.4, K_2O – 0.2-0.5 (табл. 1). Эмпирическая формула – $(Ba_{0.98}Ca_{0.07}K_{0.06})(Ti_{6.43}Fe^{3+}_{0.83}Fe^{2+}_{0.59}V^{3+}_{0.15})O_{16}$. Этот минерал следует относить к генримейериту, поскольку $BaTi_7Fe^{2+}O_{16}$ (53) преобладает над $BaTi_6Fe^{3+}_2O_{16}$ (37 мол.%).

Изучение K-Ba-Fe-V-титанатов на Томторском массиве показало, что эти минералы из интрузивных пород несмотря на разницу по составу вполне могли оказаться в Sc-Y-Nb-REE рудах в качестве реликтовых фаз. Следует также отметить, что наши исследования способствовали выявлению трех потенциально новых минералов: «уджаита» $Ba(Ti_6Fe^{3+}_2)O_{19}$, «томторита» $BaMnFe^{2+}_2(Fe^{3+}_4Ti_2)Ti_{12}O_{38}$ и фазы $KTi_7V^{3+}O_{16}$. Регистрации первых двух минералов задерживается из-за неопределенного соотношения Fe^{2+} и Fe^{3+}.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 23-63-00017, сканирующая микроскопия, микрозонд) и Госзадания ИГМ СО РАН (FWZN-2026-0017, -0008, -0016) (Раман, рентген).

Список литературы:

1. Жмодик С. М., Лазарева Е. В., Пономарчук В. А. и др. Карбонатитовые брекчии Томторского щелочного массива: структурные, минералого-геохимические и (C, O, Sr)-изотопные особенности // Геология и геофизика. – 2026 - Т. 67, №1. - С. 205-230.

2. Лазарева Е. В., Жмодик С. М., Добрецов Н. Л. и др. Главные рудообразующие минералы аномально богатых руд месторождения Томтор (Арктическая Сибирь) // Геология и Геофизика. – 2015 - Т. 56, № 6. - С. 1080-1115.

3. Лазарева Е. В., Жмодик С. М., Толстов А. В. и др. Строение рудного горизонта участка Южный месторождения Томтор, Арктическая Сибирь // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2025 - № 4а (64). - С. 22-34.

4. Лазарева Е. В., Шарыгин В. В., Ращенко С. В. и др. Кристаллические включения в Ba-Fe-титанатах и цирконе сидеритовых пород массива Томтор, Республика Саха (Якутия): ключ к пониманию их генезиса // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. – 2025 - № 22. - С. 135-145.

5. Расцветаева Р.К. Кричтонит и его семейство: история открытия двух новых минералов // Природа. – 2020 - № 8. - С. 39-47.

6. Шарыгин В. В., Лазарева Е. В., Жмодик С. М. и др. Акцессорные фазы в доломитовых карбонатитах Томторского щелочно-карбонатитового плутона, Арктическая Сибирь // «Глубинный магматизм, его источники и плюмы». – ИГМ СО РАН, г. Новосибирск. – 2026. - С. 273-275.

7. Biagioni C., Capalbo C., Pasero M. Nomenclature tunings in the hollandite supergroup // European Journal of Mineralogy. – 2013 – V. 25, No. 1. – P. 85-90.

8. Galuskin E., Muszyński A., Kusz J. et al. Kopernikite, $K(Ti_7Cr^{3+})O_{16}$ – a new priderite group mineral from the Morasko IAB-MG iron meteorite (Poland) // Mineral. Magazine. – 2026 - V. 90, No. 3. - P. 625-634.

9. Li S., Wen K., Yang Y. et al. Quantification of ferric iron content in minerals via the

STEM-EELS-mapping method // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. – 2025 - V. 40. - P. 1954-1963.

10. Mitchell R. H., Yakovenchuk V. N., Chakhmouradian A. R. et al. Henrymeyerite, a new hollandite-type Ba-Fe titanate from the Kovdor Complex, Russia // Canadian Mineralogist. – 2000 - V. 38. - P. 617-626.

Минералогический музей
имени А.Е. Ферсмана РАН

310 лет

РУДНАЯ МИНЕРАЛОГИЯ



30 сентября 2026 года

УДК 549.612:38.01.77

КАССИТЕРИТ КАК ИНДИКАТОР ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ОЛОВОНОСНЫХ РУДНО-МАГМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СИХОТЭ-АЛИНСКОГО ОРОГЕННОГО ПОЯСА

Гореликова Н.В.[1] (*gorelikova N.V.- nv-gorelikova@ya.ru*[1]),
Чижова И.А.[1] (*i.chizhova2014@yandex.ru*),
Pawlowsky-Glahn V.[2], **Barcelo–Vidal C.**[2]

[1] *ИГЕМ РАН, Москва,*
[2]*University Girona, Barcelona, Испания*

Аннотация. В работе представлены результаты изучения касситеритов оловянных месторождений орогенного Сихотэ-Алинского пояса Дальнего Востока. На основе формационного, статистического и логико-информационного анализов установлено, что надежным индикатором оловянного оруденения является парагенезис элементов-примесей в касситерите, который определяется условиями формирования оловянных руд. Нами разработан новый метод оценки промышленного потенциала оловоносных месторождений по геохимическим ассоциациям основного минерала – касситерита, который характеризуется сложным переменным составом элементов-примесей. Установлено, что универсальным индикатором оруденения могут быть элементы-примеси в касситерите и их сочетания, отражающие петрогеохимические особенности формирующихся в изменяющемся геодинамическом режиме рудоносных интрузий. Выявлено, что наиболее информативными являются не сами содержания отдельных элементов, а их закономерные сочетания, т.е их парагенезис, которые могут быть использованы как в рудно-формационном анализе, так и в решении задач прикладного характера. С помощью математических методов проведена геодинамическая типизация рудных районов Сихотэ-Алиня с использованием геодинамической модели А.И. Ханчука.

Ключевые слова: *парагенезис микроэлементов, Сихотэ-Алинь, трансформная окраина, надсубдукционная окраина, слэб-виндоу, орогенез, многомерная статистика, метод Эйчисона, логико-информационный анализ*

Большое значение при оценке рудных зон приобретают новые методы прогнозирования и оценки промышленных объектов. Понятие о парагенезисе элементов введено впервые В.И.Вернадским для различных пород, обусловленное единым процессом их образования. Парагенезис элементов в минералах разного состава детально рассмотрен А.Е.Ферсманом [1]: «Совершенно аналогично минералам мы можем анализировать и парагенезис отдельных элементов в химическом процессе, где мы также можем устанавливать ряд важнейших законов совместного нахождения элементов, их хронологических, пространственных и «генетических» взаимоотношений». Геохимические данные обладают высокой информативностью при реконструкции условий формирования и эволюции рудно-магматических систем. Исследование содер-

жания и распределения элементов-примесей в минералах позволяет решать такие задачи, как изучение закономерностей эволюции магматических серий и выявление особенностей их формирования [2]. При реконструкции геодинамических обстановок формирования рудно-магматических систем одним из важных подходов является моделирование геохимических процессов с помощью методов многомерной статистики. Нами поставлена задача – выяснить, как отражается геодинамическая обстановка формирования рудных зон на составе микроэлементов касситеритов из месторождений, образованных в обстановке трансформной окраины и связанных с надсубдукционным магматизмом.

Дальний Восток России – один из оловоносных регионов мира. Здесь выявлено несколько рудных районов, в пяти из которых (Кавалеровском, Комсомольском, Баджальском, Дальнегорском и Арминском) известны крупные промышленные месторождения олова. Сихотэ-Алинь представляет собой металлогеническую оловоносную провинцию с центрами орогенного и посторогенного гранитоидного магматизма мезо-кайнозойского возраста. В мел-палеоценовой геодинамической эволюции указанной территории выделяются несколько этапов: 1) ранний мел-ранний сеноман (130-93 Ма) – *трансформная окраина (ороген)*, 2) поздний сеноман-маастрихт (93-65 Ма) - *надсубдукционная окраина*, 3) палеоцен (65-57 Ма) – *переходный режим (смена субдукции на режим трансформной окраины)* [1]. Изотопно-геохимические данные указывают, что источники гранитного магматизма и рудоносных флюидов в пределах этого региона имеют гетерогенное происхождение, и связаны, с одной стороны, с субдукцией, а с другой – с внедрением астеносферных диапиров в разрывы субдуцированной литосферы (слэб-виндоу) [3].

Объектами авторского исследования явились рудные зоны оловянных месторождений Комсомольского, Кавалеровского, Баджальского, Хингано-Олонойского, Дальнегорского и Арминского районов - Фестивальное, Перевальное в Комсомольском рудном районе (рис. 1), Хинганское в Хингано-Олонойском районе Хабаровского края, Высокогорское, Арсеньевское, Хрустальное, Левицкое, Дубровское, Синанчинское в Кавалеровском районе, Южное, Смирновское, Красногорское в Дальнегорском, Тигриное, Забытое в Арминском районе Приморья. Для сравнения привлечены данные по грейзеновым месторождениям Иультин, Валькумей и Светлое на Чукотке.

Исследование элементов-примесей касситерита проводилось с помощью количественного спектрального и микроспектрального анализов (Дальневосточный геологический институт ДВО РАН), чувствительность которых составляла 10^{-4}-10^{-3}. Кроме того, точность результатов проверялась рентгеноспектральным микроанализом (JXA-8200/GEOL) и рентгенофлюоресцентным анализом на вакуумном спектрометре последовательного действия (с дисперсией по длине волны), модель Axios mAX производства компании PANalytical (Нидерланды 2012 г.). Математическая идентификация месторождений осуществлялась разными методами – многомерной статистики (Jirona University, Spain) и логико-информационного анализа (Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН).

Метод Эйчисона В настоящей работе мы используем методологический подход, который является комбинацией классического дискриминантного анализа с геометрией Эйчисона в симплексе многомерного пространства. Основная идея метода – охарактеризовать структуру выборки в векторном многомерном пространстве [4].

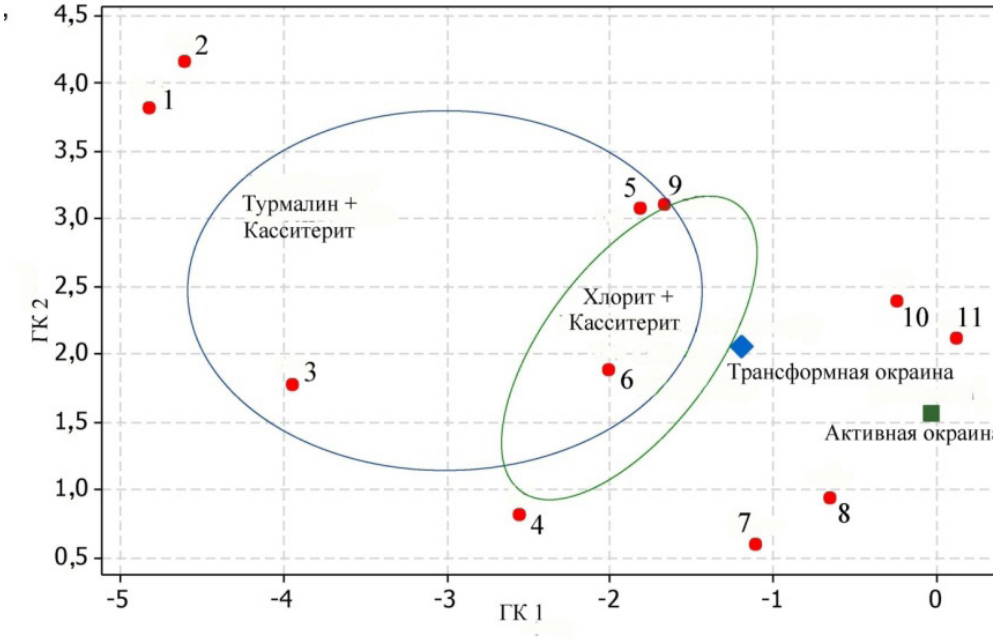


Рисунок 1. Точечный график в координатах главных компонент (ГК1, ГК2) расположения оловянных месторождений (трансформная окраина и активная окраина). Условные обозначения. Месторождения: 1 – Забытое, 2 – Тигриное, 3 – Светлое, 4 – Иультин, 5 –Валькумей, 6 – Южное, 7 – Красногорское, 8 –Дубровское, 9 – Смирновское, 10 – Хрустальное, 11 – Левицкое.

Второй метод, который нами использован в работе, логико-информационный анализ данных, разработанный в ИГЕМ РАН И.А.Чижовой [5]. Суть метода состоит в анализе эталонных групп объектов (проб), их описании и оценке степени их сходства и различия. Это метод отнесения объекта к одной из изучаемых групп на основе анализа информативности интервалов-индикаторов значений признаков.

Можно выделить три основных этапа логико-информационного моделирования: определение интервалов значений признаков (интервалов-индикаторов), которые характерны для разных групп объектов; количественная оценка информативности каждого признака; построение решающего правила: на основе весов признаков объект относят к той или иной группе. В итоге получается не просто теоретическая модель, а инструмент, который можно «подать» на вход новым данным для быстрой и обоснованной классификации.

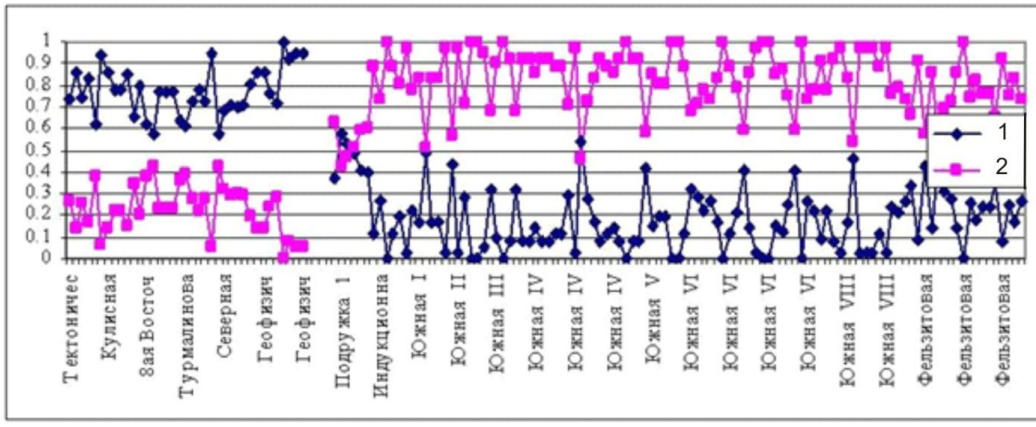


Рисунок 2. Идентификация оловянных месторождений на основе логико-информационного анализа.

Условные обозначения:
1 – трансформная окраина: м-ия (зоны) Высокогорское (Тектоническая, Кулисная, 8-ая Восток), Арсеньевское (Турмалиновая), Перевальное (Северная), Фестивальное (Геофизическая);
2 – надсубдукционная окраина: м-ие (зоны) Арсеньевское (Подружка, Индукционная, Южная, Фельзитовая).
По горизонтальной оси номера проб (подписано название зоны у каждой 5-ой пробы). По вертикальной оси информационный вес пробы (оценка принадлежности группам 1 и 2).

Источник финансирования. *Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания ИГЕМ РАН "Кристаллохимические особенности, химический состав минералов и их ассоциаций как генетические индикаторы эндогенных и экзогенных процессов" № 124022400142-2, аналитические исследования проведены в ЦКП "ИГЕМ АНАЛИТИКА".*

Благодарности. Авторы выражают искреннюю благодарность академику А. И. Ханчуку за ценные советы и указания и помощь в подготовке рукописи к изданию.

Список литературы

1. Ферсман А.Е. Избранные труды : в 4 т. – М. : Изд-во АН СССР, 1953. – Т. 2. – 768 с.
2. Щека С.А., Гореликова Н.В., Вржосек А.А., Наумова В.В. Типоморфизм минералов как поисковый критерий . – Новые данные по минералогии Дальнего Востока. – Владивосток, 1987. – С. 9–33.
3. Ханчук А.И. Палеогеодинамический анализ формирования рудных месторождений Дальнего Востока России . – Рудные месторождения континентальных окраин. Вып. 1. – Владивосток : Дальнаука, 2000.
4. Aitchison J. The statistical analysis of compositional data. – London : Chapman &

Hall, 1986. – 2nd ed. 2003. – Caldwell, NJ : The Blackburn Press.

5. Чижова И.А. Логико-информационное моделирование при прогнозно-металлогеническом анализе перспективных площадей . – Современные проблемы рудной геологии, минералогии и геохимии. – М. : ИГЕМ РАН, 2010. – С. 59–84.

МИНЕРАЛЬНЫЕ АССОЦИАЦИИ ПРОЯВЛЕНИЙ САМОРОДНОГО ЖЕЛЕЗА В ТРАППОВЫХ МАССИВАХ СИБИРИ

Гриценко Ю.Д.[1,2] (*ygritsenko@rambler.ru*), **Михайлов А.С**[1], **Пащенко А.К**[1], **Верещагин О.С.**[3], **Хмельницкая М.О.**[3]

[1] *МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва,* [2]*Минмузей РАН, г. Москва,*
[3]*СПбГУ, г. Санкт-Петербург*

Аннотация: Самородное железо и ассоциирующие с ним минералы карбиды, фосфиды, интерметаллиды являются весьма редкими минералами в земной коре, поскольку требуют специфичных восстановительных обстановок, нехарактерных для приповерхностных земных условий. В России крупные проявления самородного железа приурочены к трапповым интрузивам Сибирской платформы. В работе подробно рассматриваются минералы этой экзотической ассоциации и их состав, затрагивается генезис самородного железа и ассоциирующих минералов. В ассоциациях с самородным железом установлены: самородные элементы (тэнит, медь, графит, висмут и свинец), интерметаллиды (тетратэнит, аваруит, соединение системы Ni-Sn, близкое к Ni_3Sn), карбиды (когенит и хаксонит), фосфид (шрейберзит), германид (ольгафранкит Ni3Ge), оксиды (ильменит, магнетит, титаномагнетит, герцинит, вюстит, рутил), сульфиды, арсениды и теллуриды (троилит, пентландит, кобальтпентландит, хизлевудит, халькопирит, кубанит, халькозин, борнит, макинавит, вейссит, орселит, сфалерит, никелин и сперрилит) .

Ключевые слова: *самородное железо, карбиды, фосфиды, сульфиды, траппы, Маймеченский массив, Джалтул, условия образования.*

Самородное железо является чрезвычайно редким в земных условиях минералом, ввиду специфических условий образования. Местонахождения крупных обособлений железа широко известны и изучаются в течение многих лет – например, остров Диско, Гренландия, где первые находки железа сделаны ещё в 1870 году. Самородное железо в породах Сибирских траппов, напротив, обнаружено достаточно недавно – первые данные о находках появились лишь ближе к середине XX века. Несмотря на годы исследований, до сих пор многое в вопросе образования самородного железа остаётся неясным.

В Минералогическом музее имени А.Е. Ферсмана РАН наиболее широко представлены образцы с Хунктукунского массива (7 образцов), переданных в дар В.В. Рябовым в 1983-1988 годах. Это наиболее представительные и крупные образцы самородного железа в музее, вес некоторых экземпляров достигает практически 100 кг. Образцы с Маймеченского интрузива представлены в собрании музея полевыми сборами авторов 2016 года (6 образцов), с Джалтульского массива – 5 образов (коллекции В.И. Степанова, И.А., Ткаченко, дар В.В. Ситникова и сборы авторов). С Хининдинского массива образцы в коллекции музея не представлены. Кроме того, в собрании музея находятся образцы самородного железа с type locality теллурического железа – острова Диско (Гренландия), а также включения самородного железа в базальтах из

провинции Bull (Германия). Присутствует и образец из скважины (интервал 1437-1442 м) с самородным железом в срастаниях с троилитом, магнетитом, рутилом герцинитом и ортоклазом из района апатитового месторождения Партомчорр (Хибины), описанный в работе Е.А. Борисовой, Т.И. Голованової и З.В. Шлюковой «Самородное железо из Хибинского массива», Известия Академии наук, 1989 [1]. Данное исследование проведено на образцах, собранных во время полевых работ на Маймеченском, Джалтульском и Хунгтукунском массивах, а также на образцах, любезно предоставленных коллегами из Санкт-Петербурга.

Интрузивы с выделениями самородного железа Сибирской платформы относятся к массивам Сибирской трапповой провинции, расположены в обрамлении Тунгусской синеклизы, образовались 251±1 млн лет [2-5]. Наиболее крупные выделения самородного железа установлены в Джалтульском, Маймеченском, Хунгтукунском, и Хининдинском массивах. Они представлены дифференцированными и слабо дифференцированными интрузивами, сложенными безоливиновыми, оливинсодержащими габбро-долеритами, вплоть до оливиновых и троктолитовых разностей [3-5]. Породообразующие минералы представлены клинопироксеном (клинофферросилитом, часто обогащенным магнием, авгитом и пижонитом), плагиоклазом (лабрадором и битовнитом) и оливином (от Fa_{45-50} до Fa_{80-100}).

Самородное железо образует интерстиционную вкрапленность, крупные округлые капли, губчатые образования и сливные массы (рис. 1). Губчатую форму самородков создает большая насыщенность пород округлыми амебовидными и сложными по форме выделениями железа. На границе с породой и с сульфидами железо обрамляется каймой магнетита. Общее содержание металлической фазы в желваках губчатой текстуры может достигать 70-80% объема. Наиболее крупные сегрегации железа достигают длинны 70 см.

Минералы, ассоциирующие с самородным железом, представлены самородными элементами, интерметаллидами, карбидами, германидом, фосфидом, сульфидами и их аналогами [6]. Самородные элементы представлены железом Fe, тэнитом (Fe,Ni), медью Cu, графитом C, висмутом Bi и свинцом Pb, интерметаллиды – тетратэнитом FeNi, аваруитом Ni_3Fe, соединением в системе Ni-Sn, близким к стехиометрии Ni_3Sn, карбиды – когенитом Fe_3C и хаксонитом $FeNi_{22}C_6$, германид – ольгафранкитом Ni_3Ge, фосфид – шрейберзитом Fe_3P. Сульфиды и их аналоги представлены троилитом FeS, пентландитом $(Ni,Fe)_9S_8$, кобальтпентландитом Co_9S_8, хизлевудитом Ni_3S_2, халькопиритом $CuFeS_2$, кубанитом $CuFe_2S_3$, халькозином Cu_2S, борнитом Cu_5FeS_4, макинавитом (Fe,Ni)S, вейсситом $Cu_{2-x}Te$, орселитом $Ni_{5-x}As_2$, сфалеритом ZnS, никелином NiAs и сперрилитом $PtAs_2$.

Наиболее распространенным бескислородным соеденением в ассоциации с самородным железом является когенит Fe_3C. Он повсеместно встречается в выделениях самородного железа, образуя агрегаты, похожие на эвтектические срастания, отдельные вростки и каймы вокруг капель железа (рис. 2 а), в некоторых его количество составляет 10-15 об. %. Обычно, содержание примесей в когените близко к содержанию их в ассоциирующем железе, и дости-

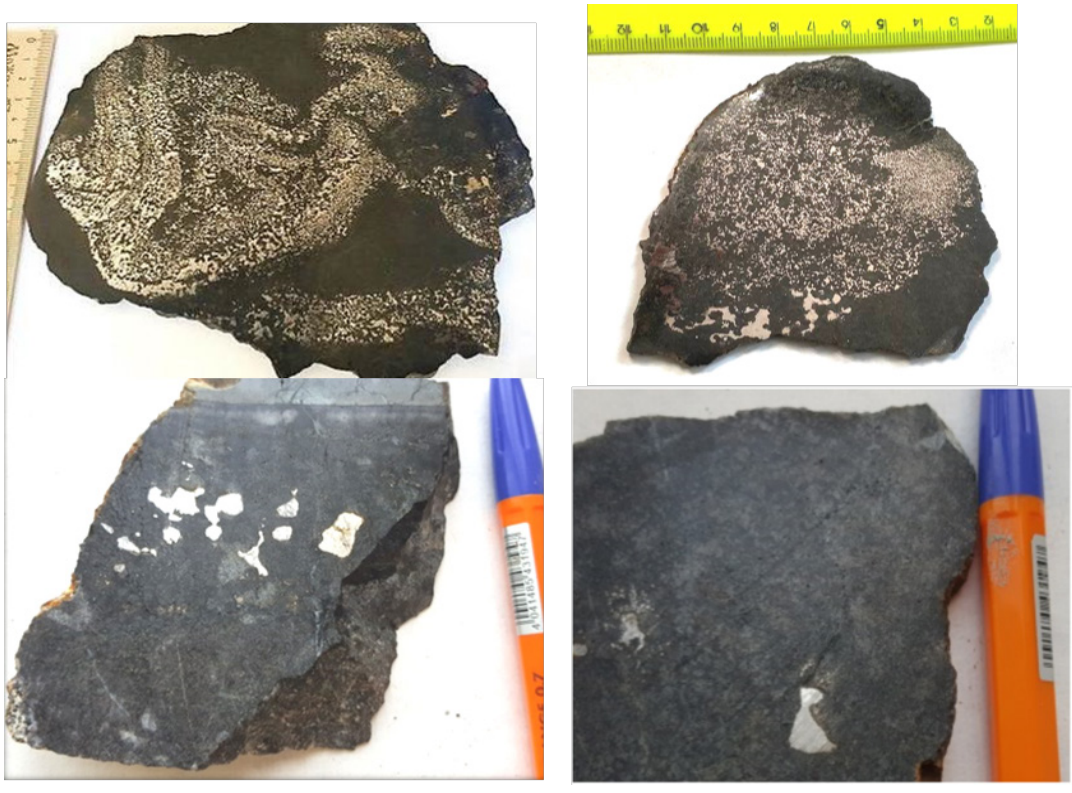


Рис. 1. Губчатые и каплевидные выделения самородного железа в габбро-долеритах Маймеченского и Джалтульского массивов.

гает 1.2 мас. % Co и 6 мас. % Ni.

Самородная медь наиболее характерна для Джалтульского массива, где она занимает более 1-3% рудных минералов, встречается как в самородном железе, так и обособлено от него, среди силикатов и сульфидов (рис. 2 б). В изученных образцах выделения меди можно разделить на несколько типов: эмульсионная вкрапленность в самородном железе; симплектитовые срастания с троилитом (наиболее распространённая форма выделения); крупные капли, часто совместно с троилитом; тонкие каймы по краям капель самородного железа. По данным микрозондоовго анализа, она содержит до 5.6 мас. % Fe, и до 1.5 мас. % Ni.

Хаксонит $FeNi_{22}C_6$ был обнаружен нами впервые в земных коровых породах в образце из Джалтульского интрузива [6]. Ранее минерал был описан в метеоритах и в виде включений в мантийном алмазе.

Шрейберзит был обнаружен нами в Маймечинском интрузиве в ксенолите светло серой тонкозернистой массивной породы, которую можно рассматривать как роговик. Шрейберзит образует тончайшие симплектитовые срастаниями с железом, в некоторых включениях он формирует отдельные более крупные выделения размером до 3 мкм, тяготеющие к краевым частям

капель (рис. 2 г).

Наиболее распространенным сульфидом является троилит (рис. 2 в). Он образует самостоятельные выделения с халькопиритом и пентландитом, каймы на границах самородного железа с вмещающими породами, включения в железе, часто совместно с самородной медью. Халькопирит по составу близок к стехиометричному, образует срастания с троилитом и в виде тонких ламелей в нем. Кубанит более резок, образует пластинчатые ламели в халькопирите, Сульфиды пентландит кобальтпентландитового ряда присутствуют в виде кайм между троилитом и самородным железом, а также в виде включений в халькопирите и кубаните.

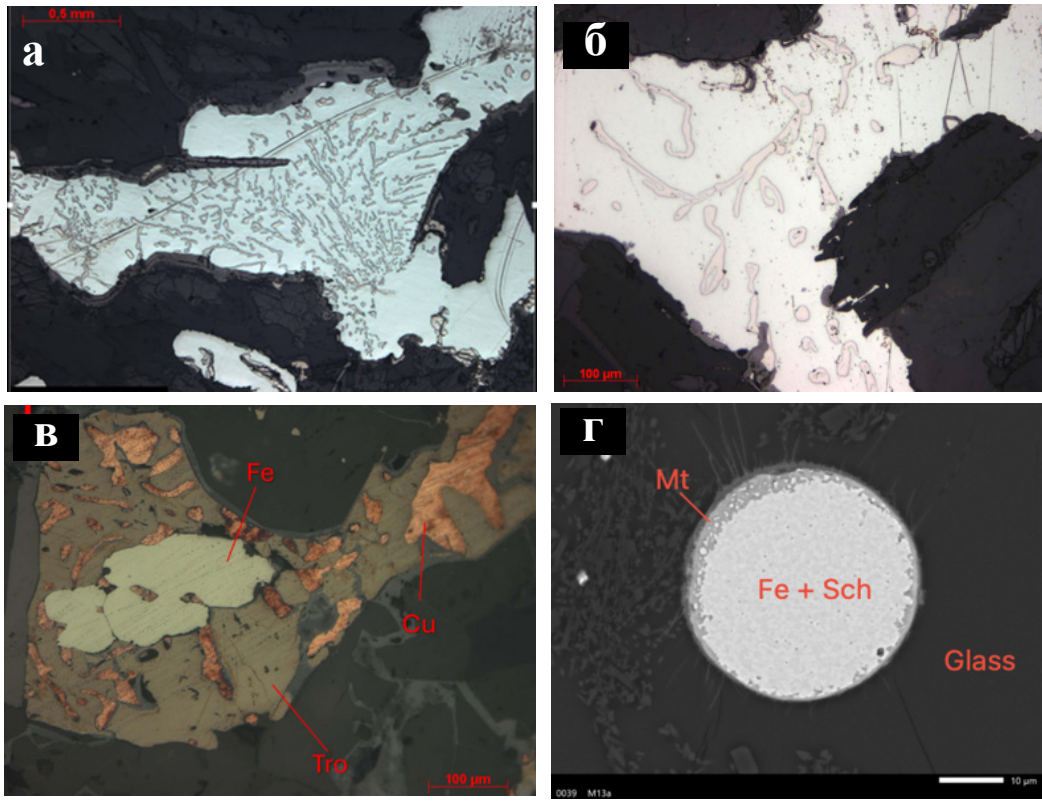


Рис. 2. Ассоциации с самородным железом. а, б – симплектитовые срастания когенита (розовый) и железа (белое); в - симплектитовые срастания меди (Cu) и троилита (Tro) вокруг капли самородного железа (Fe); г - каплевидное выделение полиминерального агрегата, состоящего из самородного железа и шрейберзита (Fe+Sch) с реакционной каймой магнетита (Mt) в силикатном стекле (Glass). а-в – фотографии в отраженном свете; г - фотография в отраженных электронах.

Список литературы:

1. Борисова Е.А., Голованова Т.И., Шлюкова З.В. Самородное железо из Хибинского массива // Известия Академии наук (серия геологическая) – 1989 – С. 132–136.
2. Олейников Б.В., Копылова А.Г., Панков В.Ю. Минеральные ассоциации самородного железа аподолеритовых метасоматитов Джалтульского интрузива // Самородное металлообразование в магматическом процессе: Сборник научных трудов – 1991 – С. 29-48.
3. Рябов В.В., Лапковский А.А. Уникальная полиминеральная ассоциация кобальт-никелевых и благороднометальных фаз в габбродолеритах траппового массива Джалтул (Сибирская платформа) // Доклады Академии наук – 2010 – Т. 434 – № 4 – С. 522–526.
4. Рябов В.В., Павлов А.Л., Лопатин Г.Г. Самородное железо сибирских траппов (на примере Хунгтукуиского месторождения). Новосибирск, Наука – 1985 – 169 с.
5. Томшин М.Д., Копылова А.Г., Васильева А.Е. Самородное железо в траппах Сибири // Петрология. – 2023 – Т. 31 – № 2 – С. 202– 216.
6. Хмельницкая М.О., Верещагин О.С., Копылова А.Г., Гриценко Ю.Д., Власенко Н.С., Бритвин С.Н. Минеральные ассоциации и генетические модели образования самородного железа в магматических породах Сибири // Геология и геофизика – 2026.

ЗОЛОТО-РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫЕ (AU-BI-W) РУДНЫЕ СИСТЕМЫ КОЛЫМЫ

Колова Е. Е. (*kolova@neisri.ru*), **Глухов А.Н.** (*gluhov76@list.ru*)

СВКНИИ ДВО РАН, г. Магадан

Аннотация: Au-Bi-W месторождения и рудопроявления широко развиты на Северо-Востоке Азии. Они связаны с интрузиями гранитов и гранодиоритов позднеюрского и раннемелового возраста басугуньинского комплекса, ареал которых охватывает весь Главный Колымский плутонический пояс. Результаты исследований последних лет позволяют прогнозировать новые месторождения такого типа, в том числе путем переоценки известных Sn-W объектов.

Ключевые слова: *Au-Bi-W, гранитоиды, рудообразование.*

Месторождения Au-Bi-W геолого-генетического типа широко распространены в структурах Северо-Востока Азии. В Магаданской области сейчас эксплуатируется месторождение Тэутеджак, месторождения Школьное, Надежда, Нетчен-Хая законсервированы после полной или частичной отработки; в 2022 году открыто месторождение Древнее (Днепровский рудный узел); в Чукотском АО разрабатываются – Майское и Кекура.

В зарубежной литературе месторождения Au-Bi-W геолого-генетического типа получили обозначение RIRGS (Reduced Intrusion Related Gold System) [8]. Это мезотермальные объекты, оруденение которых несет признаки тесной генетической связи с гранитоидным магматизмом ильменитовой серии.

Первое на Северо-Востоке месторождение такого типа – Чепак – было выявлено еще в 1949 г. П.А. Скорняковым. В 1981 году при заверке шеелитового шлихового потока было выявлено месторождение Школьное, в котором совместилось Au-Bi-W мезотермальное и наложенное Au-Ag-Sb эпитермальное оруденение [1].

В 1973 г. А.П. Осипов и А.А. Сидоров сформулировали особенности данного оруденения, они впервые отнесли его к самостоятельной Au-редкометалльной рудной формации [4]. Обращаем внимание, что под «редкими металлами» авторы подразумевали прежде всего Bi и W, минералы которых практически повсеместно присутствуют в рудах такого типа.

Подавляющее число колымских Au-Bi-W объектов связаны с интрузивами басугуньинского комплекса, ареал которых охватывает весь Главный Колымский плутонический пояс. Преобладающие породы – кварцевые диориты, гранодиориты и лейкограниты. Главный акцессорный минерал ильменит, магнетит редок. По химическому составу породы относятся к известково-щелочной серии, с калиево-натриевым типом щелочности. Отмечаются пониженные содержания Sr, Ba, Ti и повышенные значения отношения Rb/Sr коррелирующие с ростом SiO_2. По геохимической классификации грани-

тоидов породы комплекса относятся преимущественно к ильменитовому I-типу с чертами S-типа в наиболее кислых дифференциатах. Возраст пород позднеюрский; интервал U-Pb и Ar-Ar возрастов составляет 153–140 млн лет. Состав гранитоидов басугуньинского комплекса весьма близок составу меловых гранитных интрузий Аляски и Юкона, с которыми связаны RIRGS-месторождения провинции Тинтина [8]. Известны единичные примеры Au-Bi-W месторождений, связанных с интрузивами других комплексов (Тэутэджак, Надежда, Ачча).

В рудах всех Au-Bi-W объектов Колымы в разных соотношениях выделяются следующие минеральные парагенезисы: 1) шеелит-арсенопирит-леллингит-кварцевая с турмалином и мусковитом, 2) пирротин-сфалерит-халькопиритовая, 3) золото-сульфотеллуридно-висмутовая, 4) серебро-полисульфидная, с минералами Sb. Типоморфная для RIRGS-оруденения минеральная ассоциация – самородное золото, минералы висмута, арсенопирит / леллингит, характерна не для всех объектов, отмечаются вариации арсенопирита и пирита проявляющие зависимость от вмещающей среды. Преобладает высокомышьяковистый арсенопирит. Галенит почти всегда содержит примеси Bi (до 6%) и Ag (до 3%), что объясняется наличием микровключений висмутина, матильдита и акантита.

Отношения изотопов Sr, Nd, Pb в гранитоидах и рудах указывают на коровый источник магм и отсутствие ювенильного (мантийного) компонента в их составе [2, 6]. Изотопный состав кислорода из кварца руд и гранитоидов указывает на смешение магматогенного мантийного и метеорного флюидов, а изотопный состав серы сульфидов из руд – на проявление процессов флюидной несмесимости, характерной для образования руд RIRGS-месторождений [9].

Руды большинства Au-Bi-W объектов Колымы содержат шеелит или вольфрамит; концентрации W в рудах достигают первых %. В последние годы месторождения такого типа выявлены в пределах оловорудных узлов [3, 5]. Это ставит на повестку дня вопрос о необходимости ревизии на Au-Bi-W минерализацию Sn-W объектов.

Относительно недавно на примере месторождения Даблин-Галч провинции Тинтина канадские исследователи показали [7], что при формировании RIRGS золото не просто осаждается из флюида, а проходит сложный цикл перераспределения. Ключевым здесь является сделанный ими вывод, что золото, вместе со свинцом и висмутом, извлекается из рекристаллизующегося арсенопирита (или леллингита) и концентрируется Bi-Pb расплавами, выступающими в роли коллекторов (аналогично глету при купелировании). Индикаторами подобного процесса, который приводит к высвобождению золота, являются козалит ($Pb_2Bi_2S_5$) и галенит с высокими концентрациями Bi и Ag. Этот вывод имеет и важнейший прикладной аспект, объясняя причину различий технологических свойств руд: в одних случаях преобладает самородное золото с широким диапазоном пробности (600-950‰), в других – тонкодисперсное золото в срастании с арсенопиритом (упорные руды) с более узким вариационным размахом пробности (800-980‰). Выявление в рудах поздней

ассоциации галенита и самородного золота наряду с рекристаллизованным, лишенным примесей Au арсенопирита, может позволить уже на ранних стадиях изучения разбраковывать легко обогатимые руды от упорных.

Список литературы:

1. Вознесенский С.Д. Золоторудное месторождение Школьное (Магаданская область). Его прошлое, настоящее и будущее // Золото северного обрамления Пацифика. Международный горно-геологический форум. Тезис докладов Всеколымской горно-геологической конференции, посвященной 80-летию Первой Колымской экспедиции Ю.А. Билибина (Магадан, 10-14 сентября). – Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2008. – С. 62–63.

2. Горячев Н.А. Происхождение золото-кварцевых жильных поясов Северной Пацифики. – Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2003 – 143 с.

3. Кузнецов В.М., Жигалов С.В. Золото-редкометалльное оруденение Лазовского оловоносного узла // Вестник СВНЦ ДВО РАН. – 2009. № 3 – С. 2 – 8.

4. Осипов А.П., Сидоров А.А. Особенности и перспективы золото-редкометалльных формаций // Новые данные по геологии Северо-Востока СССР. – Труды СВКНИИ. – Вып. 55. Магадан: СВКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1973. – С. 163 – 173.

5. Самгин-Должанский И.С., Блюдина Д.В., Носова С.А. Золоторудное месторождение Древний – крупнейшее открытие последних лет. Геологическое строение // Недра Поволжья и Прикаспия. – 2026. – Вып.121. – С. 4 – 13.

6. Цыганков А.А., Горячев Н.А., Хубанов В.Б. Новые изотопно-геохимические данные по гранитоидам Главного Колымского батолитового пояса // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы XI Всероссийской научно-практической конференции. 08 – 10 апреля 2020 г. – Якутск: Издательский дом СВФУ, 2020. – С. 309 – 310.

7. Cave B.J., Barnesa S.-J., Pitcairnb I.K., Sackc P.J., Kuikkad H., Johnsone S.C., Durana C.J. Multi-stage precipitation and redistribution of gold, and its collection by lead-bismuth and lead immiscible liquids in a reduced-intrusion related gold system (RIRGS); Dublin Gulch, western Canada // Ore Geology Reviews. – 2019. – V. 106. – P. 28 – 55.

8. Hart C. J.R. Reduced Intrusion-Related Gold Systems // Mineral deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication 5. – 2007. – P. 95 – 112.

9. Vikent'eva O.V., Prokofiev V.Yu., Gamyanin G.N., Goryachev N.A., N.S. Bortnikov N.S. Intrusion-related gold-bismut deposits of North-East Russia: PTX parameters and sources of hydrothermal fluids // Ore Geology Reviews. 2018. V. 102. P. 240–259.

ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ В РУДАХ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СУЛЬФИДНЫХ ПОЛЕЙ РОССИЙСКОГО РАЗВЕДОЧНОГО РАЙОНА, СРЕДИННО-АТЛАНТИЧЕСКИЙ ХРЕБЕТ

Мелекесцева И. Ю. (*melekestseva-irina@yandex.ru*),
Котляров В. А. (*kotlyarov@mineralogy.ru*)

ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл.

Аннотация: Изучены руды гидротермальных сульфидных полей Российского разведочного района САХ. Повышенные содержания и минералы Au и Ag характерны для полей на внутриокеанических комплексах. Невидимая форма Au и Ag связана, в основном, с вторичными минералами Cu, в которых содержание Au и Ag выше по сравнению с первичными сульфидами.

Ключевые слова: *благородные металлы, золото, серебро, сульфиды, гидротермальные сульфидные поля, Срединно-Атлантический хребет.*

В работе обобщены данные о форме нахождения Au и Ag в рудах гидротермальных сульфидных полей Российского разведочного района (12–20° с.ш., Срединно-Атлантический хребет), которые могут представлять интерес при возможной добыче. Район включает в себя поля на базальтах (Краснов, Холмистое, Петербургское, Зенит-Виктория, Юбилейное, Пью де Фоль, Сюрприз) и внутриокеанических комплексах с ультрамафитами, габброидами и базальтами (Логачев, Ашадзе, Семенов, Ириновское, Победа, Молодежное, Коралловое) [1].

Наибольшие концентрации Au (17.0–188.2 г/т) и Ag (128–1788 г/т) установлены в Cu-Zn рудах поля Семенов-2 (13°31.13′ с.ш.) [2]. Видимая форма Au (~70%) включает самородное золото с (<10 мкм), которое встречается в опале и реже халькопирите и сфалерите (рис. 1а) и содержит Ag 0.31–23.07 мас. % [2], а также редкие ауростибит, калаверит и сильванит в изокубаните и на контакте изокубанита и сфалерита [3]. Минералы Ag представлены гесситом, который приурочен к изокубанит-халькопирит-сфалеритовым агрегатам и опалу [2, 3], и Au-содержащим самородным серебром, ассоциирующим с галенитом, самородным мышьяком, сфалеритом и пиритом, обогащенным As (1.21–18.06 мас. %) (рис. 1б) [4]. Невидимая форма Au и Ag (30%) связана с ковеллином, который содержит 22.51–226.64 г/т Au и 1201.25–2664.54 г/т Ag [2].

Барит-пиритовые руды поля Семенов-1 (13°30.87′ с.ш.) содержат 0.53–4.76 г/т Au и 9.7–70.8 г/т Ag [5]. Более 90% Au и Ag сконцентрировано в самородном виде в пирите и реже – барите (рис. 1в). Размер зерен не превышает 2 мкм, содержания Ag составляют 37–48 мас. %. Серебро также входит в состав акантита, ленаита и сульфосоли Ag, Cu и Sb. Невидимое золото находится в пирите и марказите (<1.64 г/т) [5]. В сульфидном штокверке обнаружено самородное золото в ассоциации с пирротином, изокубанитом и халькопиритом [6].

В барит-пиритовых рудах поля Семенов-3 (13°30.70′ с.ш.) содержание благородных металлов низкое: 0.20–0.63 г/т Au и 6.3–20.4 г/т Ag [7]. Единичные ЛА-ИСП-МС анализы пирита с содержаниями 5.75 и 10.80 г/т Au свидетельствуют о присутствии самородной формы золота.

В опал-сфалеритовых трубах курильщиков поля Ириновское (13°20.0′ с.ш.) содержание Au и Ag составляет 2.4–14.2 и 37–490 г/т [8]. Многочисленные зерна самородного золота (2 мкм) найдены в опале, на контакте опала и сфалерита, в оксигидроксидах Fe и смектитах (рис. 1г). Видимая форма Ag включает акантит и сульфосоли, близкие по составу к аргентотетраэдриту-Zn, миаргириту, пиаргириту и стефаниту. Серебро также входит в состав сфалерита (0.37–2.56 мас. %), предположительно, хоулиита (1.71–21.01 мас. %), ковеллина (0.58–20.50 мас. %) и ярроуита (37.00–37.55 мас. %).

Руды поля Ашадзе-1 (12°58.4′ с.ш.) содержат 0.25–5.80 г/т Au and 5.80–111 г/т Ag [9]. Самородное золото в виде ксеноморфных зерен (8 мкм) ассоциирует со сфалеритом. В единичных микрозондовых анализах некоторых сульфидов зафиксированы следующие содержания Au (мас. %): 0.15–0.57 в пирротине, 0.19–1.16 – пирите, 0.05–0.71 – халькопирите, 0.81–1.38 – фазе Y ($Cu_2Fe_3S_5$), 0.05–0.98 – борните, 0.14–1.01 – сульфидах Cu и 0.51–1.15 – кобальтпентландите. Наиболее вероятно, это связано с присутствием в них ультрамикроскопических включений самородного золота. Сульфиды Ag представлены акантитом и аргентопиритом. Серебро также установлено в сфалерите (0.06–1.20 мас. %) и реже борните (0.02–0.03 мас. %) и сульфидах Cu (0.02–0.12 мас. %).

В рудах поля Ашадзе-2 (12°59.5′ с.ш.) самородное золото в виде округлых, треугольных и слегка удлиненных зерен (2 мкм) найдено в ковеллине и халькопирите и на контакте изокубанита и ковеллина [10]. Золото содержит 0.76–7.65 мас. % Ag. По данным ЛА-ИСП-МС невидимое Au и Ag, соответственно, содержится в изокубаните (0.70–1.44 и 11–25 г/т), ковеллине, замещающем изокубанит (2.25–5.95 и 100–116 г/т), халькопирите (1.75–21 и 12–31 г/т) и борните, замещающем халькопирит (1.22–14.63 и 27–69 г/т).

В рудах поля Логачев-1 (14°45′ с.ш.) среднее содержание Au и Ag составляет 23.8 и 92 г/т, соответственно [11]. Обильные зерна самородного золота (5 мкм) обнаружены в кварце, сфалерите и халькопирите на контакте со сфалеритом. Содержания Ag сильно варьируют от 8.2 до 32.1 мас. %. Золото также содержит Zn (1.1–3.6 мас. %), Cu (0.8–6.1 мас. %) и Fe (2.1 мас. %) [11].

Таким образом, повышенные концентрации и видимые минералы Au и Ag установлены в рудах гидротермальных сульфидных полей Российского разведочного района (12–20° с.ш., Срединно-Атлантический хребет), ассоциирующих с внутриокеаническими комплексами. Благородные металлы образуют собственные минералы, которые ассоциируют с главными сульфидами, кварцем, опалом и баритом. Невидимая форма благородных металлов, связана, в основном, с вторичными минералами меди (борнит, ковеллин), в которых содержание Au и Ag увеличивается по сравнению с первичными сульфидами.

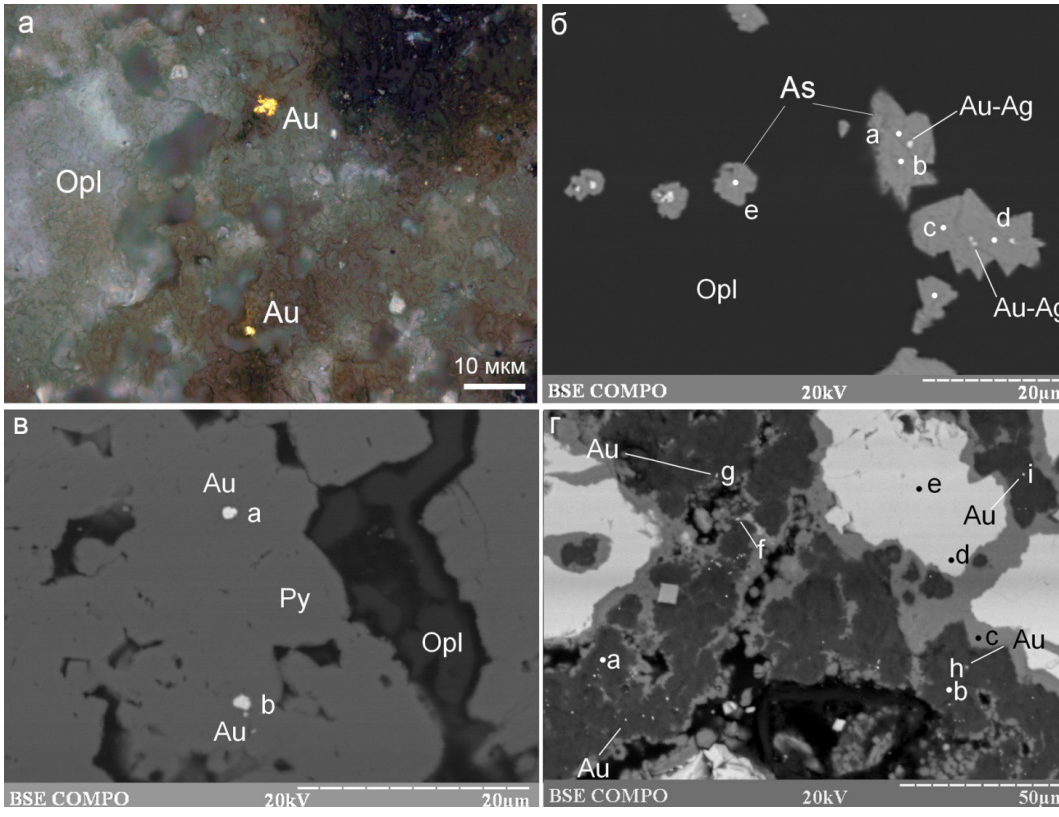


Рис. 1. Минералы Au и Ag в рудах полей Семенов и Ириновское: а) дендритовидные частицы самородного золота (Au) в опале (Opl), поле Семенов-2, отраженный свет; б) зерна Au-содержащего самородного серебра (Ag-Au) в кристаллах самородного мышьяка (As), поле Семенов-2; в) частицы низкопробного самородного золота в пирите (Py), поле Семенов-1; г) зерна самородного золота в глинистых минералах (точки a, b), вокруг сфалерита (точки e, d) и гидроксидов Fe (точка c), поле Ириновское. Рис. б–г – BSE фото.

Список литературы

1. Черкашев Г.А. Открытие и изучение гидротерм и сульфидных руд // Мировой океан. Твердые полезные ископаемые и газовые гидраты. Т. 3. – Москва: Научный мир, 2018 – С. 48–53.

2. Melekestseva I., Maslennikov V., Tret'yakov G. et al. Gold- and silver-rich massive sulfides from the Semenov-2 hydrothermal field, 13°31.13′ N, Mid-Atlantic Ridge: A case of magmatic contribution? // Economic Geology – 2017 – Vol. 112 – P. 741–773.

3. Firstova A., Stepanova T., Sukhanova A. et al. Au and Te minerals in seafloor massive sulphides from Semyenov-2 hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge // Minerals – 2019 – Vol. 9 – Article # 294.

4. Melekestseva I., Kotlyarov V., Tret'yakov G., Beltenev V.E. Native arsenic at the Semenov-2 seafloor massive sulfide deposit (13°31′13 N, Mid-Atlantic Ridge): an indicator of low-temperature, reducing, and acidic formation conditions // The Canadian Journal of

Mineralogy and Petrology – 2025 – Vol. 63 – P. 113–140.

5. Melekestseva I., Tret'yakov G., Nimis P. et al. Barite-rich massive sulfides from the Semenov-1 hydrothermal field (Mid-Atlantic Ridge, 13°30.87′ N): Evidence for phase separation and magmatic input // Marine Geology – 2014 – Vol. 349 – P. 37–54.

6. Martin A., Murton B., McLeod C. et al. Deep-sea drilling of the 13°30′ N oceanic core complex: Assessing links between fluid flow, metal enrichment and seafloor massive sulfide deposit formation near Semenov-1 // Lithos – 2025 – Vol. 494–495 – Article 107921.

7. Melekestseva I., Maslennikov V., Safina N. et al. Sulfide breccias from the Semenov-3 hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge: authigenic mineral formation and trace element pattern // Minerals – 2018 – Vol. 8 – Article # 321.

8. Melekestseva I., Kotlyarov V., Tret'yakov G. et al. The heavy-metal fingerprint of the Irinovskoe hydrothermal sulfide field, 13°20′ N, Mid-Atlantic Ridge // Minerals – 2022 –Vol. 12 – Article #1626.

9. Mozgova N.N., Trubkin N.V., Borodaev Yu.S., et al. Mineralogy of massive sulfides from the Ashadze hydrothermal field, 13ºN, Mid-Atlantic Ridge // The Canadian Mineralogist – 2008 – Vol. 46 – P. 545–567.

10. Melekestseva I., Maslennikov V., Tret'yakov G. et al. Trace element geochemistry of sulfides from the Ashadze-2 hydrothermal field (12°58′ N, Mid-Atlantic Ridge): Influence of host rocks, formation conditions or seawater? // Minerals – 2020 – Vol. 10 – Article # 743.

11. Леин А.Ю., Черкашев Г.А., Ульянов А.А. и др. Минералогия и геохимия сульфидных руд полей Логачев-2 и Рейнбоу: черты сходства и различия // Геохимия – 2003 – № 3 – С. 304–328.

МИКРОЛИТ-ПИРОХЛОР С ОБРАТНОЙ ЗОНАЛЬНОСТЬЮ В РЕДКОМЕТАЛЬНЫХ ГРАНИТНЫХ ПЕГМАТИТАХ ПАМИРА – ИНДИКАТОР ПРОЯВЛЕНИЯ ИНВЕРСИОННОГО ЭТАПА РАЗВИТИЯ ЭТИХ ПЕГМАТИТОВ

Мираков М.А.[1], **Паутов Л.А.**[2] (*pla58@mail.ru*),
Спиридонов Э.М.[2,3] (*ernstspiridon@gmail.com)*

[1]*Памиро-Таджикская экспедиция,*
[2]*Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, Москва,*
[3]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

Аннотация: гранитные пегматиты Памира, которые рассматривали как источник пьезосырья и самоцветов, содержат богатую минерализацию Sn, Nb-Ta, Y, Sc, REE, Rb, Cs. Характерны кристаллы микролита-пирохлора с обратной зональностью - индикаторы инверсионного этапа взаимодействия позднепегматитовых флюидов с породами рамы.

Ключевые слова: *редкометальные гранитные пегматиты Памира, микролит-пирохлор с обратной зональностью - индикатор инверсионного этапа взаимодействия позднепегматитовых флюидов с породами рамы.*

По результатам Памиро-Таджикской экспедиции 1930-х гг. под руководством А.Е. Ферсмана, последующих работ С.И. Коноваленко, Л.Н. Россовского и лругих геологов, гранитные пегматиты Памира рассматривали как источник пьезосырья и самоцветов [5 и др.]. Исследования Л.А. Паутова, М.А. Миракова и их коллег показали, что эти гип-мезоабиссальные гранитные пегматиты содержат богатую минерализацию Sn, Nb-Ta, Y, Sc, REE [1-3, 6, 7 и др.]. Это - богатый танталом касситерит и разнообразные тантало-ниобаты. Особый генетический интерес представляют кристаллы микролита – пирохлора с обратной зональностью в ассоциации с ферсмитом и колумбитом в пегматитовой жиле Лесхозовская (рисунок). От центра к внешним зонам кристаллов содержание ниобия растёт, содержание тантала интенсивно снижается. Центральные зоны кристаллов слагает фторнатромикролит и реже - фторкациомикролит, чётко отграниченные внешние зоны – фторнатропирохлор.. Формулы типичных фторкальциомикролита и фторнатропирохлора в расчёте на B=2: $(Ca_{0.93}Na_{0.91}U_{0.06}Th_{0.01})_{1.91}(Ta_{1.32}Nb_{0.53}Ti_{0.12}Sn_{0.03})_{2.00}O_6F_{0.96}$ и $(Na_{1.17}Ca_{0.77}U_{0.13})_{2.07}(Nb_{1.35}Ta_{0.61}Ti_{0.02}Sn_{0.02})_{2.00}O_6F_{0.91}$.

В гранитных пегматитах чистой линии в ходе их развития происходит накопление Ta, микролит сменяет пирохлор или развивается все более богатый Ta микролит. В пегматитах Памира – картина иная. Вероятное объяснение – таково. Основной объём гранитных пегматитов слагают полевые шпаты и кварц, поэтому в ходе кристаллизации пегматитового расплава увеличивалось флюидное давление, которое в ряде случаев возрастало до величин, превышающих литостатическое и прочность пород рамы. Обычно это отскчает переходу к пневмато-гидротермальному этапу развития пегматитов, который фиксирован α-β инверсией кварца [5, 8] с большим объёмным эффектом. При

этом пегматитовый «автоклав» приоткрывался. Богатые фтором кислотные флюиды, выброшенные из пегматитов в породы рамы, активно с ними реагировали, флюиды разбавлялись, их кислотность снижалась. Часть вещества, заимствованного из пород рамы, мигрировала в пегматитовые полости [4]. В результате в гранитных пегматитах, залегающих среди магнезитовых мраморов (Кухи-Лал), появились инверсионные - богатые Mg - кордиерит, дравит, магноколумбит; в гранитных пегматитах среди гранитов Памира и Волыни возник инверсионный чайного цвета топаз вместо голубого в пегматитах чистой линии [8]; инверсионный пирохлор в гранитных пегматитах Памита – вместо микролита в пегматитах чистой линии, поскольку во вмещающих пегматитовые жилы Памира породах содержания ниобия згачительно превышают содержания тантала.

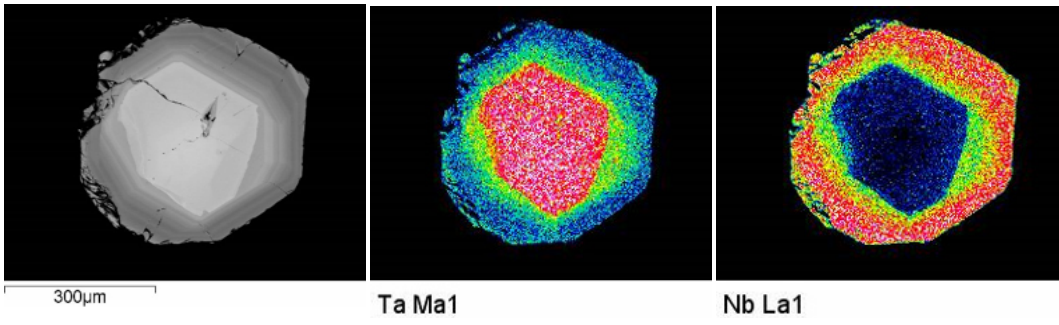


Рисунок. Пегматитовая жила Лесхозовская. Кристалл микролита - пирохлора с обратной зональностью в отражённых электронах (слева) и карты распределения в нём тантала (в центре) и ниобия (справа).

Список литературы:

1. Мираков М.А. Ниобий-танталовая минерализация в пегматитовой жиле Лесхозовская из Шахдаринского пегматитового поля (Юго-Западный Памир) // Доклады Национальной АП Таджикистана. 2023. Т. 66. №. 3-4. С. 241-251.
2. Мираков М.А., Паутов Л.А., Шодибеков М.А., Плечов П.Ю., Карпенко В.Ю. Новая скандийсодержащая разновидность тусионита Восточного Памира // Зап. РМО. 2018. Ч. 147. Вып. 4. С. 84-96. doi: 10.30695/zrmo/2018.1474.07.
3. Паутов Л.А., Карпенко В.Ю., Мираков М.А., Алиназаров У.С., Шодибеков М.А., Искандаров Ф.Ш. О висмутоколумбите из миароловых гранитных пегматитов на Восточном Памире // Новые данные о минералах. 2020. Т. 54. Вып.1. С. 26–37. doi: 10.25993/FM.2020.54.1.003.
4. Спиридонов Э.М. Инверсия в развитии гранитных пегматитов и образование околопегматитовых ореолов. В кн.: Минерал. музеи в XXI веке. Спб.: 2000. С. 106.
5. Ферсман А.Е. Гранитные пегматиты. М.-Л.: изд. АН СССР. 1940. 712 с.
6. Pautov L.A., Mirakov M.A., Cámara Artigas F., Sokolova E., Hawthorne F.C.,

Schodibekov M.A. and Karpenko V.Y. Badakhshanite-(Y), $Y_2Mn_4Al(Si_2B_7BeO_{24})$, a new mineral species of the perettiite group from a granite miarolic pegmatite in Eeastern Pamir, the Gorno Badakhshan autonomous oblast, Tajikistan // Canad. Mineral. 2020. Vol. 58. P. 381-394. doi: 10.3749/canmin.2000003.

7. Pautov L.A., Mirakov M.A., Sokolova E., Day M.C., Hawthorne F.C., Schodibekov M.A., Faiziev A.R. Shakhdaraite-(Y), $ScYNb_2O_8$, from the Leskhozovskaya granitic pegmatite, the valley of the Shakhdara River, southwestern Pamir, Gorno-Badakhshanskii Autonomous Region, Tajikistan: New mineral description and crystal structure // Canadian Mineralogist. 2022. Vol. 60. N 2. P. 369-382. doi: 10.3749/canmin.2000122

8. Spiridonov E.M. Gemstone deposits of the former Soviet Union // J. Gemmol. 1998. Vol. 26. № 2. P. 111-125.

ГИПОТЕРМАЛЬНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ ГИГАНТСКОГО ВУЛКАНОГЕННОГО КОЛЧЕДАННО-ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО AG-CD-AS-GA-GE-ZN-CU-PB МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЦУМЕБ, НАМИБИЯ: ВЫСОКИЙ ХАЛЬКОЗИН, ТОПАЗ, КВАРЦ, ФТОРАПАТИТ, ТВЁРДЫЙ РАСТВОР СФАЛЕРИТ - ГАЛЛИТ, СЕРИЯ ОВАМБОИТ $CU_{20}(CU,FE)_6W_2(GE,AS)_6S_{32}$ – МАЙКАИНИТ $CU_{20}(CU,FE)_6MO_2(GE,AS)_6S_{32}$, ФЛОГОПИТ, ГАЛЕНИТ, ПИРИТ, СТАННОИДИТ

Спиридонов Э.М.[1] (*ernstspiridon@gmail.com),*
Мурашко М.Н.[2] (*mzmurashko@gmail.com*),
Девнина Н.Н.[3],
Япаскурт В.О.[1](*yxo72@geol.msu.ru*),
Куликова И.М.[4] (*imkulikova@gmail.com*),
Коротаева Н.Н.[1](*natakorotaeva@yandex.ru*)

[1] *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*
[2]*Санкт-Петербургский государственный университет*
[3]*Горный музей, С-Петербург* [4]*ИМГРЭ, Москва*

Аннотация: «Неубиенным» свидетельством наличия среди руд Цумеба высоко температурных образований является срастание высокого халькозина и 5 см кристалла топаза. Иные типоморфные гипотермальные образования: флогопит, твёрдый раствор сфалерит – галлит, сложные сульфиды *Cu-Fe-Zn-Ge-As-W-Mo и Cu-Fe-Zn-Sn-Ge-As.*

Ключевые слова: *вулканогенное колчеданно-полиметаллическое месторождение Цумеб, гипотермальнпая минерализация, топаз, высокий халькозин, твёрдый раствор галлит - сфалерит, серия овамбоит – майкаинит, станноидит.*

Цумеб – одно из богатейших сульфидных месторождений нашей планеты, из его руд получено более 90 млн. т Pb, Cu и Zn, значительное количество Ag, Ge, Ga, As, Cd. По Гансу Шнейдерхёну, который в начале XX века занимался картированием подземных выработок и долгое время изучал руды, Цумеб – магматогенное гидротермальное месторождение замещения [2]. По совокупности геологических и минералогических данных Цумеб это – вулканогенное колчеданно-полиметаллическое месторождение, что впервые отметил П.Г. Зёнге [5]. «Неубиенным» свидетельством наличия среди руд Цумеба высокотемпературных образований является срастание высокого халькозина и 5 см кристалла топаза (рис.1) [3]. Гипотермальные образования Цумеба возникли при температуре до 450° С из растворов с солёностью 23-28 масс. % экв. NaCl [4]. Это агрегаты кварца, фторапатита, пирита, топаза, высокого халькозина, галенита, твёрдого раствора галлит – сфалерит, сложных сульфидов Cu-Fe-Zn-Ge-As-W-Mo – овамбоита и майкаинита [1], сложных сульфидов Cu-Fe-Zn-

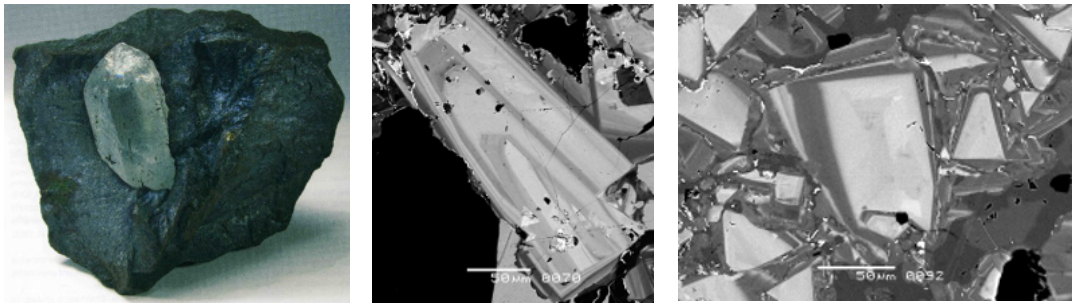


Рис. 1. Слева – срастание высокого халькозина и 5 см кристалла топаза по [3]. В центре и справа: осцилляционно-зональные кристаллы овамбоита, тёмно-серые зоны – Mo овамбоит. Кварц, фторапатит и флогопит (чёрные). В отражённых электронах. Данные авторов.

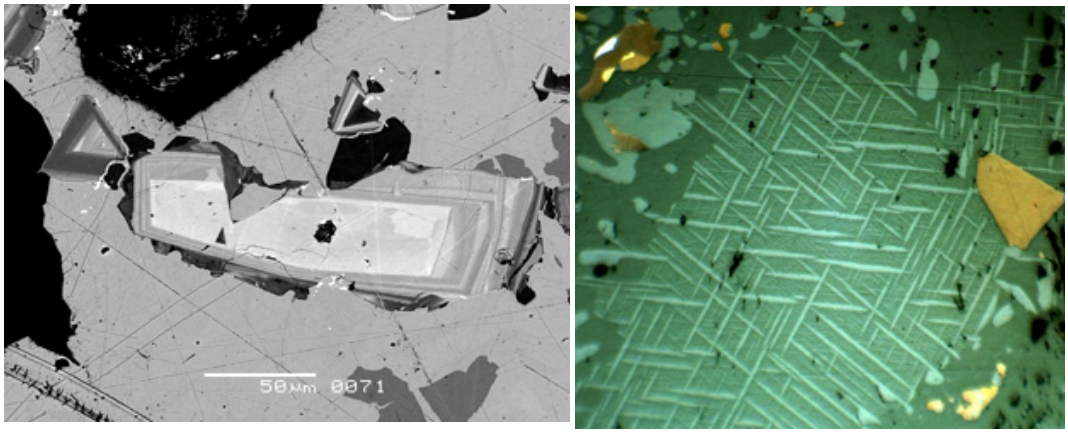


Рис. 2. Слева – в центре кристалл овамбоита (светлый) – Mo овамбоита (светло-серый), небольшие тетраэдры майкаитина (тёмно-серый) – W майкаинита (светло-серый), черные правильные кристаллы – фторапатит, чёрные выделения неправильной формы – квварц, матрица – галенит (серый). В Отражённых электронах. Справа –твёрдый раствор галлит – сфалерит, который испытал распад на сфалерит (матрица) и галлит (ламели). Вокруг – жёлтые кристаллы – реньерит, белые – галенит. В отражённом свете при 1 николе. Ширина поля зрения – 4 мм. Колл. М.Н. Мурашко. Фото Э.М. Спиридонова.

Sn-Ge-As – станноидита и иных (рис. 1 и 2). Состав высокотемпературного твёрдого раствора сфалерит- галлит $(Zn_{0.62}Cu_{0.19}Ga_{0.17}Fe_{0.01}Cd_{0.01})_1S$ = 62% ZnS + 33-35% $CuGaS_2$ + 2-3 % $CuFeS_2$ + 0-1 % CdS, то есть на 2/3 состоит из вещества сфалерита, на 1/3 – из вещества галлита; примесь высокого кубического халькопирита и хоулиита – не велика; твёрдый раствор испытал распад (рис. 2). Овамбоит стандартный $Cu_{20}(Cu_{3.0\text{-}4.6}Fe_{2.0\text{-}2.8}Zn_{0.9\text{-}1.2})_6W_2(Ge_{4.6\text{-}5.1}As_{0.7\text{-}1.1}Ga_{0\text{-}0.1})_6S_{32}$ и овамбоит медистый $Cu_{20}(Cu_5Fe_{1\text{-}0}Zn_{0\text{-}1})_6W_2(Ge_{4\text{-}5}As_{2\text{-}1})_6S_{32}$ обычно слагают идио-

морфные кристаллы в форме тетраэдра, октаэдра, кубооктаэдра и их комбинаций. Размер кристаллов до 1-2 мм, обычно 0.1-0.3 мм. Крайне характерно сложно зональное строение кристаллов овамбоита (рис. 1, 2). Овамбоит внешних зон кристаллов содержит до 1.5 масс. % Ga. Состав Mo овамбоита обычно близок к $Cu_{20}(Cu_{5.5}Zn_{0.6}Fe_{0.1})_{6.2}(W_{0.9}Mo_{0.3}Fe_{0.8})_2(Ge_{4.4}As_{1.3}Ga_{0.2})_{5.9}S_{31.9}$. Майкаинит стандартный $Cu_{20}(Cu_{3.6}Fe_{1.5}Zn_{0.9})_6(Mo_{1.3\text{-}1.4}W_{0.6\text{-}0.7})_2(Ge_{4.9\text{-}5.0}As_{0.8\text{-}1.3}Ga_{0.1})_6S_{32}$ и майкаинит медистый $Cu_{20}(Cu_{4\text{-}5}Fe_{2\text{-}1})_6(Mo_{1\text{-}2}W_{1\text{-}0})_2(Ge_4As_2)_6S_{32}$ слагают ядра зональных кристаллов майкаинита – овамбоита, отдельные зоны роста в них и их внешние зоны. Состав W майкаинита отвечает $Cu_{20}(Cu_{3.6\text{-}5.1}Fe_{0.3\text{-}1.5}Zn_{0.6\text{-}0.9})_6(Mo_{0.9\text{-}1.4}W_{0.3\text{-}0.7}Fe_{0\text{-}0.7})_2(Ge_{4.3\text{-}5.0}As_{0.8\text{-}1.4}Ga_{0.1\text{-}0.3})_6S_{32}$.

Список литературы:

1. Спиридонов Э.М. Майкаинит $Cu_{20}(Fe,Cu)_6Mo_2Ge_6S_{32}$ и овамбоит $Cu_{20}(Fe,Cu,Zn)_6W_2Ge_6S_{32}$ - новые минералы колчеданно-полиметаллических руд // Докл. РАН. 2003. Т. 393. № 6. С. 1-4.

2. Шнейдерхён Г. Месторождения полезных ископаемых. М.: ИЛ. 1958. 501 с.

3. Gebhard G. Tsumeb, a unique mineral locality. Grossenseifen: GG Publishing. 1999. 328 s.

4. Lombaard A.E., Gütchel A., Innes J., Krüger T.L. The Tsumeb lead-copper-zinc-silver deposit, South West Afrika, Namibia. In: Mineral Deposits Southern Africa. 1986. P. 1761-1787.

5. S**ö**hnge P.G. The Tsumeb story, pipe-like, massive-sulphide ore body appears to fill volcanic pipe in depth // Mining World. 1952. Vol. 14. № 6. P. 22-24.

Ca-Fe ГРАНАТЫ – ИСТОЧНИК ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКОЙ И ГЕНЕТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ В НОРИЛЬСКОМ РУДНОМ РАЙОНЕ

Стифеева М. В.[1] (stifeeva.maria@yandex.ru),
Гриценко Ю. Д.[2,3] (ygritsenko@rambler.ru),
Сальникова Е. Б.[1] (KateSalnikova@yandex.ru),
Адамская Е. В.[1] (adamskaya83@gmail.com),
Ерофеева К. Г.[4] (xenin.erofeeva@ya.ru),
Галанкина О. Л.[1] (galankinaol@mail.ru)

[1]ИГГД РАН, г. Санкт-Петербург, [2] Минмузей РАН, г. Москва, [3] МГУ им. Ломоносова, г. Москва, [4] ГИН РАН, г. Москва

Аннотация: Ca-Fe гранаты зарекомендовали себя в качестве надёжных U-Pb минералов-геохронометров как для датирования различных магматических пород, так и для оценки возраста контактово-реакционных и рудогенных процессов. Широкий диапазон вариаций химического состава граната обусловлен изоморфными замещениями в его структуре, что делает минерал чувствительным к изменениям физико-химических параметров и позволяет использовать его в качестве индикатора генетических условий минералообразующей среды.

Ключевые слова: *гранат, U-Pb, Норильский рудный район, траппы*

Значительный массив геохронологических данных, полученных для различных образований Сибирской трапповой провинции [6 и ссылки в работе], указывает на то, что пик магматической активности происходил 251 млн лет назад. Возраст формирования Cu-Ni месторождений принимается напрямую соответствующим возрасту интрузивных образований. Одним из возможных путей «прямого» датирования рудогенетических процессов является использование для геохронологических исследований минералов сингенетичных рудной ассоциации. За последние несколько лет в практику геохронологических исследований уверенно вошли Ca-Fe гранаты, которые позволяют не только оценить возраст проявления контактово-реакционных процессов, но и в совокупности с данными по составу и внутреннему строению, непосредственно установить связь с рудогенезом [4, 5].

В качестве объекта исследований был использован гранат из пород контактового ореола рудоносного интрузива Норильск-1. В старом карьере Угольный ручей и действующем карьере Медвежий ручей вскрыты контакты интрузива и осадочных пород девона, представленных морскими и лагунно-морскими отложениями терригенно-карбонатными породами, породами угленосной тунгусской серии и разнообразными базальтоидами ивакинской свиты. Образцы отобраны в карьере Угольный ручей и представлены светлой мелкозернистой породой, сложенной везувианом, серпентином и гранатом.

Гранат представлен идиоморфными кристаллами чёрного цвета с пре-

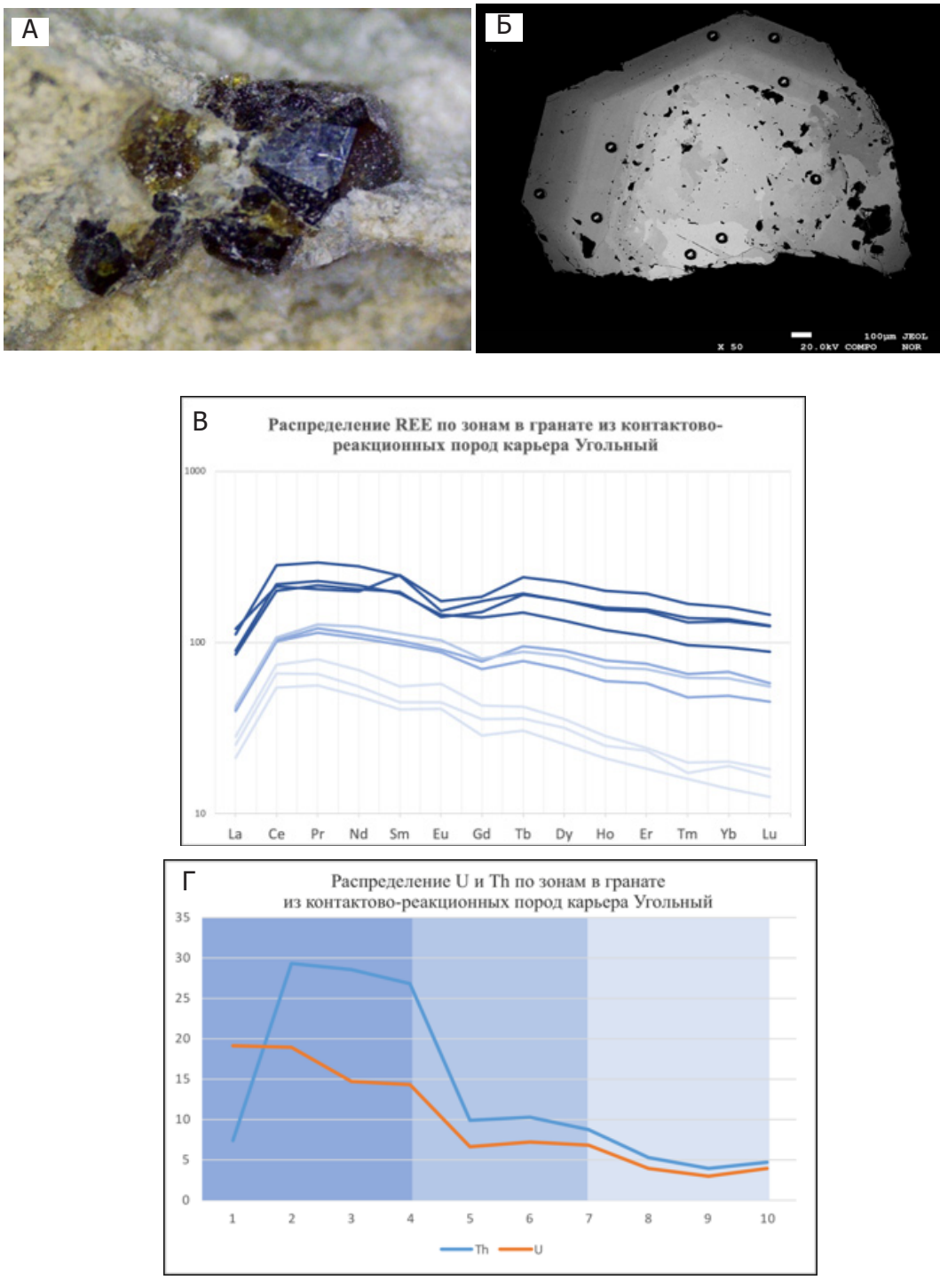


Рис. 1. А – фото граната в контактово-реакционных породах карьера Угольный; Б – изображение кристалла граната в обратно-отражённых электронах; В – график распределения REE по зонам в гранате; Г – график распределения U и Th по зонам в изученном гранате.

красной природной огранкой. Размер отдельных зёрен достигает 3 мм в диаметре. При изучении внутреннего строении кристаллов граната установлена их отчётливая зональность. Центральные зоны, занимающие 30-40% общей площади зёрен, характеризуются насыщенно-чёрной окраской и по направлению к периферии сменяются зонами тёмно-коричневого цвета; краевые части зёрен образованы третьей зоной светло-коричневого оттенка. Граница между зонами резкие, признаков растворения ранее образованной фазы не установлено.

Зональность проявлена и в химическом составе граната. Центральные зоны отличаются дефицитом Si, повышенными содержаниями Ti и Fe, а также присутствием Cr, V, Na, Zr и высоким уровнем *REE*. В направлении от центра к краю зёрен, во второй зоне, наблюдается рост содержания Al с одновременным снижением концентраций Ti и Fe, полное исчезновение примесных элементов (Cr, V, Na, Zr) и заметное уменьшение содержания *REE*. Внешняя зона граната характеризуется преобладанием Al над Fe и минимальным среди всех уровнем накопления *REE*.

В пределах отдельных зёрен, согласно установленной зональности, отмечается различное содержание U и Th – максимум содержаний также приходится на центральные зоны кристаллов, следующая зона в среднем характеризуется вдвое меньшими содержаниями.

По результатам U-Pb (ID-TIMS) и U-Th-Pb (LA-ICP-MS) исследований граната из контактово-реакционных пород карьера Угольный ручей установлено, что образование отдельных зон отвечает различным этапам: центральные части соответствуют известному установленному возрасту магматизма Сибирской трапповой провинции (250 млн лет) и образовались в результате скарнирования карбонатных пород P-C, а формирование средней зоны происходило позднее, на этапе 243–244 млн лет, вероятно, в ходе более позднего события.

Микроэлементный состав центральной и средней зон граната в целом демонстрирует поведение, характерное для процесса магматической дифференциации: сохраняются устойчивые значения Y/Ho и однотипный наклон спектра REE (близкие диапазоны La/Sm, Sm/Yb, La/Yb), что указывает на эволюцию единого по природе источника. Вместе с тем на этом фоне отчётливо выделяется поведение Zr/Hf отношения: при переходе от центральной зоны к средней оно возрастает практически вдвое, что нарушает общую закономерность плавного фракционирования, характерную для остальных изученных параметров. Такое несогласованное поведение Zr/Hf на фоне общей устойчивости REE-спектра позволяет предположить дополнительное флюидное воздействие, отразившееся в гранате сменой химического состава.

Платобазальты и интрузивные образования трапповой формации пересечены единичными круто падающими дайками щелочных лампрофиров – флогопитовых минетт, сопряжённых с Маймеча-Котуйской провинцией ультраосновных-щелочных магматитов и карбонатитов Восточно-Сибирской платформы, расположенной северо-восточнее Норильского региона. Возраст этих щелочных магматитов моложе трапповой формации на 1–3 млн. лет и

отвечает следующей зоне полярности палеомагнитной шкалы [1].

Трапповая формация Восточно-Сибирской платформы и подтрапповые толщи были захвачены процессами эпигенетического метаморфизма погружения в условиях цеолитовой, затем пренит-пумпеллиитовой и далее вновь цеолитовой фации [3]. Rb/Sr возраст процессов эпигенетического метаморфизма в центре тунгусской синеклизы – 232–122 млн. лет [2]. Процессы эпигенетического низкоградного метаморфизма в заметной степени преобразовали базальты, интрузивные тела и руды Норильских месторождений.

Возможно, «дорастание» скарновых гранатов на более поздних этапах связано с неизвестным ранее этапом магматизма, либо с формированием даек щелочных минетт, либо с наложенными эпигенетичными процессами регионального низкоградного метаморфизма. По всей видимости, на краю платформы возраст процессов низкоградного метаморфима мог несколько отличаться от времени метаморфизма основной части базальтов трапповой формации Восточно-Сибирской платформы.

Геологические исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РНФ № 25-47-00051 (Гриценко Ю.Д.); геохронологические исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РНФ № № 22-17-00211П (Стифеева М.В.; Сальникова Е.Б.)

Список литературы:

1. Дюжиков О.А., Дистлер В.В., Струнин Б.М., Мкртычан А.К., Шерман М.Л., Служеникин С.Ф., Лурье А.М. Геология и рудоносность Норильского района. М.: Наука – 1988 – 279 с.
2. Спиридонов Э.М., Гриценко Ю.Д. Низкоградный метаморфизм и Co-Ni-Sb-As минерализация в Норильском рудном поле. М.: Научный мир. – 2009 – 218 с.
3. Спиридонов Э.М., Ладыгин В.М., Симонов О.Н., Анастасенко Г.Ф., Кулагов Э.А., Люлько В.А., Середа Е.В., Степанов В.К. Метавулканиты пренит-пумпеллиитовой и цеолитовой фаций трапповой формации Норильского района Сибирской платформы. М.: МГУ – 2000 – 212 с.
4. Стифеева М.В., Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Гриценко Ю.Д. Первые данные о возрасте месторождений Кондомского железорудного поля (Горная Шория): результаты U-Pb (ID-TIMS) датирования граната // ДАН. Науки о Земле. 2024, Т. 514; № 2, С. 246-250.
5. Стифеева М.В., Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Гриценко Ю.Д. Возраст рудоносных скарнов Гавасайского магнетитового месторождения (Кыргызстан): результаты U-Pb (ID-TIMS) геохронологических исследований граната // ДАН. Науки о Земле. 2025, Т. 520; № 2, С. 54-58.
6. Kamo, S.L., Czamanske, G.K., Amelin, Y., Fedorenko, V.A., Davis, D.W., Trofimov, V.R., 2003. Rapid eruption of Siberian flood-volcanic rocks and evidence for coincidence with the Permian-Triassic boundary and mass extinction at 251 Ma // Earth Planet. Sci. Lett – 2003 – 214 – P. 75–91.

Минералогический музей
имени А.Е. Ферсмана РАН

310 ЛЕТ

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ В МИНЕРАЛОГИИ



30 сентября 2026 года

ЭПР-СПЕКТРОСКОПИЯ И ФОТОХРОМИЗМ БАРИТА ИЗ БЕЛОРЕЧЕНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (СЕВЕРНЫЙ КАВКАЗ)

Бадьянова Л. В.[1] (*badyanova.lubov@gmail.com*),
Вяткин С. В.[2] (*vyt_box@mail.ru*)

[1]*Минмузей РАН, г. Москва,* [2]*МГУ, г. Москва*

Аннотация: впервые отмечается фотохромизм в барите из Белореченского месторождения (Северный Кавказ). Исследовано влияние ультрафиолетового облучения (УФ) с длинами волн 365, 310, 254 нм и термической обработки (отжиг при 550 °C) на изменение и стабильность окраски образцов. Установлено, что при равных мощностях ламп (4 Вт) коротковолновое УФ-излучение (254 нм) вызывает заметное изменение цвета, интенсивность которого растёт с увеличением дозы облучения, а длинноволновое излучение (365 нм) практически не влияет на изменение цвета. Средневолновое излучение (310 нм) с мощностью источника 5 Вт вызывает также заметное изменение цвета образца, однако в сравнении с 254 нм, этот эффект слабее. Отжиг при 550 °C приводит к полному исчезновению центров окраски — процесс необратим, после него образец не меняет цвет при повторном УФ-облучении 254 нм. С помощью ЭПР-спектроскопии определено, что в исходном образце желтого цвета максимальна концентрация центра SO_3^-. После УФ-облучения содержание центра SO_3^- снижается в несколько раз, концентрации центров SO_2^- и SO_4^{3-}, изменяются слабо. Выявлено, что появление серо-голубой окраски коррелирует с ростом концентрации парамагнитного центра O^- (по данным ЭПР) и возникновением широкой полосы поглощения при ~630 нм после УФ-облучения.

Ключевые слова: *барит, ЭПР, фотохромизм, сульфат бария*

Введение

Фотохромизм— это обратимое изменение цвета материала при воздействии света с определенными длинами волн, обычно ультрафиолетового или рентгеновского излучения. На сегодняшний день известно, что эффектом фотохромизма обладают тугтупит, гакманит, диопсид, скаполит и цирконы [1, 6, 7].

Барит ($BaSO_4$) — это минерал, природный сульфат бария. В литературных источниках описания изменения цвета барита после нахождения на солнечном свету упоминаются в работах [8,9]. Кристаллы, извлеченные на поверхность при добыче, обычно обесцвечиваются. Однако, некоторые коллекционеры сообщали, что синий цвет барита из Стоунхэма, Колорадо (Stoneham Barite Locality, Colorado) усиливается после воздействия солнечного света, как это происходит с баритом из Хартсела (Hartsel, Colorado) [5].

В образцах барита, подвергнутых γ–облучению, появляются разные центры окраски. Считается, что центры O^- ответственны за появление цвета в синих кристаллах, SO_3^- в некоторых медово-желтых и синих кристаллах, SO_2^- в желтых кристаллах [3].

Образцы желтого барита, найденные на Белореченском месторожде-

нии (Северный Кавказ) в 2024-2025 гг., находясь на солнечном свету изменяли свою окраску до синевато-голубой. В течение года при хранении в темноте цвет восстанавливалсядо серовато-белого или слегка желтовато-голубоватого в зависимости от исходного цвета образца. При повторном облучении цвет также мог релаксировать с течением времени.

Для выяснения причин изменения цвета минерала мы сделали ЭПР-спектроскопию, сняли спектры поглощения исходных и УФ-облученных образцов барита.

Оборудование и методы исследования

Регистрация спектров парамагнитных центров производилась на ЭПР спектрометре CMS-840, в X-диапазоне (~9,4 гГц) при амплитуде модуляции 0,1 мТл, частоте модуляции 100 кГц и мощности СВЧ излучения 0,2 мВт.

Облучение образцов производилось ультрафиолетовым (УФ) светом с длинами волн 254 нм (коротковолновый, SW) и 365 нм (длинноволновый, LW) с использованием ламп системы Eickhorst (модели LT5 4/254 GC и LT5 4/365 BL, соответственно). Каждая лампа имеет мощность 4 Вт. Образцы экспонировались на расстоянии 5 см. Другой образец облучался УФ-светом с использованием фонаря Nuosenda (MR-C8.2-310) мощностью 5 Вт и длиной волны 310 нм (средневолновый, MW) на расстоянии 2 см.

Спектры поглощения в диапазоне 400-1100 нм (25000-9091 см-1) были получены в режиме отражения с помощью спектрофотометра LOMO SF-56, оснащенного приставкой диффузного отражения PDO-6. В этой установке сигнал измеряется после многократного отражения внутри полой фарфоровой сферы, в стенке которой имеется отверстие для образца. Размер светового пятна на образце составлял 3×11 мм, спектральная ширина полосы (разрешение) спектрофотометра – 1 нм.

Для отжига образцов использовалась программируемая муфельная печь Rinom-M3. Режим нагрева включал повышение температуры со скоростью 2 °C/мин до 550°C, поддержание этой температуры в течение одного часа, а затем охлаждение печи с образцами внутри в течение более суток.

Для ускорения релаксации цвета образцов при фотографировании (не в лабораторных условиях) использовался светодиодный источник ZHIYUN CINEPEER CM (LED) с мощностью 25 Вт.

Экспериментальная часть

Для фотографической фиксации изменения цвета использованы два фрагмента исходного образца барита, представляющего собой сросток сильно расщепленных кристаллов (Рис. 1). Левый фрагмент являлся контрольным и не подвергался никаким воздействиям. Правый фрагмент был экспонирован УФ – излучением в следующей последовательности: 10 мин. LW → 10 мин. SW → 30 мин. SW → (отжиг при 550 °C) → 45 мин. SW.

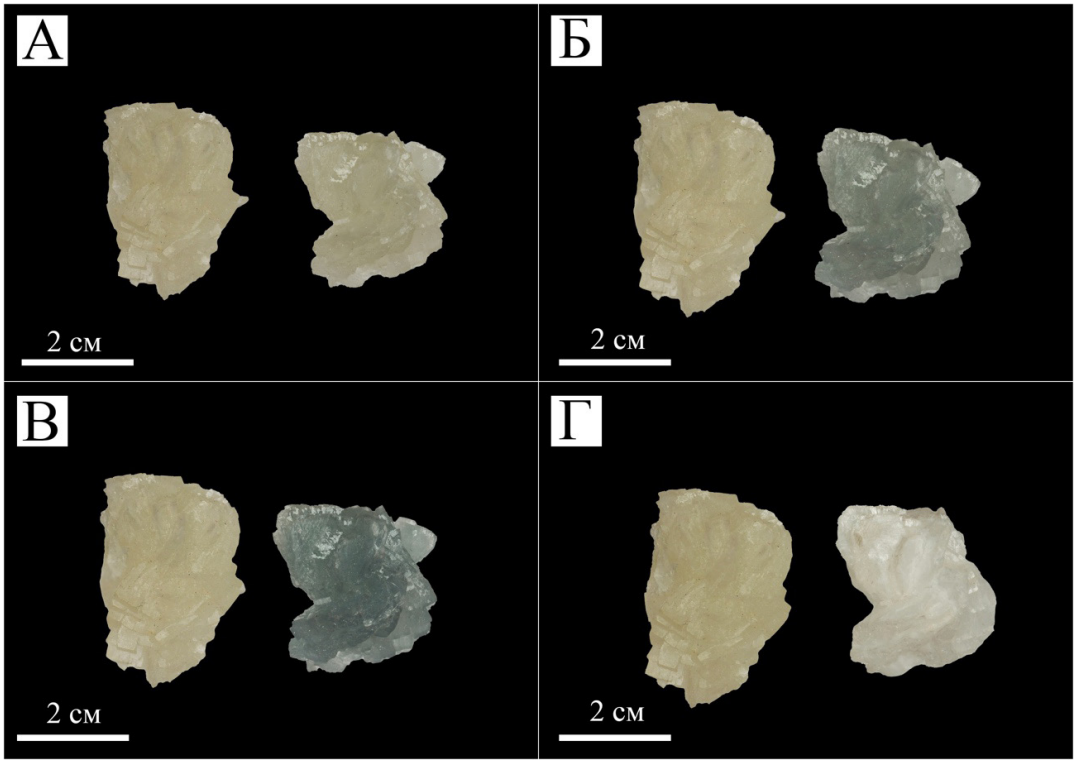


Рис. 1. Образцы барита. На каждой фотографии фрагмент слева – контрольный, фрагмент справа – экспериментальный. А) 10 минут экспозиции излучения с длиной волны 365нм (LW); Б) 10 минут экспозиции излучения с длиной волны 254 нм (SW); В) 30 минут экспозиции излучения с длиной волны 254 нм (SW); Г) Отжиг в течение 45 минут при 550°С и облучение УФ-светом 254 нм. Фотографии С.В. Вяткина.

По результатам серии экспериментов с УФ – облучением и отжигом можно констатировать, что излучение с длиной волны 365 нм (LW) практически не влияет на цвет образца. Напротив, даже 1 минута экспозиции излучения с длиной волны 254 нм (SW) приводит к легкому изменению окраски (фотография не добавлена), а уже 10 минут к заметным изменениям окраски, возрастающим с увеличением времени и дозы облучения. Отжиг в течение часа при 550°С приводит к полному разрушению всех центров окраски, включая первичную светло-желтую. Этот процесс необратим, образец более не приобретает какого-либо оттенка после повторного 254 нм -УФ-облучения в течение 45 мин.

ЭПР – исследования проводились на порошке, изготовленном из природного образца, который был снят до и после его облучения 254 нм – УФ в течение 41 мин. (суммарный эквивалент дозы, полученной сростком кристаллов при фотофиксации). Спектры приведены на (Рис. 2). Спектр ЭПР порошкового образца после отжига не приведен, т.к. является прямой фоновой линией (отсутствие парамагнитных центров).

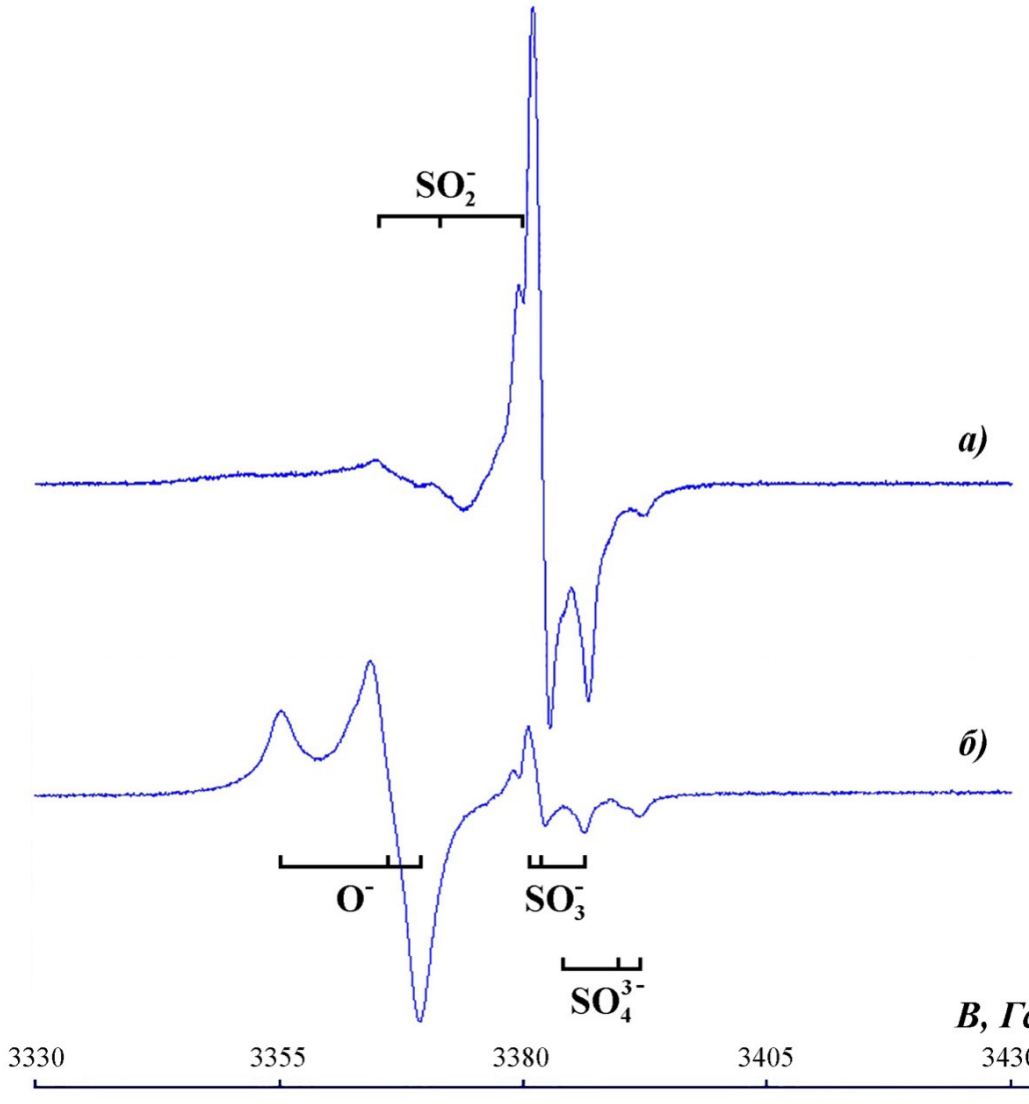


Рис. 2. Фрагмент спектров ЭПР. а) до облучения, б) после облучения.

Идентификация центров на полученных спектрах ЭПР произведена согласно g-факторам, приведенным в работе [2]. Можно отметить, что в природном состоянии образца максимальна концентрация центра SO_3^-, остальные центры содержатся в значительно меньшем количестве. После облучения УФ-светом содержание центра SO_3^- снижается в несколько раз, концентрации центров SO_2^- и SO_4^{3-}, изменяются слабо. Главным отличием спектров является содержание структурного центра O^-, практически отсутствующего в природном образце и становящегося основным парамагнитным дефектом после облучения УФ-светом с длиной волны 254 нм.

На спектре поглощения исследованного барита в видимой области после облучения 254 нм в течение 41 мин появляется полоса поглощения с центром при ~630 нм (Рис. 3). Эта полоса является очень широкой, она захва-

тывает почти весь видимый диапазон и безусловно определяет возникающую окраску. Спектр имеет еще одну особенность – структурированный пик («гребенка» из 6-ти локальных максимумов), расположенный в области 400 – 525 нм, представленный в натуральном образце и сохраняющийся после облучения.

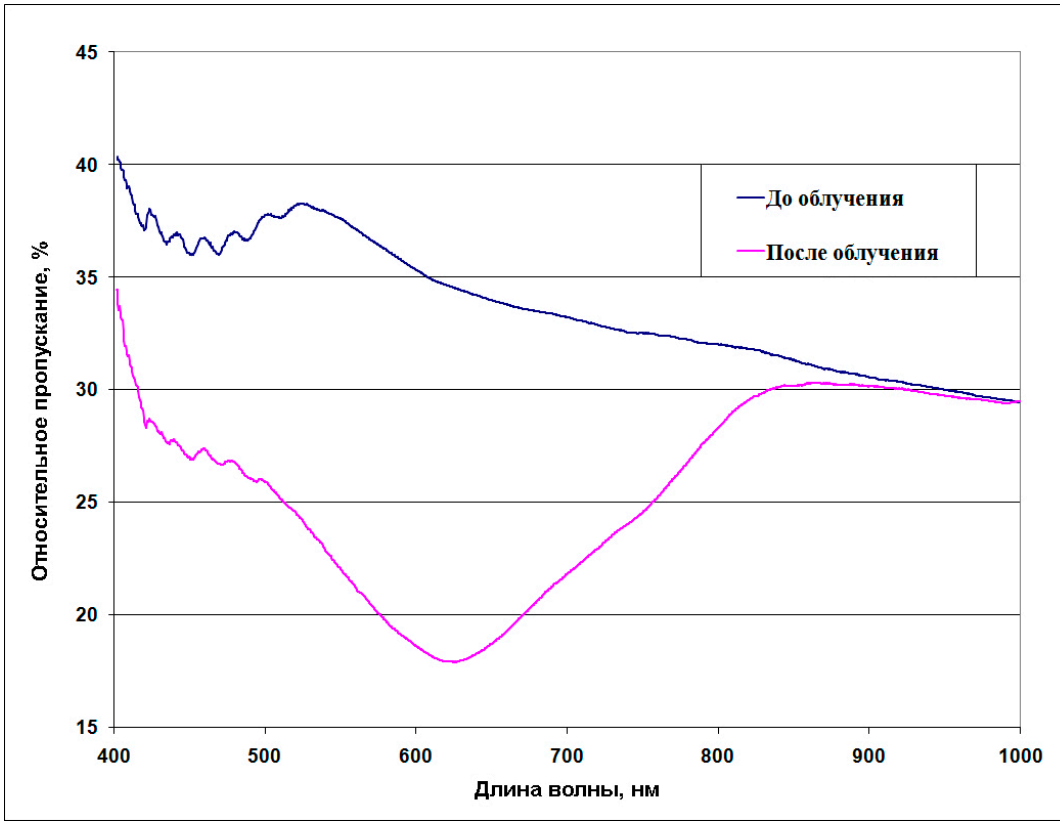


Рис. 3. Спектры поглощения.

Для фотофиксации эффекта фотохромизма был взят образец, который уже находился на солнечном свету, а затем в течение года лежал в темноте (Рис. 4А). Для облучения УФ-светом использовался фонарь с длиной волны 310 нм (MW). Для релаксации цвета – светодиодный источник (LED). Образец был экспонирован в следующей последовательности: исходный образец →3 мин. MW (Рис. 4Б)→ 5 мин. LED (Рис. 4В)→3 мин. MW (Рис. 4Г) → 3 мин. LED (Рис. 4Д)→3 мин. MW (Рис. 4Е)→ экспонирование светом LED в течение часа + 24 часа нахождения в темноте (Рис. 4Ж)→3 мин. MW (Рис. 43).

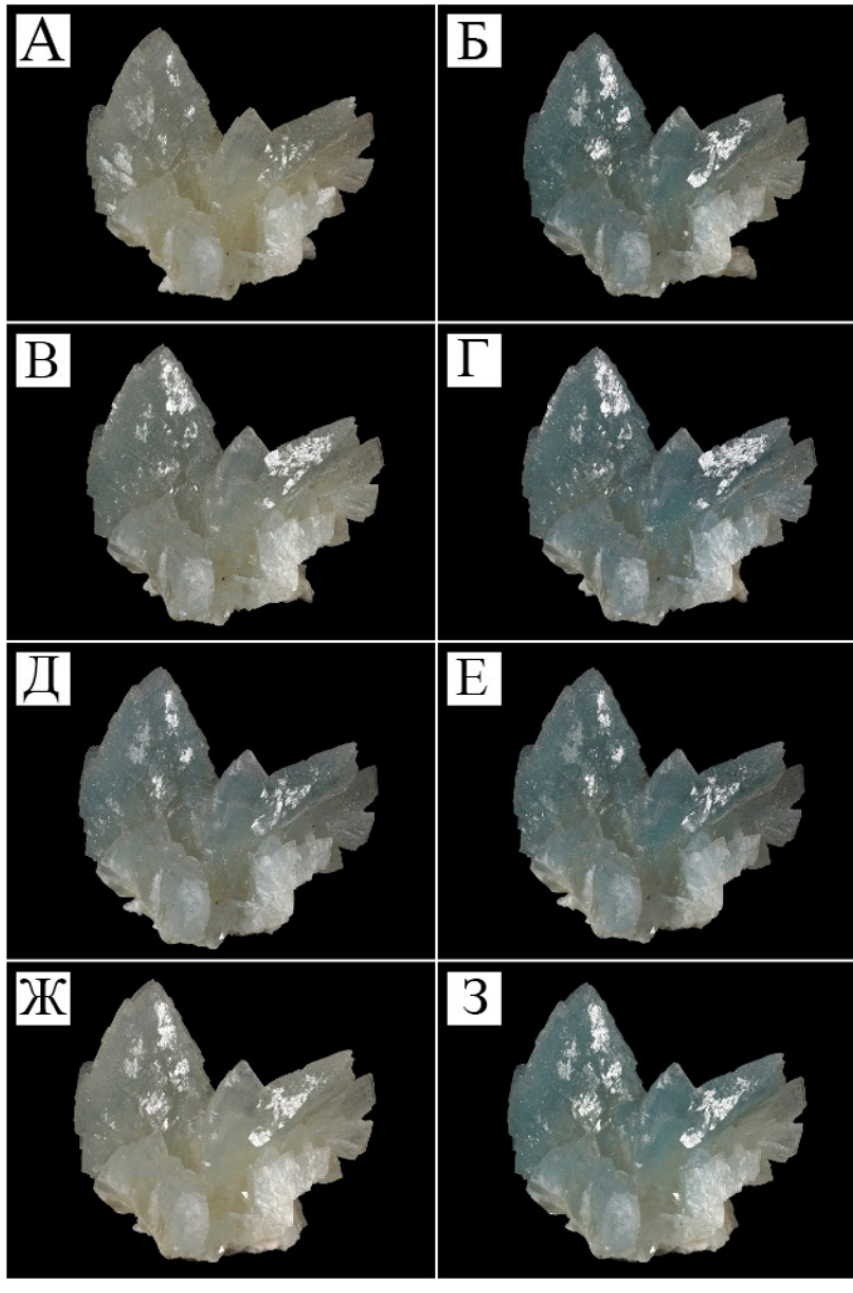


Рис. 4. Эффект фотохромизма в барите. А) Образец, находивший на солнечном свету и убранный на год в темное место. Цвет желтоватый с оттенком серого; Б) Образец после трехминутного облучения УФ; В) Образец после LED источника, 5 минут; Г) Образец после трехминутного облучения УФ; Д) Образец после LED источника, 3 минуты; Е) Образец после трехминутного облучения УФ; Ж) Образец после часа экспонирования LED источником и после суток нахождения в темноте. Цвет желтоватый с оттенком серого; З) Образец после трехминутного облучения УФ.
Размер образца 3 х 2 см. Фотографии Л.В. Бадьяновой.

Обсуждение

Следует отметить, что оттенок голубого барита сходен с окраской голубого целестина. В работе [4] голубая окраска целестина связывается с поглощением в видимой области структурных центров SO_3^-, SO_2^- и O^-, при этом стабилизация этих центров в кристаллической решетке целестина объясняется присутствием ионов K^+, замещающих Sr^{2+}.

В работе [10] исследовано изменение окраски образцов барита различного генезиса под действием γ–облучения от источника ^{60}Co. Отмечается, что «до облучения в спектрах ЭПР всех образцов парамагнитные центры отсутствовали». По-видимому, картины ЭПР-спектров исследованных баритов в исходном состоянии обязаны своим возникновением воздействием природному облучению, обусловленному относительно высоким содержанием U и Th в баритах Белореченского месторождения. Центральная часть спектра ЭПР на (Рис. 2) связана с радикалом SO_3^-, что согласуется с данными Р.А. Хасанова [2]. И также следует согласиться с выводом авторов о том, что изменения содержания этого радикала не являются причиной окраски («потемнения» - в работе [10]), равно как и голубой окраски в настоящем исследовании). А вот увеличение интенсивности пиков O^- (в левой части спектра ЭПР на Рис. 2), по мнению авторов [10], связано с изменением окраски. И этот вывод также подтверждается нашим исследованием.

Появление широкой полосы при ~630 нм на спектре поглощения, по нашим данным, напрямую коррелирует только с резким увеличением концентрации центров O^- на спектре ЭПР. Эмпирически именно с этим мы связываем появляющуюся серо-голубую окраску барита.

Шесть локальных максимумов в области 400 – 525 нм предположительно можно связать с возбуждением люминесценции дырочного центра S^{2-} в барите при съемке спектра поглощения. Картина подобна спектру люминесценции [1].

Предварительные выводы

Фотохромизм барита Белореченского месторождения возникает благодаря центру O^-. Образование центра облегчено благодаря значительной концентрации дефектов в структуре. Отжиг при 550 °C приводит к исчезновению, «залечиванию» дефектов, без которых восстановление окраски УФ-облучением становится невозможным.

Образцам достаточно трехминутного облучения УФ-светом с длиной волны 310 нм и мощностью 5 Вт или около 10 минут облучения 254 нм мощностью 4 Вт, чтобы получить интенсивный голубой цвет. УФ-излучение в течение 10 минут с длиной волны 365 нм не оказывает существенного влияния на оптические свойства образцов.

Список литературы:

1. Горобец Б. С., Рогожин А. А. Спектры люминесценции минералов: справочник. — М.: ВИМС, 2001. — 312 с.
2. Хасанов Р. А., Низамутдинов Н. М., Королев Э. А., Хасанова Н. М., Ахманов Г. Г. ЭПР-исследования тонких особенностей кристаллической структуры баритовой редкой минерализации // Тезисы Итоговой научной конференции Казанского университета. — 2019.
3. Bartoshinsky V. Z., Shumsky A. A., Larkiov A. L., Dersky L. S. Paramagnetic and optically active centers in barytes of the Ukraine (in Russian) // MineralogicheskiiZhurnal. — 1991. — Vol. 13. — P. 73–78.
4. Bernstein L. R. Coloring mechanisms in celestite // American Mineralogist. — 1979. — Vol. 64. — P. 160–168.
5. Belsher D. R., Baldwin C. E. An occurrence of barite at Hartsel, Colorado // Mineralogical Record. — 1980. — Vol. 11, № 1. — P. 23–25.
6. Blumentritt F., Fritsch E. Photochromism and photochromic gems: a review and some new data (Part 1) // Journal of Gemmology. — 2021. — Vol. 37, № 8.
7. Blumentritt F., Fritsch E. Photochromism and photochromic gems: a review and some new data (Part 2) // Journal of Gemmology. — 2022. — Vol. 38, № 1. — P. 80–92.
8. Carlon J., Winchell J. R. New barite find in southern Illinois // Mineralogical Record. — 1975. — Vol. 6, № 5. — P. 235–236.
9. King R. J. Minerals explained 6: baryte // Geology Today. — 1987. — Vol. 3, № 1. — P. 21–24.
10. Picariello P., Berger S., Tartaglia M., Weller D., He S., Gorai P., Brennecka G. L. Origins of gamma-induced darkening of $BaSO_4$ // Radiation Physics and Chemistry. — 2025. — Vol. 228.
11. Sandalov F. D., Vyatkin S. V., Artemyev D. A., Taskaev V. I., Rassomakhin M. A., Strelnikov M. V., Sandalova E. V. Nature of photochromic effect in diopside from the Bazhenovskoe deposit (Middle Urals, Russia): insights from chemical and spectroscopic study//Mineralogical Magazine. – 2026.P.1-32.

ОБ ОПЫТЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА CHN-АНАЛИЗА С ГАЗОХРОМАТОГРАФИЧЕСКИМ ОКОНЧАНИЕМ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ МИНЕРАЛОВ В МИНЕРАЛОГИЧЕСКОМ МУЗЕЕ ИМ. А.Е. ФЕРСМАНА РАН

Карпенко В.Ю[1]., Паутов Л.А. [1], Агаханов А.А. [1]

[1] Минмузей РАН, г. Москва

Аннотация. Показан опыт использования CHN-анализатора с газохроматографическим окончанием Carlo Erba 1106 при анализе углерода, водорода и азота в минералах в лаборатории Минмузея РАН. Приводится краткое описание методики анализа. В табличной форме приведены сведения о минералах, в том числе и новых, проанализированных в лаборатории. Среди новых минералов особо выделяются акоповаит и чийокоит, в которых на долю (CO_2 + H_2O) приходится от 46 до 54 % вес. химического состава. В качестве сравнения приведены результаты анализов, полученные на аналогичном приборе для ряда новых минералов в Австралийском Национальном Университете. Приведены рекомендованные величины минимальных навесок в зависимости от предполагаемого содержания азота, углерода и водорода в минералах.

Ключевые слова: *CHN-анализ, азот, углерод, водород, Carlo Erba 1106, новые минералы, акоповаит, чийокоит, манаевит, ферроефремовит, фольбортит, баратовит, катаямалит*

Метод элементного органического анализа (CHN-анализа) с одновременным определением углерода, водорода и азота из одной навески в органических веществах был разработан еще в первой половине XIX в. Ю. фон Либихом, усовершенствован Ж.-Б. Дюма, а в начале XX в. воплощен в микрохимическом варианте Ф. Преглем (напр., Карпенко-Ереб, Шапошник, 2012; Jonson, 2022 и мн. др.). В 1960-70-х гг. благодаря внедрению катарометров (детекторов по теплопроводности) в практику CHN-анализа вошло газохроматографическое окончание (Pella, Colombo, 1973), что позволило значительно ускорить процедуру анализа и уменьшить массу навесок вплоть до 0.1 мг. В настоящее время элементный анализ с газохроматографическим окончанием является одним из востребованных при исследованиях в разных областях, в первую очередь при анализе органических веществ в химических производствах, медицине, фармацевтике. Известен опыт применения метода и при изучении минералов. Так, в Австралийском Национальном Университете (г. Канберра, Австралия) использовался CHN-анализатор Carlo Erba 1106 (пр-во Италия) при анализе некоторых новых фосфатов (ангастонита, капундаита, нордгауита) и вампенита $C_{18}H_{16}$ (Birch et al., 2011; Mills et al., 2008, 2010, 2017). Аналогичный прибор уже более 15 лет функционирует в лаборатории Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН. Поскольку метод редко используется минералогами, вкратце приведем методику анализа, общий ход которого применим не только к конкретной модели, выпущенной в середине 1980-х годов, но и большинству современных приборов. Проба веще-

ства (0.5 - 7 мг), помещенная в небольшую капсулу весом 7-8 мг из оловянной фольги и взвешенная на микроаналитических весах с точностью до 10^{-3} мг (в лаборатории используются микровесы Radwag MYA 4Y), вводится в шлюз автосамплера (в нашем случае возможна загрузка до 100 образцов). В течение нескольких минут проба омывается током высокочистого гелия (99.9999 % объемн.), после чего проба из шлюза проваливается в сжигательную трубку, разогретую до 1030°C и заполненную гранулированным оксидом хрома (III). В качестве газа-носителя используется гелий указанной чистоты, который со строго постоянной скоростью (25±0.25 мл/мин) протекает по двум каналам - аналитическому и сравнения. С задержкой в 15 - 20 секунд в поток гелия после попадания пробы вводится дозированная порция кислорода высокой чистоты, в результате чего происходит сгорание оловянной капсулы вместе с веществом в виде мгновенной вспышки, при этом температура в зоне вспышки локально достигает 1800-2000°C. Происходит количественное окисление углерода и водорода до CO_2 и H_2O, наполнитель трубки (оксид хрома III) играет в данном случае роль катализатора реакции. В случае присутствия в пробе азота последний образует оксиды, которые по пути количественно восстанавливаются до элементарного азота (при T= 650°C) в восстановительной трубке, заполненной губчатой медью. Для удаления компонентов, которые могут давать паразитные пики и нежелательные наложения (сера, галогены), в сжигательную трубку помещаются дополнительные реагенты, например, гранулированная смесь ($MgO + CeO_2$) для фиксации фтора, Co_3O_4, импрегнированный серебром для улавливания других галогенов, WO_3 для задержки серы (Pella, Colombo, 1973; Мирошина и др., 1992; Фадеева и др,, 2008). Далее газообразные продукты поступают на хроматографическую колонку, наполненную адсорбентом Porapak QS (T = 100°C), после чего попадают на детектор по теплопроводности. Отметим, что в приборе также реализована возможность анализа кислорода и серы (Swindall, Burns, 1988; Мирошина и др., 1992), в этом случае каналы сравнения и аналитический для CHN-анализа, меняются местами. Результаты анализа выводятся в виде хроматограммы на самописец, либо через интерфейс с использованием программного обеспечения Hromat собственной разработки, типичный вид рабочего листа с хроматограммой приведен на рисунке, где по горизонтальной оси отложено время, по вертикальной – условные единицы интенсивности сигнала АЦП. Программа интегрирует площади пиков, которые прямо пропорциональны концентрации соответствующих компонентов. В качестве стандартных образцов, а также внутренних эталонов сравнения используются как органические (сульфаниламид, бензойная кислота, ацетанилид), так и неорганические вещества ($CaCO_3$, NH_4Cl и др.), или минералы с заведомо известным составом, в процессе анализа не менее 3-х раз снимается нулевой фон. Длительность одного анализа составляет, как правило, 10-12 минут.

В табл.1 представлены результаты анализов ряда минералов, выполненные на анализаторе Carlo Erba 1106 в нашей лаборатории; в качестве сравнения приведены также результаты, полученные в лаборатории микрохимического анализа в Австралийском Национальном Университете. Среди новых

минералов особо следует отметить акоповаит и чийокоит (Karpenko et al., 2020; Lykova et al., 2020), в которых на долю CO_2 и H_2O приходится от 46 до 54 % вес. химического состава. В силу дефицита чистого материала, взятые для них навески были относительно малы (0.5 – 0.7 мг). При анализе акоповаита в качестве стандартного образца был использован близкий по структуре гидроталькит известного состава с места первого описания (Snarum, Норвегия). Анализ был осложнен присутствием в пробе гидроксида алюминия, количество которого, предварительно было определено другими методами.

Комплекс аналитических методов, в том числе и CHN-анализ, выполненный для минералов ряда баратовит-катаямалит из щелочных массивов Дараи-Пиоз (Таджикистан) и Ходжа-Ачкан (Кыргызстан), позволил сделать вывод, что большинство анализов серии сосредоточены в области промежуточного состава $KLi_3Ca_7Ti_2[Si_6O_{18}]_2(F_{0.5}OH_{0.5})_2$ (Паутов и др., 2013). Детальное изучение образцов «узбекита» с места первого описания (Кара-Чагыр, Кыргызстан) показало, что минерал является Ni-Zn-содержащим фольбортитом, содержание воды, определенные на CHN –анализаторе, оказалось практически совпадающим с расчетным (Карпенко и др., 2016). В целом, относительная ошибка определений по нашим наблюдениям не превышает 4%, составляя в среднем 1 - 2 %.

У. Свинделл и Д. Бернс (Swindall, Burns, 1988) провели большую статистическую работу по оптимизации выбора массы навески, где показали, что оптимальными для анализатора модели CE 1106 являются навески 0.7 -1 мг, при этом следует использовать как минимум два стандартных образца, чтобы можно было сравнивать правильность результатов. Однако авторы использовали в работе органические вещества, в которых концентрации водорода и углерода достаточно высоки по сравнению с большинством минералов. Для того, чтобы понять, какой порядок навески требуется для CHN-анализа в случае с минералами, мы экспериментально провели подсчет минимальных количеств азота, углерода и водорода, которые бы дали пики, в 3 раза превышающие площади фоновых пиков N_2, CO_2 и H_2O и получили следующие величины (мкг): для азота – 13, углерода – 4.6 и водорода – 4.2. В таблице 2 эти данные представлены в виде зависимости минимальной массы навески от концентрации того или иного компонента.

Авторы выражают особую благодарность С. Езубченко, благодаря которому появилась возможность создания интерфейса и программного обеспечения Hromat, а также В.Д. Тиховой за регулярные консультации по методике анализа и эксплуатации прибора.

Таблица 1. Содержания углерода, водорода и азота (в % вес. указанных компонентов), определенные методом CHN-анализа в лабораториях Минмузея РАН (г. Москва) и Австралийского Национального Университета (г. Канберра, Австралия).

Название минералов	Формула минерала	H_2O,	CO_2	NH_3	Навеска, мг	Ссылки
Акоповаит (надгруппа гидроталькита)	$Li_2Al_4(OH)_{12}(CO_3)•3H_2O$	36.1[1] (36.9)	10.1[1] (10.0)		0.670 0.495	Karpenko et al., 2020
Чийокоит	$Ca_5Si(CO_3)[B(OH)_4]_{0.5}(AsO_3)_{0.5}(OH)_6 •12H_2O$	46.3 (45.95)	7.30 (7.01)		0.593	Lykova et al., 2020
Манаевит (гр. везувиана)	$Ca_{11}(Ce,Ca,H_2O)_8Mg(Mg,Al)_4(Mg, Fe^{3+},Ti)_8[Si_2O_7]_4[(SiO_4)_8(H_4O_4)_2](OH)_9$	5.96 (5.75)			2.55	Moiseev et al, 2020
Ферроефремовит	$(NH_4)_2Fe^{2+}_2(SO_4)_3$			7.97 (7.81)	1.18	Kasatkin et al., 2021
Фольбортит («узбекит»)	$(Cu,Ni,Zn)_3V_2O_7(OH)_2•2H_2O$	11.37[2] (11.39)			от 1.00 до3.00	Карпенко и др., 2016
Баратовит – катаямалит (ряд)	$KLi_3Ca_7Ti_2[Si_6O_{18}]_2F_2$ - $KLi_3Ca_7Ti_2[Si_6O_{18}]_2(OH)_2$	0.61[3] 0.64[4] (0.65)[5]			от 2.00 до 7.00	Паутов и др., 2013
Кокониоит	$Fe_2Al_2(UO_2)_2(PO_4)_4(SO_4)(OH)_2 •20H_2O$	22.7			1.68 1.85	Карпенко и др., 2020
Нордгауит	$MnAl_2(PO_4)_2(F,OH)_2•5H_2O.$	22.86			-	Birch et al., 2011
Ангастонит	$CaMgAl_2(PO_4)_2(OH)_4•7H_2O$	31.4 (32.29)			-	Mills et al., 2008
Капундаит	$(Na,Ca)_2Fe^{3+}_4(PO_4)_4(OH)_5•5H_2O$	14.22 (14.51)			-	Mills et al., 2010
Вампенит[6]	$C_{18}H_{16}$	7.6 (7.96)	92.5 (93.04)		-	Mills et al., 2017

Примечания: жирным шрифтом выделены новые минералы, в скобках приведены теоретические значения (если указаны в работе). Величины навесок для анализов, полученных в Австралийском Национальном Университете, в работах не указаны. [1]-среднее по двум определениям; [2]- среднее по 3-м определениям; [3]- данные для массива Ходжа-Ачкан (среднее по трем определениям); [4]- данные для массива Дараи-Пиоз (среднее по трем определениям); [5]- теоретическое значение приведено для фазы $KLi_3Ca_7Ti_2[Si_6O_{18}]_2(F_{0.5}OH_{0.5})_2$; [6]- приведены данные для H и C, соответственно.

Табл. 2. Зависимость минимальной навески от концентрации измеряемых компонентов применительно к CHN анализатору Carlo Erba 1106.

% вес (N_2, CO_2 или H_2O)	Минимальные навески вещества (мг) при ожидаемой концентрации компонента, приведенной в первой колонке		
	N	CO_2	H_2O
0.50	2.60	3.40	7.60
1%	1.30	1.70	3.80
2%	0.65	0.90	1.90
5%	0.30	0.40	0.75
10%	0.15	0.20	0.40

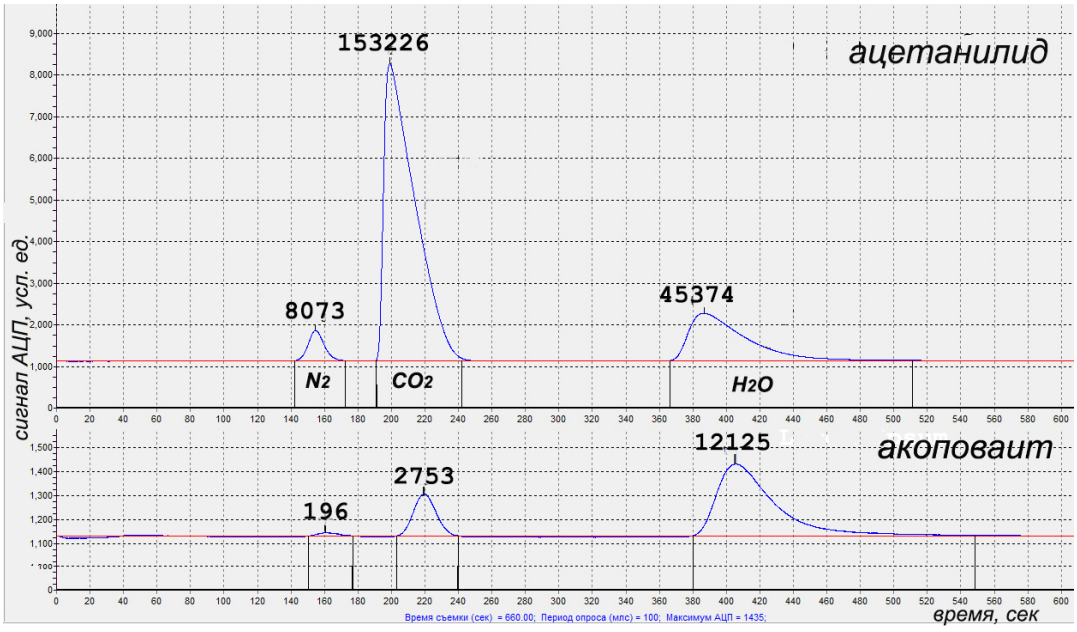


Рис. Пример хроматограмм ацетанилида C_8H_9NO (стандартный образец) и акоповаита. $Li_2Al_4(OH)_{12}(CO_3)•3H_2O$. Цифры над пиками означают площади данных пиков в условных единицах. Количество вещества применительно к конкретным хроматограммам следующее – для ацетанилида (навеска 1.079 мг) – N = 111.8 мкг, C = 767 мкг, H = 72.4 мкг, для акоповаита (навеска 0.495 мг) – N отсутствует (небольшой пик соответствует фоновому значению), C = 11.7 мкг, H = 19.3 мкг.

Список литературы

1. Карпенко В.Ю., Паутов Л.А., Агаханов А.А. Ni-Zn-содержащем фольбортите («узбеките») из ванадиеносных сланцев Южной Киргизии // Новые данные о минералах, 2016 – Вып. 51 – С. 20 – 29.

2. Карпенко, В. Ю., Паутов, Л. А., Шодибеков, М., Махмадшариф, С., Мираков, М. А. Кокониноит: находка на рудопроявлении Зор-Ярчи-Чак, Восточный Памир // Новые данные о минералах, 2020 – Т. 54(1) – С. 19 – 25.

3. Карпенко-Ереб Л. В., Шапошник В.А. Фритц Прегль - создатель метода количественного элементного микроанализа органических соединений // Журнал аналитической химии. – 2012 – Т. 67, № 6 – С. 661 – 663.

4. Мирошина В.П., Дубина Е.М. Кусова Т.Л., Васильева Г.С. Опыт использования анализатора 1106 Карло Эрба (Италия) для автоматического CHN-, S-, O- анализа органических веществ // Журнал аналитической химии. – 1992 – Т. 47, № 6 – С. 1112 – 1117.

5. Паутов Л.А., Карпенко В.Ю., Агаханов А.А. Минералы ряда баратовит – катаямалит из пород Ходжа-Ачканского щелочного массива (Киргизия) // Новые данные о минералах. 2013. – Т. 48 – С. 13 – 33.

6. Фадеева В.П., Тихова В.Д., Никуличева О. Н. Элементный анализ органических

соединений с использованием автоматизированных CHNS- анализаторов // Журнал аналитической химии. – 2008 – Т. 63, № 11 – С. 1197 – 1210.

7. Birch W. D., Grey I. E., Mills S. J., Pring A., Bougerol C., Ribaldi-Tunnicliffe A., Wilson N. C., Keck E. Nordgauite, $MnAl_2(PO_4)_2(F,OH)_2 \cdot 5H_2O$, a new mineral from the Hagendorf-Süd pegmatite, Bavaria, Germany: description and crystal structure // Mineralogical Magazine. – 2011 – V. 75(2) – P. 269 – 278.

8. Borda P. Determination of Oxygen in Inorganic Compounds Using Pyrolysis-Gas Chromatography // Mikrochimica Acta [Wien]. – 1985 – V. 85 – P. 87 – 94.

9. Johnson B. Making Ammonia. Fritz Haber, Walther Nernst, and the nature of scientific Discovery. Springer Cham, 2022 – 278 p.

10. Karpenko V.Y., Zhitova E.S., Pautov L.A., Agakhanov A.A., Siidra O.I., Krzhizhanovskaya M.G., Rassulov V.A., Bocharov V.N. Akopovaite, $Li_2Al_4(OH)_{12}(CO_3)(H_2O)_3$, a new Li member of the hydrotalcite supergroup from Turkestan Range, Kyrgyzstan // Mineralogical Magazine. – 2020 – V. 84(2) – P. 301 – 311.

11. Kasatkin A.V., Plášil J., Škoda R., Campostrini I., Chukanov N.V., Agakhanov A.A., Karpenko V.Y. and Belakovskiy D.I. Ferroefremovite, $(NH_4)_2Fe^{+2}_2(SO_4)_3$, a new mineral from Solfatara di Pozzuoli, Campania, Italy // Canadian Mineralogist. – 2021 – V. 59(1) – P. 59 – 68.

12. Lykova I.S., Chukanov N.V., Pekov I.V., Yapaskurt V.O., Pautov L.A., Karpenko V.Yu., Belakovskiy D.I., Varlamov D.A., Britvin S.N., Scheidl K.S. Chiyokoite, $Ca_3Si(CO_3)[B(OH)_4]O(OH)_5 \cdot 12H_2O$, a new ettringite-group mineral from the Fuka mine, Okayama Prefecture, Japan // The Canadian Mineralogist. – 2020 – V. 58(5) – P. 653 – 662.

13. Mills S. J., Birch W. D., Kampf A. R., Christy A. G., Pluth J. J., Pring A., Raudsepp M., Chen Y. S. Kapundaite, $(Na,Ca)_2Fe^{3+}_4(PO_4)_4(OH)_3 \cdot 5H_2O$, a new phosphate species from Toms quarry, South Australia: Description and structural relationship to mélonjosephite // American Mineralogist. – 2010 – V. 95(5) – P. 754 – 760.

14. Mills, S. J., Groat, L. A., Wilson, S. A., Birch, W. D., Whitfield, P. S., Raudsepp, M. (2008) Angastonite, $CaMgAl_2(PO_4)_2(OH)_4 \cdot 7H_2O$: a new phosphate mineral from Angaston, South Australia. Mineralogical Magazine, 72 (5) 1011-1020

15. Mills S.J., Kampf A.R., Nestola F., Williams P.A., Leverett P., Hejazi L., Hibbs D.E., Mrorsko M., Alvaro M., Kasatkin A.V. Wampenite, C18H16, a new organic mineral from the fossil conifer locality at Wampen, Bavaria, Germany // European Journal of Mineralogy. – 2017 – V. 29(3) – P. 511 – 515.

16. Moiseev M.M., Panikorovskii T.L., Aksenov S.M., Mazur A.S., Mikhailova J.A., Yakovenchuk V.N., Bazai A.V., Ivanyuk G.Yu., Agakhanov A.A., Shilovskikh V.V., Pekov, I.V., Kasatkin A.V., Rusakov V.S., Yapaskurt V.O., Karpenko V.Yu., Krivovichev S.V. Insights into crystal chemistry of the vesuvianite-group: manaevite-(Ce), a new mineral with complex mechanisms of its hydration // Physics and Chemistry of Minerals. – 2020 – V. 47(18) – P. 1 – 14.

17. Pella, E. and Colombo, B. Study of carbon, hydrogen and nitrogen determination by combustion-gas chromatography // Mikrochim. Acta, – 1973 – V. 61 – P. 697 – 719.

18. Swindall W.J., Burns D.T. Improvements to the CHN performance of a Carlo-Erba 1106 elemental analyser by blank evaluation, drift correction using a pair of dissimilar standards and modifications to the gas flow system // Fresenius Z. Anal. Chem. – 1988 – V. 331 – P. 730 – 734.

Минералогический музей
имени А.Е. Ферсмана РАН

310 ЛЕТ

ГЕММОЛОГИЧЕСКАЯ СЕКЦИЯ



1 октября 2026 года

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ЦВЕТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АЛЕКСАНДРИТОВ МЕТОДОМ ТЕРМООБРАБОТКИ В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

Ахметшин Э. А.[1] (*4966945@mail.ru*),
Смирнова В. В.[1] (*val.s.7865@mail.ru*)

[1]*Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева*

Аннотация: значительная доля природных александритов с различных месторождений характеризуется неудовлетворительными цветовыми характеристиками, что определяет необходимость разработки технологии целенаправленного улучшения их окраски. В серии экспериментов по нагреву в диапазоне 1100 – 1500°С авторами было установлено, что ключевым фактором термообработки является среда. Так, окислительная среда способствует просветлению чрезмерно насыщенных бразильских минералов и смещению их цвета в желто-зеленую область спектра. Восстановительная среда позволяет усиливать насыщенность окраски уральских камней.

Ключевые слова: *александрит, александритовый эффект, хризоберилл, термообработка.*

Введение

Александрит занимает особое положение на современном рынке самоцветов, поскольку при определении его коммерческой ценности, вводится дополнительная характеристика, несвойственная другим драгоценным камням – степень выраженности александритового эффекта. Наравне с вышеуказанным параметром, заметный вклад в формирование стоимости минерала вносят также цвет и происхождение [7].

Александритовый эффект, или реверс цвета, представляет собой явление изменения окраски в зависимости от источника освещения, которое обусловлено спектральными особенностями камня и света. В химическом составе александрита присутствует примесь хрома, трехвалентные ионы которого изоморфно замещают алюминий в кристаллической решетке хризоберилла ($BeAl_2O_4$). Данное замещение приводит к формированию в видимой области спектра минерала двух максимумов поглощения в диапазоне 420 и 580 нм, соответствующих электронным переходам $^4A_{2g} \rightarrow {}^4T_{1g}$ и $^4A_{2g} \rightarrow {}^4T_{2g}$. При их достаточной интенсивности, становится возможной избирательная чувствительность минерала к источникам освещения. Поэтому при дневном свете, в спектре которого преобладают сине-зеленые волны, цвет камня воспринимается зеленым. А при искусственном освещении, с преобладанием красных лучей, кристаллы александрита выглядят красными [2-4].

На сегодняшний день месторождения александрита известны в России, Бразилии, Индии, Шри-Ланке, Танзании [7]. Крупнейшими поставщиками высококачественных кристаллов на мировой ювелирный рынок традиционно считаются уральские месторождения вблизи посёлка Малышева (Россия) и регион Минас-Жерайс (Бразилия). Российские александриты являются

эталонными по качеству, демонстрируя классическую смену окраски с голубовато-зелёной на пурпурно-красную. Однако в связи с практически полным исчерпанием промышленных запасов месторождения, добыча высококачественных кристаллов в настоящее время крайне ограничена, в переработку вовлекается низкокачественное сырьё, ранее размещавшееся в отвалах. Такие кристаллы характеризуются слабой насыщенностью окраски и слабо выраженным александритовым эффектом. Бразильские кристаллы, напротив, часто обладают чрезмерной насыщенностью цвета при слабо проявленном реверсе окраски [7]. В обоих случаях наблюдается снижение коммерческой ценности александритового сырья.

Разработка эффективной технологии термообработки, направленной на улучшение цветовых характеристик александрита, позволит повысить коммерческую ценность низкокачественного и ранее невостребованного сырья за счёт целенаправленного формирования ювелирно привлекательной окраски и усиления александритового эффекта. В качестве метода модифицирования цветовых характеристик была выбрана термообработка в силу ряда преимуществ: она затрагивает весь объём камня, характеризуется долговременным и необратимым эффектом при нормальных условиях эксплуатации, является безопасной для человека и представляет собой один из наиболее экономичных и технологически доступных способов облагораживания ювелирных камней. Важная особенность термообработки заключается во влиянии не только на валентное состояние ионов примесных металлов, ответственных за окраску, но и на их структурную локализацию. Кроме того, в современном мире термообработка широко применяется для улучшения или изменения цветовых характеристик широкого спектра ювелирных камней [1].

Экспериментальная часть

Исследование влияния термического воздействия на цветовые характеристики природных александритов уральского и бразильского происхождения проводилось следующим образом. Из партий кристаллосырья с обоих месторождений были отобраны три группы образцов, характеризующихся различными оттенками при дневном освещении, степенью выраженности и цветом флуоресценции в ультрафиолетовом свете. Оценка цвета кристаллов александрита осуществлялась по системе GemSet GIA. Все минералы обладали неявно выраженным александритовым эффектом. Параметры кристаллов каждой из групп приведены в таблице 1:

Табл. 1. Цветовые характеристики групп александритов, отобранных для экспериментальной работы

Номер группы	Происхождение	Цвет при белом свете	Степень выраженности и цвет флуоресценции
1	Урал	Светло-зеленый (vslbG 2/1)	Умеренная красная (R 3/3)
2	Урал	Голубовато-зеленый (bG2/1)	Сильная оранжево-красная (OR 5/5)
3	Бразилия	Темный голубовато-зеленый (bG7/6)	Отсутствует

Определение примесного состава было выполнено с помощью рентгеноспектрального энергодисперсного микроанализатора (EDS Oxford Instruments X-MAX-50) на базе сканирующего электронного микроскопа Tescan VEGA3-LMU (TESCAN ORSAY HOLDING). Результаты анализа приведены в таблицах 2 и 3.

Табл. 2. Химический состав уральских александритов

№ спектра Элемент	Весовые проценты, %							
	1	2	3	4	5	6	7	8
O	53.76	53.32	53.62	53.71	53.38	53.76	53.60	53.69
Al	45.12	45.51	45.26	45.26	45.56	45.25	45.32	45.25
Ti	0.34	0.36	0.27	0.25	0.30	0.19	0.22	0.20
Fe	0.77	0.81	0.85	0.78	0.76	0.80	0.85	0.87
Сумма	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

По результатам исследования видно, что в уральском александрите содержится порядка 0,8 вес.% ± 0,07% железа, концентрация хрома в них ниже порога обнаружения прибора (<0,01 вес.%). О наличии хрома в образцах свидетельствует наличие красной флуоресценции [6].

Табл. 3. Химический состав бразильских александритов

№ спектра Элемент	Весовые проценты, %						
	1	2	3	4	5	6	7
O	60.01	60.85	61.08	60.11	61.38	65.37	64.89
Na	2.75	2.18	3.34	2.50	2.27	0.20	0.19
Mg	5.87	4.37	3.53	8.16	5.00	0.24	0.21
Al	10.23	13.92	9.89	9.17	13.82	32.18	32.55
Si	16.56	12.51	17.75	16.31	12.51	0.97	1.11
K	2.39	2.31	2.37	1.95	1.94	0.07	0.10
Ca	0.71	1.01	0.81	0.63	0.69	0.07	0.06
Ti	0.09	0.16	0.08	0.08	0.13	-	-
Cr	0.07	0.10	0.05	0.06	0.13	0.25	0.18
Fe	1.31	2.60	1.11	1.03	2.13	0.66	0.72
Сумма	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Из приведенных в таблице 3 данных установлено, что бразильские камни содержат порядка 0,12 вес. % ± 0,07% хрома и 1,4 вес. % ± 0,7% железа. Согласно результатам анализа минералы с разных месторождений имеют принципиальные отличия в концентрациях примесей хромофорных элемен-

тов. В частности, по железу – в два раза, по хрому – на порядок. Такое различие объясняет различия в насыщенности окраски бразильских, отличающихся чрезмерной насыщенностью, и уральских, недостаточно интенсивно окрашенных, александритов.

Целью исследования влияния нагрева на цвет александритов являлось повышение насыщенности и усиление зеленых тонов окраски уральских александритов и осветление бразильских камней. Была проведена серия экспериментов по термообработке в диапазоне 1100 – 1500°С, с шагом в 50°С. Эксперименты проводились в электропечи марки «СНОЛ 12/16» с резистивным хромит лантановым нагревателем, позволяющей контролировать нагрев в диапазоне до 1600°С. Нагрев производился со скоростью 10°С/мин, после чего следовала выдержка при рабочей температуре в течение 1-3 часов. Среда термообработки задавалась при помощи реагентов, обладающих окислительно-восстановительной способностью. Окислительная термообработка проводилась на воздухе, восстановительная – в плотно закрытом контейнере с использованием восстановительного агента на основе углерода.

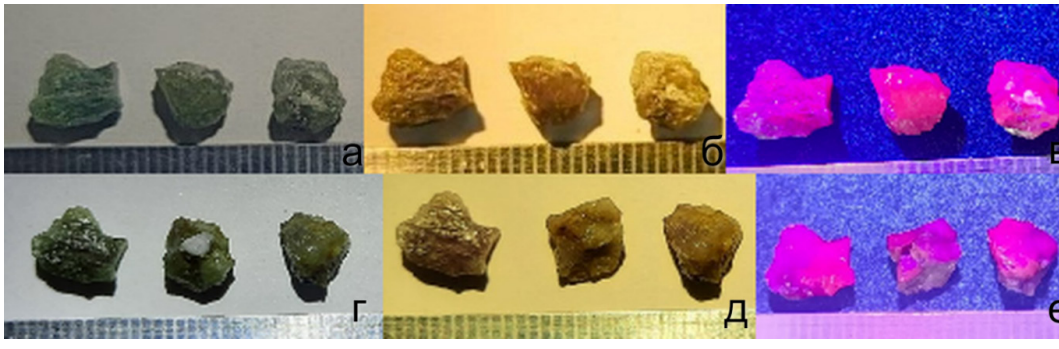


Рис. 1. Уральские александриты а, б, в - до термообработки; г, д, е - после окислительной термообработки при 1400°С в течение 3 ч; а,г - белый свет; б, д - желтый свет; в, е - УФ 254/365 нм

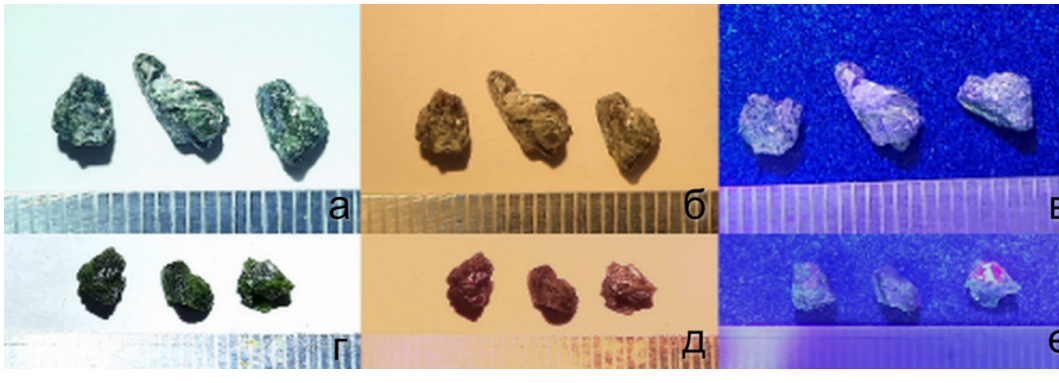


Рис. 2. Бразильские александриты а, б, в - до термообработки; г, д, е - после термообработки при 1450°С в течение 1 ч в окислительной среде; а,г - белый свет; б, д - желтый свет; в, е - УФ 254/365 нм

Результаты термообработки кристаллов уральских и бразильских александритов в окислительной атмосфере продемонстрированы на рисунках 1 и 2. В обоих случаях зафиксирован эффект просветления образцов с появлением желтоватых тонов. Для бразильских минералов такие изменения носят положительный характер: снижение избыточной насыщенности трансформирует исходный оттенок в сторону классической светло-зеленой гаммы (bG7/6 → G7/5) и одновременно интенсифицирует реверс цвета. Напротив, для уральских александритов аналогичное просветление имеет деструктивный характер, поскольку исходный ненасыщенный голубовато-зеленый тон (bG2/1) переходит в нежелательный желто-зеленый спектр (slyG 2/1).

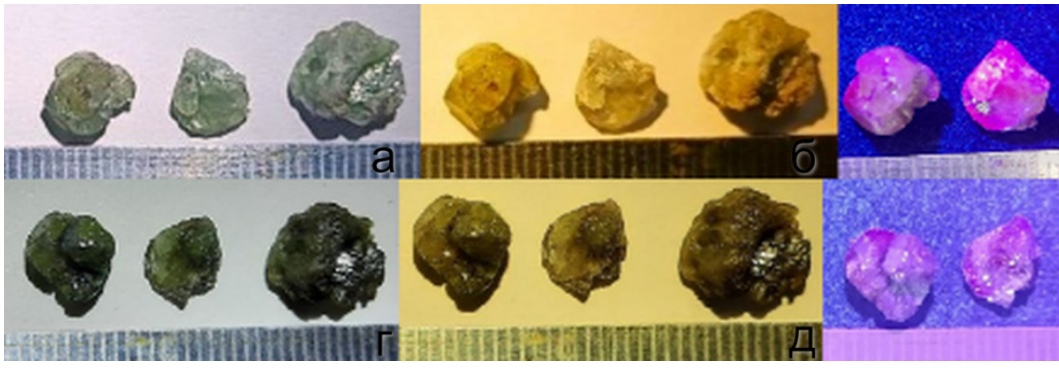


Рис. 3. Уральские александриты а, б, в - до термообработки; г, д, е - после восстановительной термообработки при 1400°С в течение 3 ч в восстановительной среде; а,г - белый свет; б, д - желтый свет; в, е - УФ 254/365 нм

На рисунке 4 представлены результаты термического воздействия на уральские александриты в восстановительной атмосфере. В отличие от окислительной среды, данный режим термообработки способствует усилению насыщенности. В случае уральских образцов это выражается в положительной динамике зеленой составляющей (vslbG 2/1 → vslbG 2/2). Для бразильских же разновидностей восстановительный нагрев имеет нежелательный эффект: наблюдается фактически почернение образцов.

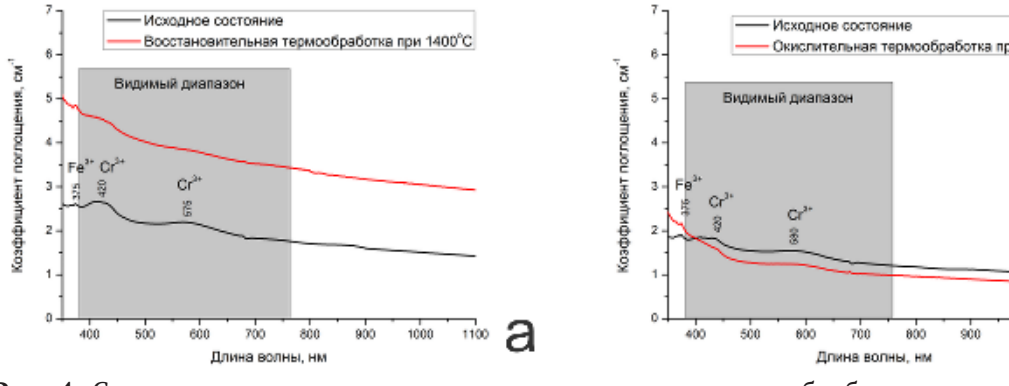


Рис. 4. Спектры поглощения уральских александритов термообработанных при 1400°С в течение 3 ч: а - в восстановительной среде; б - в окислительной среде

Обсуждение результатов

С целью установления исходного спектра поглощения природных уральских александритов, а также фиксирования его изменений, на каждом этапе экспериментальной работы выполнялся оптико-абсорбционный анализ на спектрофотометре Jasco V-770 с использованием диафрагмы 4 мм в диапазоне 190 - 2700 нм. Для камней бразильского происхождения проведение данного анализа не представлялось возможным ввиду низкой прозрачности и значительной трещиноватости.

Анализ спектров оптического поглощения (рис. 5) показывает, что восстановительная среда термообработки уральских александритов увеличивает коэффициент поглощения без смещения основных полос, что закономерно повышает насыщенность их окраски. Напротив, термообработка в окислительных условиях снижает оптическую плотность в интервале 400–1100 нм, но вызывает рост поглощения в ультрафиолетовой и синей областях спектра. В частности, усиливается полоса 374–376 нм, за которую ответственны ионы Fe^{3+}, что указывает на протекание окислительного процесса по схеме $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$. Данные спектроскопии полностью объясняют визуальные изменения окраски: исходный темно-голубовато-зеленый тон кристаллов сменяется желто-зеленым. Чрезмерная насыщенность бразильских кристаллов связана, прежде всего, с высокой концентрацией хрома, формирующим в оптическом спектре минерала полосы поглощения в области 420 и 580 нм. Железо, в свою очередь, снижает контрастность изменения цвета кристаллов при смене освещения. При нагреве в окислительной атмосфере наблюдается смещение оттенка камней в желто-зеленую область, что вероятно происходит в связи с усилением поглощения в коротковолновой области спектра и его снижение в длинноволновой области, аналогично уральским. Таким образом, нагрев в окислительной среде не только осветляет минералы, но и изменяет баланс хромофоров Cr и Fe, формирующих результирующий цвет.

Ярко-красная флуоресценция и реверс цвета в александритах обусловлены ионами хрома Cr^{3+} [6], поэтому между интенсивностью люминесценции и степенью выраженности александритового эффекта существует косвенная связь. На рисунке 5 приведено сравнение спектров флуоресценции александритов трех групп до и после термообработки, полученных на оборудовании Ocean Optics HDX (длина волны возбуждения – 365 нм, с использованием желтого светофильтра).

Согласно полученным спектральным данным, наиболее интенсивной люминесценцией обладают голубовато-зеленые александриты (группа 2), тогда как у бразильских камней (группа 3), она фактически отсутствует. Такое противоречие – высокая интенсивность свечения уральских минералов при низкой концентрации хрома и отсутствие люминесценции в образцах из Бразилии с высоким содержанием последнего – может быть обусловлено несколькими факторами. Во-первых, как ранее было указано, в бразильских александритах концентрация железа в два раза превышает эти же значения для уральских кристаллов. Следовательно, ионы Fe^{3+} могут выступать тушителями флуоресценции в результате безызлучательного поглощения энергии

возбужденных ионов Cr^{3+}. Во-вторых, может проявляться концентрационное тушение хрома [8]. Термообработка бразильских и уральских александритов приводит к изменению интенсивности люминесценции и выраженности александритового эффекта, вероятно, вследствие перестройки локального окружения ионов Cr^{3+}, а также из-за перераспределения примесей и дефектов: в окислительной среде усиливаются оба эффекта, тогда как восстановительная среда нагрева повышает интенсивность люминесценции в светлых уральских образцах, но ослабляет в темных, что, возможно, связано с различием в соотношении излучательных и безызлучательных процессов александритов групп 1 и 2. Полученные данные указывают на то, что интенсивность флуоресценции александритов, как и их окраска, определяется не абсолютным содержанием хрома, а совокупным влиянием Cr^{3+}, Fe^{3+} и дефектов.

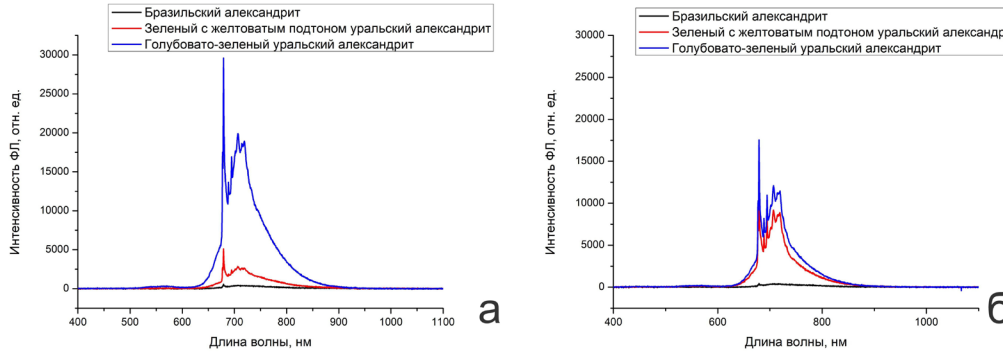


Рис. 5. Спектры люминесценции трех групп александритов а – до термообработки при 1450°С в течение 1 часа; б – после термообработки: бразильский – окислительная среда; уральские – восстановительная среда

Выводы

1. Влияние термообработки на цветовые характеристики александритов с различных месторождений имеет схожий характер, однако, при выборе режима нагрева, необходимо учитывать их химический состав и соотношение цветообразующих примесей;

2. Термическое воздействие в восстановительной среде усиливает насыщенность окраски уральских александритов;

3. Для бразильских александритов предпочтительна окислительная термообработка, поскольку она способствует снижению насыщенности окраски и усилению александритового эффекта, что связано с усилением в коротковолновой области поглощения, вследствие перераспределения хромофорных центров и окислением по схеме $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$;

4. Ключевым параметром термообработки александритов является выбор среды, определяющий направленность изменений;

5. Метод термообработки позволяет вносить управляемые изменения в цвет александритов, путем влияния на соотношение хромистых и железистых центров окраски.

Список литературы:

1. Ахметшин Э. А., Савина Е. И., Плечов П. Ю., Петрова О. Б. Улучшение цветовых характеристик сапфиров fancy месторождения «Кедрового» методом термообработки // ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень, 2022; (2): 30 – 50.
2. Козлов Ю.С. Александрит // Наука, Москва, 2005, 144 с.
3. Корнилов Н. И., Солодова Ю. П. Ювелирные камни. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1987. – 282 с.
4. Платонов А. Н., Таран М. Н., Балицкий В. С. Природа окраски самоцветов. – М., Недра, 1984, 196 с.
5. Яровой П. Н., Медведев В. Я., Букин Г. В., Михаленко А. А., Иванова Л. А. Радиационно-наведенные центры окраски в александрите // Письма в ЖТФ, том 17, вып. 8. 1991. С. 70 – 73.
6. Solomonov V. I., Mikhailov S. G., Lipchak A. I., Kozlov Yu. S. Impurity luminescence of alexandrite crystals // Journal of applied spectroscopy, vol. 69, No. 3, 2002.
7. Sun Z., Palke A. C., Muyal J., DeGhionno D., McClure S. F. Geographic origin determination of alexandrite // Gems&Gemology, 2019, vol. 55, №4.
8. Ollier N., Fuchs Y., Cavani O., Horn A. H., Rossano S. Influence of impurities on Cr^{3+} luminescence properties in Brazilian emerald and alexandrite // European Journal of Mineralogy, 2015, vol. 27, №6, pp. 783 – 792.

СУДЕБНАЯ МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ ЭКСПЕРТИЗА АЛМАЗОВ – СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ И ПРАВОВОЕ ЗНАЧЕНИЕ

Герасимова Е.И. (*e@ekaterinagems.ru*)

РФЦСЭ имени профессора А.Р. Шляхова при Минюсте России, г. Москва

Аннотация: Тезисы посвящены исследованию роли и правового значения судебной минералогической экспертизы в условиях активного распространения искусственно выращенных алмазов на ювелирном рынке и развития нормативно-правового регулирования их оборота. Рассматриваются нормативно-правовые основы разграничения природных и синтетически алмазов, процессуальный статус государственного судебного эксперта, а также роль специальных знаний в установлении происхождения исследуемых объектов. Подчеркивается роль судебной минералогической экспертизы в получении научно обоснованных и объективных фактических данных, имеющих доказательственное значение при сохранении окончательной юридической оценки установленных следователем, судом или иным уполномоченные субъектом правоприменения обстоятельств.

Ключевые слова: *минералогическая экспертиза, алмаз, судебный эксперт, правоприменение.*

В последние годы мировой и российский ювелирные рынки пополняются изделиями с искусственно выращенными камнями, особую позицию среди которых занимают алмазы. В связи с этим возрастают риски фальсификации, ввод в заблуждение потребителей, а установление природного либо синтетического происхождения алмаза приобретает существенное значение для объективного установления фактических обстоятельств при разрешении правовых споров и расследовании преступлений. В этих условиях особая роль принадлежит судебной минералогической экспертизе, обеспечивающей применение специальных знаний для получения научно обоснованных и объективных данных об исследуемом объекте, имеющих доказательственное значение. Ведущие ученые в области судебной экспертологии указывают, что в юридической науке специальные знания традиционно рассматриваются как совокупность теоретической основы и практических навыков в области науки и различных сферах деятельности, которые получены в ходе профессиональной подготовки и требуются для разрешения вопросов в судопроизводстве [1].

Действующие нормативно-правовые акты, включая Правила продажи товаров по договору розничной купли-продажи, утверждённые постановлением Правительства Российской Федерации от 30 мая 2026 г. № 657, устанавливают требования к предоставлению информации о реализуемых товарах и предусматривают терминологические разграничения природных и синтетических камней, в том числе не допускают использование наименования «бриллиант» и производных от него слов в отношении материалов искус-

ственного происхождения[1]. Установленные требования обусловливают необходимость достоверного определения природы камня и корректного отражения сведений о нём при введении ювелирных изделий в оборот и их учёте в ГИИС ДМДК. В этих условиях проведение минералогической экспертизы в системе государственных судебно-экспертных учреждений Министерства юстиции Российской Федерации (далее – СЭУ Минюста России) становится ключевым инструментом правоприменения.

Современное развитие технологий синтеза и облагораживания камней, используемых в ювелирной отрасти, а также особенности правового режима в сфере оборота драгоценных камней обусловливают рост значения специальных минералогических знаний в судебно-экспертной и правоприменительной практике. Алмаз в данном контексте является одновременно объектом исследования минералогов, поскольку обладает определенными физико-химическими свойствами и спектроскопическими характеристиками, и в то же время объектом правоприменительной деятельности, установление природы происхождения и классификационных признаков которого может иметь непосредственное правовое значение. Субъектом, обладающим специальными знаниями, является государственный судебный эксперт, правовой статус которого закреплен в Федеральный закон от 31.05.2001 № 73-ФЗ «О государственной судебно-экспертной деятельности в Российской Федерации». В соответствии с положениями этого федерального закона исследования осуществляются судебно-экспертными учреждениями в процессе судопроизводства и основываются на принципах независимости эксперта, объективности, всесторонности и полноты исследований, проводимых с использованием современных достижений науки и техники. Законом устанавливаются требования к профессиональной подготовке государственного судебного эксперта и определяется его особый процессуальный статус.[2] Роль минералогической экспертизы как главного инструмента, содействующего установлению истины в судопроизводстве, а также в непроцессуальной сфере, например контрольно-надзорной деятельности, очень важна и постоянно возрастает.

В системе СЭУ Минюста России правовой основой применения специальных минералогических знаний является приказ Минюста России от 20.04.2023 №72, в котором утверждены перечни родов (видов) судебных экспертиз и экспертных специальностей. Вид «Исследование минералов и изделий из них» включен в род «Криминалистическая экспертиза материалов, веществ и изделий», что обеспечивает нормативное применение специальных минералогических знаний, а также профессиональные и квалификационные требования к судебным экспертам-минерологам.

Современные технологии синтеза позволяют получать монокристаллы ал-

1 Постановление Правительства Российской Федерации от 30 мая 2026 г. № 657 «Об утверждении Правил продажи товаров по договору розничной купли-продажи…» // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2026. – № 23. – Ст. 2990

2 О государственной судебно-экспертной деятельности в Российской Федерации: Федеральный закон от 31.05.2001 № 73-ФЗ (с изм. на 22.07.2024) // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2001. – № 23. – Ст. 2291.

маза высокого качества, поэтому особое место среди объектов судебной минералогической экспертизы занимают алмазы, а чаще продукты их обработки. В связи с этим установление происхождения исследуемого объекта требует комплексного методического подхода, основанного на совокупности взаимодополняющих методов исследования минералов, получение и интерпретацию результатов которых обеспечивает эксперт – лицо, обладающее специальными знаниями в области минералогии и геммологии, «объективно на строго научной и практической основе, в пределах соответствующей экспертной специальности, всесторонне и в полном объёме».[1] Комплексное экспертное исследование алмаза включает оценку его морфологических особенностей, внутреннего строения, ростовой зональности, минеральных и иных включений, дефектно-примесного состава, а также особенностей люминесценции и спектроскопических характеристик для определения которых применяются оптическая микроскопия, исследования в ультрафиолетовом излучении, ИК- и КР-спектроскопия, фотолюминесцентная и катодолюминесцентная диагностика. Совокупность полученных признаков формирует научно-обоснованную базу для решения экспертной задачи, связанной с установлением природного либо синтетического происхождения объекта исследования. Решение указанной задачи при исследовании алмазов обеспечивается в том числе современным приборно-аналитическим оснащением СЭУ Минюста России.

Результаты исследования алмаза, направленного на установление природы его происхождения или установлению классификационных характеристик бриллианта, в рамках судебной экспертизы приобретают непосредственное правовое значение, так как в соответствии со статьей 1 Федерального закона от 26.03.1998 № 41-ФЗ «О драгоценных металлах и драгоценных камнях» к драгоценным камням относятся, в частности, природные алмазы в сыром и обработанном виде. При этом материалы искусственного происхождения, обладающие характеристиками (свойствами) драгоценных камней, драгоценными камнями не являются. Эксперт при этом не разрешает правовой вопрос. Задача проводимого им экспертного исследования строго ограничена установлением фактических данных о природе и свойствах изучаемых объектов на основе специальных знаний, в то время как окончательная правовая оценка полученных результатов в совокупности с иными доказательствами остается исключительной прерогативой следователя, суда или иного уполномоченного субъекта правоприменения.

Развитие судебной минералогической экспертизы представляется перспективным направлением интеграции знаний в области фундаментальной и прикладной минералогии в сферу судопроизводства, дальнейшими задачами которой являются совершенствование научно-методического обеспечения исследований, возможностей применения инструментальных методов и подготовки специалистов, сочетающих знания в области минералогии, геммологии и судебной экспертологии.

Список литературы:

1. Россинская Е.Р., Галяшина Е.И. Настольная книга судьи: судебная экспертиза: теория и практика, типичные вопросы и нестандартные ситуации: 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Проспект, 2025 – 448 с.

ГЕММОЛОГИЯ НЕФРИТА ХАМАРХУДИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ, ЗАПАДНЫЙ ХАМАР-ДАБАН

Кислов Е. В. (*evg-kislov@ya.ru*)

ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ

Аннотация: Изучены качественные характеристики, вещественный состав и особенности формирования апосерпентинитового нефрита Хамархудинского месторождения, входящего в Джидинскую нефритоносную провинцию. Особенности состава объясняются формированием нефрита в зоне серпентинитового меланжа при взаимодействии серпентинита со сланцами, гнейсами, доломитами.

Ключевые слова: *серпентинитовый меланж, качество нефрита, минеральный, химический состав, изотопный состав кислорода*

Хамархудинское месторождение апосерпентинитового нефрита находится в верхнем течении р. Хохюрта в гольцах Хангарульского хребта в Закаменском районе Бурятии, приурочено к одноименному серпентинитовому массиву цакирского комплекса. Вмещающая толща - кристаллические сланцы, гнейсы, доломиты биту-джидинской свиты. На контактах массива развиты родингиты, тремолититы и тальк-карбонатные породы. На северном контакте зона меланжа шириной 1 км, сложенная диафторированными сланцами, гнейсами с блоками доломитов и серпентинитов [2].

Запасы коренного месторождения защищены в 1974 г., россыпного – 1976 г. Выявлены нефритоносные зоны 1 и 2 длиной 1-2 км, мощностью до 100 м, приуроченные к СЗ и СВ контактам, ледниково-аллювиальная россыпь по руч. Нефритовому и р. Хохюрте. Выявлено 16 нефритовых жил длиной 2-21 м, приуроченных к родингитам. Метасоматическая зональность: антигоритовый серпентинит - диопсидовый родингит - нефрит (тремолитит) - кварц-клиноцоизитовый родингит - кристаллический сланец [2]. Разведкой зафиксировано 288 валунов массой 239,46 т, из них 33 белого, дымчатого, темно-дымчатого нефрита весом 54,67 т. «Байкалкварцсамоцветы» вели разведку и эксплуатацию до начала 1990-х гг., в основном добывая валуны. С 2010 г. лицензия на месторождение у ЗАО «МС холдинг», добывшего в 2015-2020 гг. 1050,70 т нефрита-сырца на жилах 1а, 4, 4а, 6, 13, 14 зоны 1. На 01.01.2025 балансовые запасы по жилам 4а, 6 зоны 1; 7, 8 зоны 2; участку «Россыпь» составили 1201,69 т нефрита-сырца, в том числе сортового 275,31 т, из которого 12,76 т ювелирного.

Нефрит Хамархудинского месторождения характеризуется массивной и сланцеватой текстурой, нематобластовой, лепидобластовой, фибробластовой, гранобластовой структурами. Цвет светло-зеленый до ярко-зеленого, темно-зеленого, серовато-зеленого, серовато-белого. Нефрит жил 7, 8, 9 серовато-черного, черного цвета. В жиле 13 выявлен ирризирующий нефрит. Ряд жил имеет зональное строение. Центральная часть сложена зеленым нефритом, иногда с серовато-зелеными и светло-зелеными участками, полосами.

Краевые части сложены темно-зеленым нефритом или пятнистым зеленым нефритом, иногда с темно-желто-зелеными и зеленовато-серыми включениями размером 1-25 мм, прожилками буроватого цвета. Отмечаются рассланцевание, согласные и поперечные трещины, хлоритизация, ухудшающие качество нефрита.

Нефрит принимает полировку от хорошей зеркальной со слабой шагренью до матовой или шероховатой при развитии хлорита. Просвечивает на глубину 2-3 мм. Твердость 5,5-6,5, плотность 3,0. Блеск матовый до жирного, излом неровный, занозистый или раковистый. Средний выход сортового нефрита 31 %.

Преобладающий минерал - скрытокристаллический спутанно-волокнистый тремолит до актинолита с содержанием FeO 2,83-9,4 вес. %. В дымчатом нефрите резко преобладает тремолит, прожилок актинолита с содержанием 10,70 вес. % FeO сечет тремолит с 1,42 вес. % FeO. Содержание Cr_2O_3 до 2,18 вес. %, в дымчатом нефрите не обнаружен. Иглы тремолита размером от 0,005×0,01 до 0,01×0,5 мм составляют пучок двух-трех десятков волокон, изогнутых или параллельных, образующих лепестковидные различно ориентированные по отношению друг к другу агрегаты.

Реликтовые, обычно раздробленные зерна хромита встречены в 10 образцах. Хлорит обычно образует вокруг них оторочки, выполняет трещины и замещает вместе с кальцитом округлые включения. Встречаются зерна хромита витиеватой, фестончатой формы. Для хромита характерны повышенные содержания MnO до 3,84 вес. % и ZnO до 8,14 вес. %, впервые отмеченные [1] здесь. В крупных зернах хромита внутренние участки обогащены Mg и Cr, содержания Fe, Mn и Zn повышены во внешних зонах и вдоль трещин.

Для нефрита характерен хлорит, выявленный в 12 образцах. Хлорит замещает тремолит и хромит, образует пятнообразные и угловатое агрегаты, струйные прожилки, иногда содержащие реликты флогопита и эпидота. В хлоритовом прожилке в хромите обнаружено единственное зерно уваровита. Впервые уваровит в нефрите определен [1] здесь.

Для изученного нефрита характерны крупные идиоморфные кристаллы минералов группы эпидота (9 образцов), варьирующие от клиноцоизита до эпидота с содержанием до 8,28 вес. % Fe_2O_3. Зачастую ядра или зоны кристалла обогащены РЗЭ до 11,24 вес. % Ce_2O_3 и 20,12 вес. % $\sum TR_2O_3$, что отвечает алланиту-Ce. В других случаях в центральной части зерен повышенные содержания Cr_2O_3 до 8 вес. %. Вокруг зерен оторочки хлорита, выполняющего трещины и каверны в них с единичным зерном фуксита. Встречаются секущие прожилки клиноцоизит-эпидота. Минералы содержат включения актинолита, хромита, кварца, молибденита, никелина, пентландита, сугакиита $Cu(Fe,Ni)_8S_8$, с ними ассоциирует андалузит.

Мелкие зерна кварца отмечены в 5 образцах среди тремолит-актинолита, реже в прожилках эпидота. Изометричные зерна фторапатита в 4

образцах, иногда с включениями пентландита и титанита. Титанит в 3 образцах образует удлиненные зерна в тремолите, амебовидные ситцевые зерна с включениями и оторочкой хлорита, идиоморфные кристаллы с включениями мелких зерен циркона. Флогопит в 3 образцах образует мелкие зерна в агрегатах хлорита, реже - тремолита. Циркон в 3 образцах образует угловатые зерна в тремолит-актинолите и титаните. Кальцит (2 образца) отмечен во включении в апатите и, совместно с хлоритом, во включении в хромите.

Широко развиты пентландит (5 образцов) и галенит (3 образца), образующие угловатые и удлиненные зерна в тремолит-актинолите, эпидоте, обрастающие кобальтин. Пентландит образует срастания с галенитом, халькопиритом, миллеритом, сугакиитом, содержит включение эпидота. Молибденит обнаружен в актинолите и эпидоте, никелин - в кварце и эпидоте, миллерит и герсдорфит - в эпидоте.

Прожилок романешита $(Ba,H_2O)_2Mn_5O_{10}$ сечет тремолит. В тремолите отмечено зерно бисмутита $Bi_2(CO_3)O_2$. У двух зерен хромита отмечены примазки волконскоита.

По химическому составу нефрит типично апосерпентинитовый: 3,64-4,88 вес. % FeO, 18,80-21,83 вес. % MgO, Cr от 2000 г/т и выше предела обнаружения, Co 42-54 г/т, Ni 840-1330 г/т. Дымчатый нефрит отличается: 3,04 вес. % FeO, 22,20 вес. % MgO, еще сильнее по содержанию Cr 54 г/т, Co 10 г/т, Ni 45 г/т - на уровне аподоломитового нефрита. Повышенное содержание F 0,07-0,16 г/т, более типичное для аподоломитового нефрита, объясняется фторапатитом - обнаружено лишь по одному зерну тремолита и флогопита с содержанием фтора 1,42 и 1,93 вес. % соответственно.

Изотопный состав кислорода нефрита +7,3…+12,7 ‰ $\delta^{18}O$, в основном +7,4…+8,5 ‰, унаследован от серпентинита. Изотопный состав серпентинита близ расположенного Харгантинского массива +6,4…+7,5 ‰. Утяжеление исходного мантийного состава +5,7 ‰ объяснимо серпентинизацией. Состав нефрита промежуточный между серпентинитом и вмещающими родингитом +10,3 ‰, кварцитом +28,9 ‰, что отражает вклад как мантийных, так и коровых компонентов.

Широкие колебания железистости и глиноземистости амфиболов отражают инфильтрационно диффузионный характер метасоматоза и многостадийность процесса нефритообразования [2]. Реликтовый хромит, метасоматический тремолит-актинолит, регрессивные минералы группы эпидота и хлорит, гидротермальные сульфиды, вторичные минералы также свидетельствуют об этом. При этом наличие дымчатых разностей, отклонение нефрита от типичного апосерпентинитового по минеральному и химическому составу могут объясняться участием в его генезисе блоков гнейсов, сланцев и доломитов в серпентинитовом меланже.

По мнению большинства исследователей, апосерпентинитовый нефрит метасоматически формируется на контакте серпентинитов с дайками габбро или гранита, метаморфическими алюмосиликатными породами, реже в метаморфизованных основных породах, телах апогаббровых или апогранит-

ных метасоматитов [2]. Другие авторы [1] настаивали на метаморфическом формировании нефрита в зонах серпентинитового меланжа – именно так, но с участием метасоматоза, сформировалось Хамархудинское месторождение нефрита.

Исследование проведено за счет гранта РНФ № 25-27-00579 с использованием оборудования ЦКП «Геоспектр» ГИН СО РАН (Улан-Удэ).

Список литературы:

1. Добрецов Н.Л., Татаринов А.В. Жадеит и нефрит в офиолитах (на примере Западного Саяна). - Новосибирск: Наука, 1983. - 125 с.
2. Сутурин А. Н., Замалетдинов Р. С., Секерина Н .В. Месторождения нефритов. - Иркутск: Изд-во ИГУ, 2015. - 377 с.

ОБЛАГОРАЖИВАНИЕ БЕСЦВЕТНЫХ БЕРИЛЛОВ ГАММА-ОБЛУЧЕНИЕМ

Климкин И. А.[1,2] (*klimkin.ivan.aleksandrovich@gmail.com*),
Ахметшин Э. А.[2] (*4966945@mail.ru*)

[1]МинМузей РАН, г. Москва, [2] РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Москва

Аннотация: Образцы бесцветного ювелирного берилла из разных месторождений после гамма-облучения дозой 400 кГр приобрели стойкие голубые, жёлто-зелёные и светло-оранжевые окраски, которые становятся более насыщенными при увеличении дозы до 1400 кГр. Цветовые изменения кристаллов связаны с центрами [h - Fe_6^{2+}].

Ключевые слова: *берилл, гамма-облучение, устойчивость окраски, радиационное облагораживание*

Введение:

Минералы-силикаты весьма разнообразны и по этой причине широко применяются в различных сферах – от огнеупорных материалов и металлургии до ювелирной промышленности [1, 2]. При этом для последней наиболее ценны такие минералы как берилл из-за разнообразия ярких окрасок, поскольку именно от цвета при прочих равных параметрах (вес в каратах, прозрачность, чистота, качество огранки и пр.) зависит конечная стоимость ювелирного камня [3, 4].

Окраска играет определяющую роль в формировании цены на самоцвет по причинам: 1) постоянного спроса на камни с эталонными цветовыми характеристиками и их ограниченного количества (не более 5% от всего объёма добытого материала); 2) исчерпание ресурсов крупных месторождений и большие объёмы извлечённого нерентабельного (бледноокрашенного/бесцветного) кристаллосырья [4, 5]. Однако благодаря облагораживанию возможно не только улучшить цветовые характеристики самоцветов, но и увеличить их запасы [5, 6].

Из всех существующих методов облагораживания наиболее перспективным является радиационное воздействие, поскольку оно трудно диагностируется при геммологической экспертизе [7], а также позволяет улучшить окраску самоцветов, содержание примесей в которых ниже 0,01 мас.% [5]. Модифицирование цветовых характеристик кристаллов происходит как за счёт формирования в них устойчивых точечных дефектов, увеличивающих сечение поглощения исходных центров окраски, так и за счёт изменения валентности хромофорных примесей самоцветов [8]. В представленной работе гамма-излучение выбрано по причинам высокой проникающей способности его квантов, а также доступности необходимого оборудования [9].

Экспериментальная часть:

В работе использовано 430 образцов бесцветного ювелирного берилла ($Be_3Al_2[Si_6O_{18}]$) из месторождений Пакистана (30 шт.) и Мадагаскара (400 шт.), представлявших собой прозрачные фрагменты кристаллов размером до 15 мм без включений. Из пакистанских бериллов были изготовлены полированные плоскопараллельные шлифы толщиной 2 мм, ориентированные перпендикулярно оси с, для предотвращения возможной путаницы из-за визуальной схожести образцов.

Химический состав образцов определялся с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan VEGA3-LMU (TESCAN ORSAY HOLDING) и рентгеноспектрального энергодисперсионного микроанализатора EDS Oxford Instruments X-MAX-50. Анализ показал, что во всех шлифах помимо основных компонентов: Al (7,58-7,60 мас.%), Si (21,71-21,73 мас.%) и O (69,70-69,72 мас.%), присутствуют примеси Fe (0,04-0,06 мас.%), Na (0,79-0,81 мас.%), K (0,04-0,06 мас.%) и Cs (0,07-0,09 мас.%). Высокое содержание щелочных элементов обуславливает отсутствие исходной окраски: они затрудняют вхождение в кристаллическую решётку хромофорных элементов, в частности железа [10]. Содержание Be не измерялось из-за аппаратных ограничений, поэтому в расчёт реального химического состава он не входил.

Экспериментальную работу по гамма-облучению шлифов и кристаллов берилла проводили на уникальной научной установке «Гамматок-100» ФИЦ ПХФ и МХ РАН в следующих условиях: энергия излучения – 1,2 МэВ при мощности 2,8 Гр/с, поглощенная доза – 400 и 1400 кГр. Оценка полученных цветовых изменений всех шлифов до и после каждого этапа облучения проходила с использованием набора эталонов «GIA GemSet», а также на спектрофотометре Jas.co V-770 (диапазон: 190–2700 нм; диаметр диафрагмы – 2,5 мм; обработка данных – программный пакет OriginPro 8). Также по результатам облучения была проведена серия экспериментов по изучению стабильности наведённой окраски у облученных шлифов под воздействием естественного ненормированного освещения в течение двух недель при температуре 300 K на воздухе с повторным спектрально-абсорбционным анализом и получением цветовых координаты пространства CIE Lab.

Результаты и их обсуждение:

После первичного гамма-облучения дозой 400 кГр бериллы из Пакистана приобрели лёгкий однородный желтовато-зелёный оттенок (yG 1/1) (рис. 1 А), в то время как мадагаскарские образцы окрасились более ярко и разнообразно: жёлто-зелёный (styG 2/1), желтовато-оранжевый (yO 3/1) и светло-голубой (B 2/1) (рис. 1 Б).

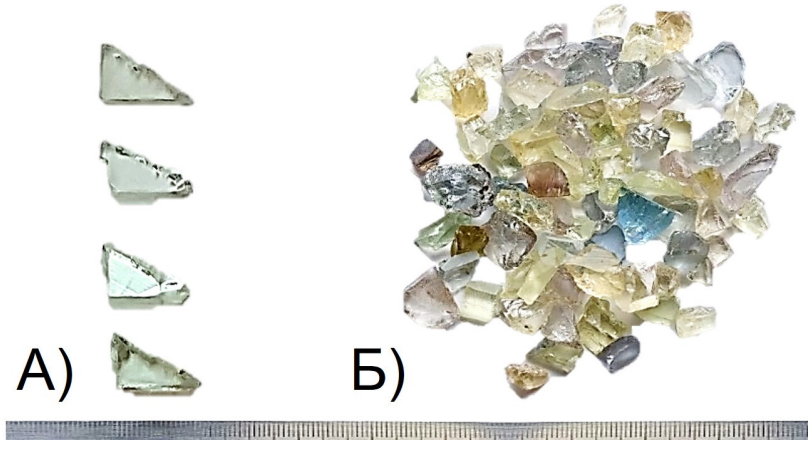


Рис. 1. Изменения окраски бериллов после гамма-облучения дозой 400 кГр: А – пакистанские образцы, Б – мадагаскарские образцы.

Облучение дозой 1400 кГр привело к дальнейшему усилению насыщенности цвета: пакистанские бериллы стали равномерно светло-зелеными (slyG 2/1) (рис. 2 А), а окраска мадагаскарских стала более яркой: styG 3/2, yO 3/3 и B 2/2 (рис.2 Б).

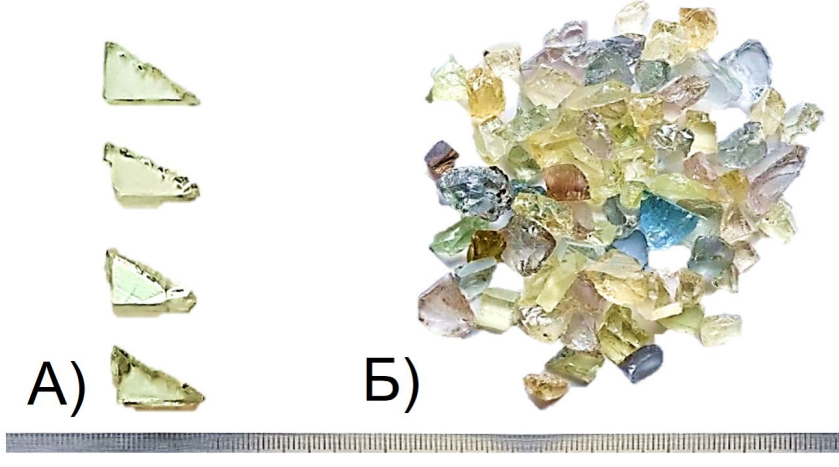


Рис. 2. Изменения окраски бериллов после гамма-облучения дозой 1400 кГр: А – пакистанские образцы, Б – мадагаскарские образцы.

Спектрально-абсорбционный анализ выявил следующие закономерности: 1) у всех образцов присутствует широкая полоса поглощения 700-950 нм хромофорного центра [Fe_6^{2+}] (рис. 3, кривая *a*), который не вносит вклада в

окраску, поскольку находится вне диапазона видимого спектра [10]; 2) формирование желтоватых оттенков после облучения дозой 400 кГр обусловлено ростом поглощения в сине-фиолетовой области видимого спектра (325-450 нм) (рис. 3, кривая *б*); 3) Повторное воздействие гамма-квантов (доза 1400 кГр) привело к заметному увеличению оптического поглощения в диапазоне 325-450 нм (рис. 3, кривая в), а также к образованию хромофорного ассоциата [h - Fe_6^{2+}] из сформированных в ходе облучения дырочных центров окраски [O^-] и исходного хромофорного центра [Fe_6^{2+}], что привело к увеличению сечения поглощения последнего и формированию у бериллов уже зеленоватой цветовой гаммы.

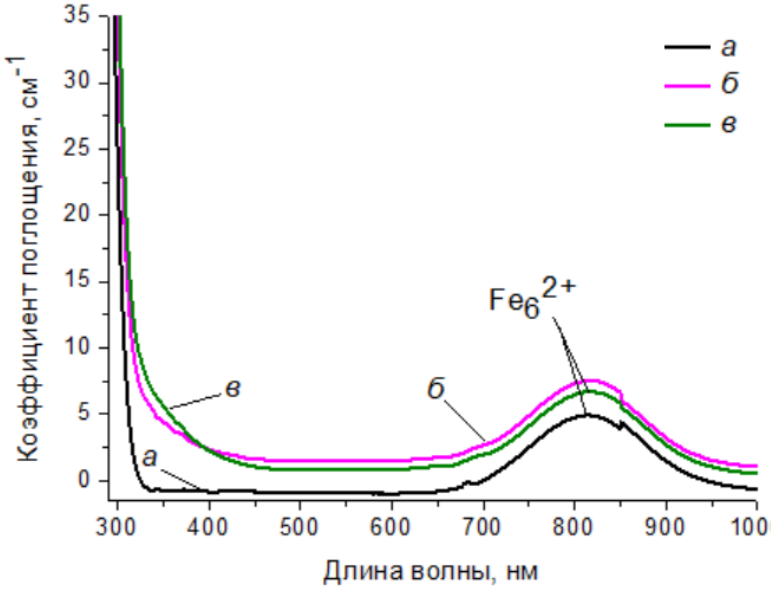


Рис. 3. Спектры поглощения исследуемых шлифов пакистанского берилла: а – исходный, б – после гамма-облучения дозой 400 кГр, в – после гамма-облучения дозой 1400 кГр.

Спектры поглощения и координаты цветового пространства CIE Lab после двухнедельной выдержки исследуемых бериллов под естественным ненормированным освещением практически не отличаются от полученных после воздействия гамма-квантов дозой 1400 кГр (рис. 4 А, Б). Это свидетельствует о высокой стабильности полученной радиационной окраски, поскольку именно в первые 14 дней происходит интенсивное разрушение наиболее нестабильных наведённых центров окраски [11, 12]. Таким образом, гамма-облучение может рассматриваться как перспективный метод улучшения окраски природных бесцветных бериллов.

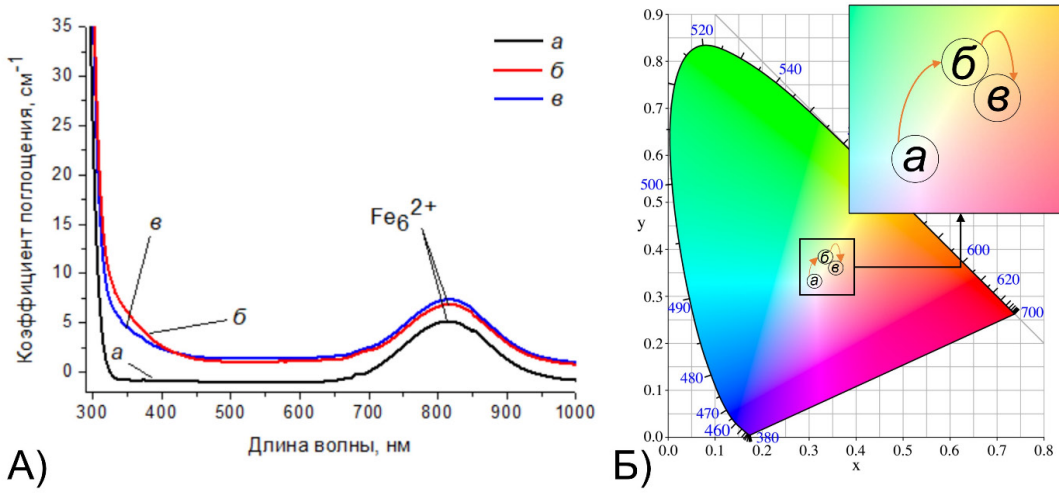


Рис. 4. А – спектры поглощения, Б – цветовые координаты исследуемых шлифов пакистанского берилла: а – исходный, б – после гамма-облучения дозой 1400 кГр, в – после выдержки в естественном освещении в течение 14 суток на воздухе при 300 К.

Выводы:

- Отсутствие окраски у исходных бериллов связано не только с низкой концентрацией хромофорной примеси Fe (до 0,08 мас.%), но и с повышенным содержанием щелочных элементов: Na (до 1,29 мас.%), K (до 0,11 мас.%) и Cs (до 0,13 мас.%;
- Воздействие гамма-излучения энергией 1,2 МэВ дозой 1400 кГр является оптимальным для получения насыщенной голубой, жёлто-зелёной и оранжево-жёлтой окрасок у исходно бесцветных бериллов.
- Наблюдаемые цветовые изменения обусловлены формированием сложных хромофорных ассоциатов [h - Fe_6^{2+}], представляющих комбинацию исходного центра окраски [Fe_6^{2+}] и наведённого точечного дефекта [O^-].
- Радиационная окраска бериллов устойчива к долговременному воздействию ненормированного естественного освещения.

Авторы выражают благодарность главному научному сотруднику д.х.н. С.Р. Аллаярову и научному сотруднику к.х.н. С.В. Демидову ФИЦ ПХФ и МХ РАН за проведение экспериментов по гамма-облучению, Национальной аналитической сертификационной лаборатории (НАСЛ) высокочистых веществ и материалов РХТУ им. Д.И. Менделеева за помощь в проведении оптико-спектральных исследований, а также ассистенту кафедры Химии и технологии кристаллов РХТУ им. Д.И. Менделеева к.х.н. К.С. Серкиной за проведение элементного анализа образцов.

Работа выполнена в рамках госзаданий № 124013000722-8 с использованием УНУ «Гамматок-100 ФИЦ ПХФ и МХ РАН».

Список литературы:

1. Белов Н. В. Кристаллохимия силикатов с крупными катионами. М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1961. 68 с.
2. Пущаровский Д. Ю. Структурная минералогия силикатов и их синтетических аналогов. М.: Недра, 1986. 159 с.
3. Андреенко Э. Д., Гранадчикова Б. Г., Солодова Ю. П. Определитель ювелирных и поделочных камней. М.: Недра 1985. 223 с.
4. K. Nassau. Gemstone Enhancement: History, Science and State of the Art. Second Edition. Oxford and London: Butterworth Heinemann, 1994. 252 p.
5. Akhmetshin E. A., Klimkin I. A., Plechov P. Yu., and Petrova O. B. Enhancement of raw semi-precious gemstones as a special type of processing of nonmetallic mineral resources // Mining Informational and Analytical Bulletin. 2025. Vol. 6. P. 21–39 DOI: 10.25018/0236_1493_2025_6_0_21
6. Пшеничный М. И. Ювелирные камни и технологии их обработки // Российский химический журнал. 2010. Т. 54. № 2. С. 110-114.
7. Гвозденко Т. А., Герасимова Е. И. Возможности современной геммологии // Природа. 2018. № 4 (1232). С. 41-46.
8. Dubinsky E. V., Stone-Sundberg J., Emmet J. L. A quantitative description of the causes in corundum // Gems&Gemology. 2020. Vol. 56. No 1. P. 2-28.
9. Комов И. Л. Радиационная минералогия. М.: Энергоиздат, 1982. 174 с.
10. 1латонов А. Н., Таран М. Н., Балицкий В. С. Природа окраски самоцветов. М.: Недра, 1984. 196 с.
11. Lushchik A., Seeman V., Shablonin E., Vasil'chenko E., Kuzovkov V. N., Kotomin E. A., Popov A. I. Detection of hidden oxygen interstitials in neutron-irradiated corundum crystals // Journal Optical Materials: X. 2022. Vol. 14. P. 1-10. DOI: 10.1016/j.omx.2022.100151.
12. Корнилов Н. И., Солодова Ю. П. Ювелирные камни. М.: Недра, 1983. 236 с.

УНИКАЛЬНЫЕ АЛМАЗЫ РОССИИ РЕДКИХ ЦВЕТОВЫХ ОТТЕНКОВ

Криулина Г.Ю.[1] (*Kriulina@gem-center. ru*),
Бардухинов Л.Д.[2], **Вяткин С.В.**[1]

[1]*Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва,*
[2] *ВРГЭ АК «АЛРОСА», г. Мирный*

Аннотация: в месторождениях России встречаются крупные алмазы редких цветов: розовые, фиолетовые, янтарно-желтые. Сочетание минералогических и спектральных характеристик говорит о большой вариативности сред и условий рождающих уникальные алмазы.

Ключевые слова: *алмаз, ИК-спектроскопия, спектроскопия видимой области, дефектно-примесный состав, пластическая деформация, азотсодержащие, боросодержащие центры окраски*

Россия является мировым лидером по объему добычи алмаза. В общем потоке сырья ювелирного качества преобладают кристаллы до 10 карат околобесцветные и с желтым оттенком разной интенсивности. Бесцветные и околобесцветные алмазы более 100 карат ювелирного качества встречаются в Российских месторождениях редко, им присваивают имена знаменитых людей и событий. Самый крупный околобесцветный алмаз «390 карат» добыт в россыпи р. Эбелях в 2023г. Это низкоазотный алмаз IIa типа по физической классификации. Незначительный желтый оттенок проявляется из-за накопления цвета в большом объеме (Криулина и др., 2025).

В месторождениях, как коренных так и россыпных, алмазы яркого желтого, оранжево-желтого, розового, розово-фиолетового, синего цветов и оттенков встречаются гораздо реже (Вяткин и др, 2022). Для статуса «уникальный алмаз» необходимо сочетание крупного размера и редкого интенсивного цвета, привлекательного своей красотой для ценителя камня. В коренных месторождениях (трубки Интернациональная, Архангельская) ежегодно добывают розовые и розово-фиолетовые алмазы среднего размера. В месторождениях россыпей р. Анабар встречаются крупные кристаллы с насыщенной желтой, янтарно-желтой, розовой, фиолетовой окраской.

Уникальный по сочетанию цвета и размера желтый алмаз «Рассвет» массой 236,25 кар. добыт в месторождении «Эбелях» в 2020 г. Алмаз имеет интенсивную желтую окраску. Цвет обусловлен высоким содержанием азотсодержащих центров N3, проявленных в спектрах поглощения видимой области и в спектрах люминесценции. Из этого алмаза огранен бриллиант «Новое солнце» с массой 102,77 кар в форме «кушон». Цвет бриллианта оценен как Vivid Yellow.

Желто-коричневый алмаз, названный в честь «Победы в Великой Отечественной Войне» добыт из трубки Заполярная в 2025г; он представляет собой

крупный обломок кристалла ювелирного качества массой 468,3 кар. Окраска этого алмаза обусловлена постростовым процессом пластической деформации по механизму скольжения. На поверхности кристалла тонкая шагрень. Алмаз относится к IIa типу, в спектре фотолюминесценции азотсодержащих центров также не зафиксировано.

Розовый алмаз «Нежинский» массой 27,85 кар. добыт в 2017 году на россыпном месторождении «Эбелях» и был огранен в бриллиант овальной формы «Призрак розы» 14,8 кар. В бриллианте насыщенный розовый цвет оценен как Fancy Vivid Purple-Pink. Это редкий безазотный алмаз IIa типа по физической классификации, без включений. Следы пластической деформации слабо проявлены очень тонким грейнингом, шагреневой поверхностью на гранях додекаэдроида.

Алмазы с фиолетово-розовой и фиолетовой окраской, по сравнению с чисто розовыми и коричневыми, имеют более резко выраженные плоскости пластической деформации, их образование происходит по механизму полисинтетического двойникования. Алмазы относятся к Ia типу, они содержат азот преимущественно в виде азотных пар (A-центров). Окраска обусловлена наличием широкой полосы поглощения с максимумом 550 нм в комплексе с N3 центром (415 нм), H3 (503 нм) (Криулина и др, 2023).

В 2026г. в месторождении Якутии был добыт первый алмаз с голубой окраской массой около 2 кар., в структуре которого надежно определены боросодержащие центры.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова, по госбюджетной теме «Минералогическое изучение месторождений Арктической зоны России с целью их комплексного освоения (№ госрегистрации 121061600049-4)».

Благодарности. Коллектив авторов благодарит АК ПАО “АЛРОСА” за предоставленную возможность исследований и публикации данного материала.

Список литературы:

1. Криулина Г. Ю. Криулина Г.Ю., Бардухинов Л.Д., Седых Е.М., Еремеев Р.В., Копчиков М.Б., Шилова О.А., Васина А.И., Демидова Л.А. Первая находка крупного алмаза группы «CLIPPIR» в россыпном месторождении Эбелях (Якутия) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 3. С. 3–12.

2. Вяткин С.В., Г.Ю. Криулина, В.К. Гаранин. Алмазы из россыпи Эбелях (Анабар, Якутия): новые данные о их разделении по первоисточникам / // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2022. – № 4. – С. 84-92.

3. Криулина Г.Ю., Вяткин С.В., Васильев Е.А. Розово-фиолетовые алмазы из месторождения им. М.В.Ломоносова: морфология, спектроскопия, природа окраски // Записки Горного института. 2023. Т. 263. С. 715-723. EDN NYGZOX.

DLC-ПОКРЫТИЯ (DIAMOND-LIKE CARBON) ДЛЯ БРИЛЛИАНТОВ

Павлидис С.Б. (*spavlidis@gokhran.ru*),
Васина А.И. (*avasina@gokhran.ru*),
Миденко Я.М. (*yamidenko@gokhran.ru*)

Гохран России, г. Москва

Аннотация: Целью данного исследования является определение наименования вставок черного цвета и материала покрытия в ювелирном изделии. В ходе работы были применены неразрушающие методы исследования: оптическая микроскопия, микрорентгенофлуоресцентный анализ, фотолюминесцентная спектроскопия и спектроскопия комбинационного рассеяния.

Ключевые слова: *бриллиант, углерод, покрытие, DLC.*

Введение

Современное развитие технологий модификации поверхности материалов способствует активному внедрению тонкопленочных покрытий в различные области науки и промышленности. Особый интерес представляют DLC-покрытия, обладающие сочетанием высокой твердости, химической инертности и хороших оптических характеристик.

DLC-покрытие (Diamond-Like Carbon) – это тонкое аморфное углеродное покрытие, которое по своим физическим свойствам частично напоминает алмаз.

Исследования углеродных покрытий, близких по свойствам к алмазу, начались во второй половине XX века. Первые алмазоподобные углеродные плёнки были получены в 1971 году исследователями С. Айзенбергом и Р. Шабо с использованием ионно-пучковых технологий [1]. Эти работы считаются началом истории DLC.

В ювелирной отрасли интерес к DLC-покрытиям возник с конца 1990-х и особенно в 2000-х годах, когда началось их практическое изучение на алмазах [1]. Исследования были направлены на повышение устойчивости поверхности к механическим повреждениям и внешним воздействиям без изменения их оптических свойств.

Материалы и методы

Авторами было проведено исследование ювелирных изделий с мелкими вставками черного цвета. На вставках и на металле рядом с ними было отмечено черное матовое покрытие.

Изучение поверхности проводилось с помощью исследовательского поляризационного микроскопа BX-51P (Olympus) и стереомикроскопа S9D (Leica), в отраженном свете. Спектры комбинационного рассеяния и фотолюминесценции бриллиантов и покрытия были получены с помощью КР-ми-

кроспектрометров inVia Qontor (Renishaw) и DXR Raman Microscope (Thermo Fischer Scientific), исследование проводилось при комнатной температуре. Определение химического состава поверхности вставок было произведено в вакууме с помощью микрорентгенофлуоресцентного спектрометра M4 TORNADO (Bruker).

Результаты исследования

Оптическая микроскопия. При проведении исследования методом оптической микроскопии наблюдалось матовое, шероховатое покрытие, которое не позволяло полноценно изучить вставки в изделии, кроме участков, где оно частично стерлось. В этих местах присутствовала зеркальная, трещиноватая поверхность, характерная для отожженных черных бриллиантов. Темный, матовый слой наблюдался не только на поверхности вставок, но и на участках металла, прилегающего к ним.

КР-спектроскопия. В ходе проведения исследования были получены спектры алмаза (на участках без покрытия) и материала покрытия (на поверхности вставок). Черный материал имеет интенсивные широкие полосы 1354 и 1578 $см^{-1}$, которые характерны для алмазоподобного аморфного углерода (DLC) [4]. Узкие полосы 305, 408, 545 $см^{-1}$, не относящиеся к типичным признакам DLC, могут быть связаны с колебаниями кристаллической решётки поверхностной хромсодержащей оксидной фазы [3].

ФЛ-спектроскопия. На спектрах алмаза также были выявлены интенсивные пики 637 нм (NV^-) и 660 нм, (повтор NV^-) отвечающие за облагораживание – отжиг алмазов [2].

РФА. Рентгенофлуоресцентный анализ вставок и прилегающих черных участков металла выявил высокое содержание хрома – от 51 до 70%, что свидетельствует о наличии хромсодержащего поверхностного слоя.

Выводы

В результате комплексного исследования было установлено, что вставки являются отожженными бриллиантами с DLC- подобным покрытием. После их закрепки, на изделие было нанесено хромирование, так как повышенное содержание Cr прослеживается не только на поверхности вставок, но и на прилегающих участках металла. Хромирование металла является довольно распространенным способом получения матового черного цвета.

Список литературы

1. Bewilogua K., Hofmann D. History of diamond-like carbon films - From first experiments to worldwide applications. Surface and Coatings Technology – 2014 – Vol. 242 – P. 214-225.

2. Dobrinets I.A., Vins V.G., Zaitsev A.M. HPHT-Treated Diamonds: Diamonds Forever. Springer Series in Materials Science – 2013 – Vol. 181 – P. 257.

3. Oje A.M., Ogwu A.A. Chromium oxide coatings with the potential for eliminating

the risk of chromium ion release in orthopaedic implants. Royal society open science – 2017 – Vol. 4 – P. 18.

4. Robertson J. Diamond-like amorphous carbon. Materials Science and Engineering R – 2002 – Vol. 37 – P. 129-281.

КОМПЛЕКСНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ КРАСНОЙ И СИНЕЙ ШПИНЕЛИ

Чернышева Е. А. (*ea.golovina@gmail.com*)

Геммологический центр МГУ, г. Москва

Аннотация: Предложен комплексный подход к определению географического происхождения красной и синей шпинели на основе микроскопии, рамановской спектроскопии включений, LA-ICP-MS. Для синей шпинели дополнительно установлены критерии кобальтовой природы окраски.

Ключевые слова: *шпинель, географическое происхождение, LA-ICP-MS, рамановская спектроскопия, оптическая спектроскопия, кобальт.*

Объект исследования. Цель работы - разработка комплексного алгоритма определения происхождения красной и синей шпинели по геохимическим, микроскопическим и спектральным признакам. Исследованы 40 природных образцов: 15 красных и розовых шпинелей из Могока (Бирма), Махенге (Танзания) и Лук Йена (Вьетнам) и 25 синих - из Лук Йена (Вьетнам) и Луканде (Танзания).

Методы. Применяли оптическую микроскопию, рамановскую спектроскопию включений и LA-ICP-MS; для синей шпинели - также УФ-видимую и ближнюю ИК-спектроскопию. Происхождение определяли по двумерным и тернарным геохимическим диаграммам, а микроскопию и рамановскую спектроскопию использовали как подтверждающие методы (рис. 1б, 2в).

Результаты. Для красной и розовой шпинели наиболее информативны Fe, Cr и Zn. образцы из Могока отличались высоким Cr и низким Fe, шпинели Махенге - повышенным Zn, Лук Йена - высоким Fe. Тернарные диаграммы Fe–(Cr+V)–Zn и Fe–Cr–Zn позволили разделить три группы (рис. 1а). С помощью рамановской спектроскопии были проидентифицированы такие включения как рутил, кальцит, пирит, апатит (рис. 1б) [1, 4].

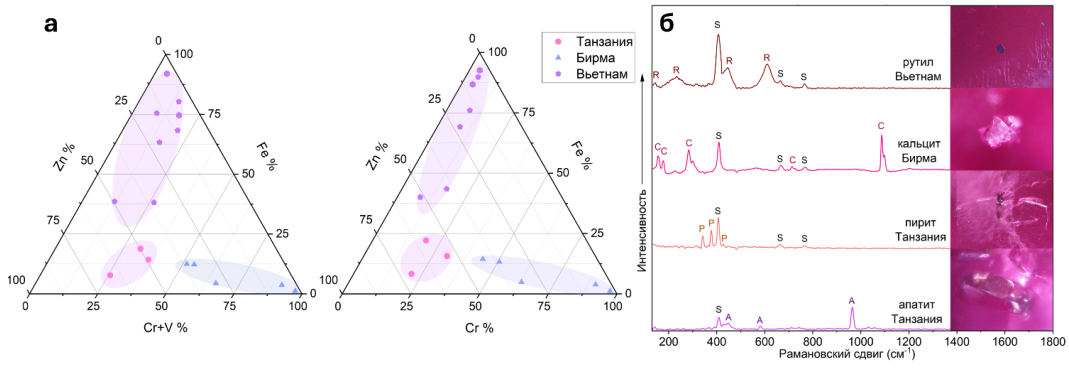


Рисунок 1. Тернарная диаграмма Fe–Cr+V–Zn и Fe–Cr–Zn для красной и розовой шпинели.

Для синей шпинели вьетнамские и танзанийские образцы разделяются на диаграмме lg(Zn)–lg(Fe), причём танзанийская шпинель обогащена Zn (рис. 2а). Рамановская спектроскопия выявила карбонаты, апатит, рутил и амфибол; ромбические ламеллы, предположительно хёгбомит, использовались как дополнительный признак Луканде (рис. 2в) [2, 5].

Наличие Co само по себе не подтверждает кобальтовую окраску. Ярко-синие образцы содержали 55–83 ppm Co при Fe/Co=18–112, тёмно-синие - 13–40 ppm при Fe/Co=140–679 и разделялись на диаграмме Co–lg(Fe/Co) (рис. 2б). Основным критерием являлось преобладание полос Co^{2+} в оптическом спектре поглощения при 545–550, 580–585 и 625–630 нм; при этом, Fe затемняет окраску, а Cr смещает её в фиолетовую область (рис. 2г) [3].

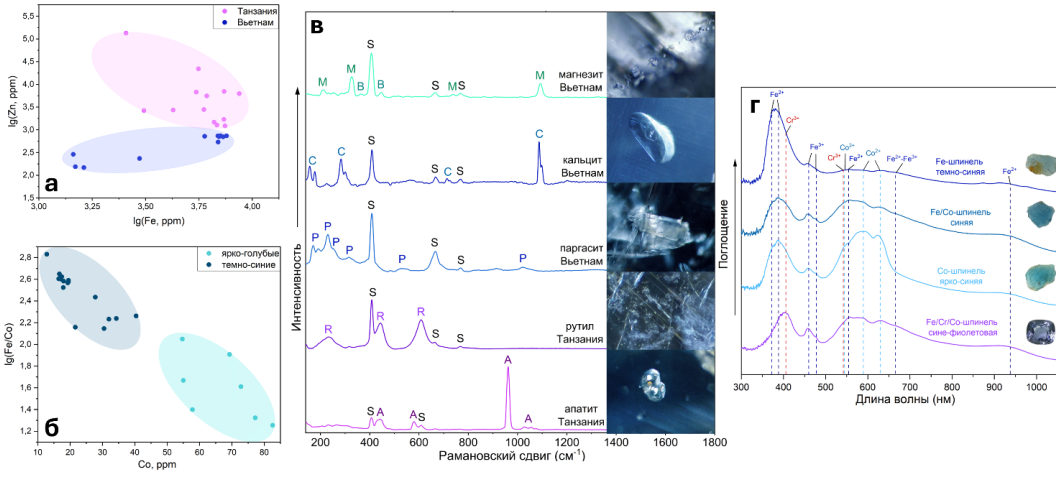


Рисунок 2. Диагностические диаграммы исследованных образцов: а - диаграмма lg(Zn)–lg(Fe) для синей шпинели; б - распределение синей шпинели по содержанию Co и lg(Fe/Co), в -рамановская спектроскопия включений синей шпинели, г - оптическая спектроскопия поглощения разных химических типов синей шпинели

Заключение. Предлагаемый алгоритм включает последовательное применение LA-ICP-MS и дискриминационных диаграмм, микроскопию с рамановской идентификацией включений и, для синей шпинели, обязательную оптическую спектроскопию. Геохимические данные являются основой определения происхождения, а внутренние признаки уточняют результат при перекрытии химических полей. Для синей шпинели задачи определения месторождения и природы окраски должны решаться раздельно: наличие Co не равнозначно кобальтовой окраске. Разработанный подход позволяет повысить обоснованность лабораторной атрибуции, однако требует дальнейшего расширения референсной базы образцов подтверждённого происхождения.

Список литературы:

1. Chankhantha C. et al. Characterisation of Pink-to-Red Spinel from Four Important Localities // Journal of Gemmology. – 2020. – Vol. 37, № 4.
2. Chauviré B. et al. Blue Spinel from the Luc Yen District of Vietnam // Gems & Gemology. – 2015. – Vol. 51, № 1. – P. 2–17.
3. D'Ippolito V. et al. Color Mechanisms in Spinel: Cobalt and Iron Interplay for the Blue Color // Physics and Chemistry of Minerals. – 2015. – Vol. 42, № 6. – P. 431–439.
4. Giuliani G. et al. Pink and Red Spinels in Marble: Trace Elements, Oxygen Isotopes, and Sources // The Canadian Mineralogist. – 2017. – Vol. 55, № 4. – P. 743–761.
5. Krzemnicki M. S., Leuenberger A., Balmer W. A. Cobalt-Bearing Blue Spinel from Lukande, near Mahenge, Tanzania // Journal of Gemmology. – 2023. – Vol. 38, № 5. – P. 474–493.

СТРУКТУРНО-ПРИМЕСНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ БЕСЦВЕТНЫХ ГРОССУЛЯРОВ ИЗ АФРИКИ

Шелементьева А.Ю. (shelementieva@gem-center.ru),
Шелементьев Ю.Б. (yuri@gem-center.ru)

Геммологический Центр МГУ, г.Москва

Аннотация: Во время экспедиции на Шри-Ланку осенью 2025 года на рынке были отмечены образцы бесцветных гранатов, которые по словам продавцов добыты на месторождениях Африки, без привязки к конкретной локации. В данной работе приводится комплексное исследование 4 образцов бесцветных гранатов ювелирного качества (Gr1-Gr4) (рисунок 1), особый интерес представляют их оптические особенности, среди которых эффект “тепловых волн”.

Ключевые слова: *Гранат, гроссуляр, эффект тепловой волны, аномальное двупреломление*

Теория.



Рисунок 1. Исследуемые в работе образцы гранатов. (Масса камней от 4,5ct до 5,95 ct)

Для исследования использовались стандартные геммологические методы, оптическая микроскопия, электронная микроскопия с микрозондовой приставкой, лазерная абляция с индуктивно-связанной плазмой и масс-спектрометрией (LA-ICP-MS), инфракрасная спектроскопия (FTIR), рамановская спектроскопия и микроскопия, УФ спектрометрия.

Физические свойства.

Показатель преломления, плотность и УФ люминесценция наблюдались на стандартном геммологическом оборудовании. По удельному весу (3,58-3,6г/см^3) и показателю преломления (1,730) данные образцы можно отнести к гроссуляру. Для всех образцов характерна желто-оранжевая люминесценция в длинноволновом УФ излучении.

Микроскопия.

При изучении образцов под оптическим микроскопом было выявлено

несколько удлиненных бесцветных минеральных включений кальцита и диопсида, а также темные уплощенные включения графита. Помимо включений, был отмечен эффект “тепловой волны” во всех образцах (рисунок 2).

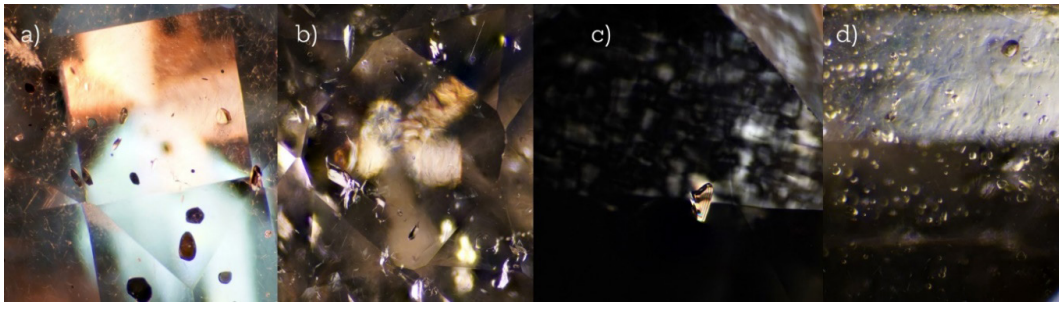


Рисунок 2. Включения в изучаемых гранатах; a) включения пластинок графита в Gr1; b) эффект “тепловой волны” в Gr2; c) включение кальцита и аномальное двупреломление, фото в поляризованном свете, Gr3; d) эффект “тепловой волны” и бесцветные минеральные включения кальцита и диопсида в Gr5.

Во всех исследованных образцах наблюдается характерный оптический эффект «тепловой волны», который уже был ранее описан в гессоните. Его присутствие в бесцветных гроссулярах представляет особый интерес. [4]

Помимо этого, в образцах наблюдается аномальное двупреломление, фиксируемое как в полярископе, так и в оптическом микроскопе при скрещенных николях. Проявление аномального двупреломления может быть обусловлено упорядочением катионов, ростовыми деформациями или присутствием структурных дефектов. Среди нескольких предложенных в литературе признаков, вызывающих оптические аномалии в гранате - некубическое распределение групп [(OH)4] в [SiO4] и деформации в процессе роста кристаллов. [2-3]

ИК спектроскопия.

В ИК-спектрах исследуемых гранатов в области 3500–3700 $см^{-1}$ наблюдаются несколько полос поглощения (3570, 3610, 3630, 3650, 3670 и 3690 $см^{-1}$), соответствующих валентным колебаниям OH-групп. Наличие множества линий указывает на присутствие гидрогранатовых дефектов, связанных с изоморфным замещением $SiO_4^{4-} \rightarrow (OH)_4^{4-}$. [5]

Изучение химического состава.

Химический состав гранатов был изучен при помощи сканирующего электронного микроскопа с приставкой микрозонд. Дополнительно был сделан химический анализ методом LA-ICP-MS для уточнения наличия элементов примесей. Результаты показали состав, соответствующий составу почти чистого гроссуляра, с основными количествами Si, Al и Ca, а также незначительным количеством Fe и Mg.

Выводы.

Изучение образцов бесцветного гроссуляра позволило выявить некоторые интересные особенности: аномальное двупреломление и эффект "тепловых волн", оранжевую УФ люминесценцию, присутствие ОН групп в структуре и минеральные включения, такие как кальцит и диопсид. Минеральный состав включений указывает на формирование гранатов в кальциево-силикатной среде и может отражать условия метасоматических процессов.

Совокупность полученных данных - химический состав, характер включений, наличие гидрогранатовых дефектов, аномальное двупреломление и микроструктурные особенности демонстрирует значительное сходство исследованных образцов с гроссулярами родингитового типа, описанными в ряде месторождений, включая Баженовский массив (Урал) [1] и Jeffrey Mine (Канада) [3]. Это позволяет предположить сходные условия их формирования, связанные с метасоматическими процессами в кальцийсодержащих породах, таких как родингиты.

Список литературы:

1. 1 Ерохин Ю.В. Баженовское. Минералогический Альманах (2017). Т. 22, Вып. 3. - 129
2. Куражковская В.С., Боровикова. Е.Ю. (2008). Инфракрасная и мессбауэровская спектроскопия. Учебное пособие. - М.: Геологический факультет, 2008. – 98 с
3. Badar M., Hussain S. (2015). Optical anomaly in near-end-member grossular garnet from the Jeffrey Mine, Quebec, Canada.econ. environ. geol. Vol:6(1) 1-7.
4. Chen T., Li G., Zhang L. (2025). The formation of the heat-wave effect in hessonite garnet. Minerals 2025, 15, 601.
5. Rossman G. R. (2006). Analytical methods for measuring water in nominally anhydrous minerals. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 62, 1–28.

Минералогический музей
имени А.Е. Ферсмана РАН

310 лет

МИНЕРАЛОГИЯ МЕТЕОРИТОВ



1 октября 2026 года

ПОЗДНИЙ МИНЕРАЛЬНЫЙ ПАРАГЕНЕЗИС В МАТЕРИКОВЫХ ПОРОДАХ МАГНЕЗИАЛЬНОЙ СЕРИИ ОБРАЗЦА «ЛУНЫ-16» КАК ИНДИКАТОР ПРИСУТСТВИЯ KREEP-КОМПОНЕНТА

Демидова С. И.[1] (*demidova@geokhi.ru*),
Лахманова Л. А.[1] (*lakhmanova.lida@list.ru*)

[1]*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, г. Москва*

Аннотация: Фрагменты редких материковых пород были обнаружены в образце реголита «Луны-16», в котором доминируют фрагменты морских базальтов и их производные. Породы магнезиальной серии широко представлены в образцах «Аполлон», где они характеризуются повышенным содержанием KREEP – материала, богатого K, РЗЭ и P., концентрирующегося в поздней минеральной ассоциации. Уникальное расположение района отборы пробы «Луны-16» в восточной части видимой стороны Луны, в области, расположенной вдали от обогащенного KREEP Океана Бурь, делает изученные фрагменты важнейшим источником информации о KREEP-материале в области, обедненной KREEP. В работе представлены результаты изучения поздней минеральной ассоциации пород магнезиальной серии образца «Луны-16».

Ключевые слова: *лунные образцы, материковые породы, KREEP*

Большая часть информации о материковых породах магнезиальной серии получена по результатам исследования образцов, доставленных миссией «Аполлон» с видимой стороны Луны, из области распространения KREEP-содержащих пород. Ранее считалось, что именно примесь KREEP-материала ответственна за формирование родительских расплавов первичных пород магнезиальной серии [4]. Присутствие KREEP в этих породах фиксируется в содержании редких элементов и наличии богатых РЗЭ фосфатов и циркониевых фаз [6]. Однако недавние находки магнезиальных лунных метеоритов NWA 10401 и Arguin 002 с низким содержанием KREEP [5,7], а также ряда метаморфизованных магнезиальных анортозитовых пород, присутствующих как в лунных образцах, так и в метеоритах, ставят вопрос о присутствии KREEP в породах магнезиальной серии в других районах Луны. Различия в содержании РЗЭ и других несовместимых элементов в этих образцах значительны, и основные характеристики первичных пород трудно определить.

Изученные фрагменты материковых пород «Луны-16» представлены шпинелевыми троктолитами, троктолитовым анортозитом и анортозитовым норитом, обладающими магматической структурой. В этом ряду магнезиальность мафических фаз уменьшается с уменьшением содержания анортитового минала в плагиоклазе, и породы представляют собой последовательность от менее к более дифференцированным разновидностям, что характерно для пород магнезиальной серии миссий «Аполлон» [2]. Главными породообразующими минералами являются плагиоклаз, оливин и/или низкокальцие-

вый пироксен, второстепенными - шпинель, высококальциевый пироксен. Поздняя ассоциация различается от фрагмента к фрагменту, но для всех них характерно присутствие стекла, обогащенного кремнием и щелочами, и ряда KREEP-содержащих фаз.

Во фрагменте шпинелевого троктолита с магматической текстурой обнаружены зональные кристаллы оливина (Fo_{69-94}) с содержанием P_2O_5 до 0.1 мас.% на контакте с поздним мезостазисом. В единичном фрагменте анортозитовой породы с интерсертальной текстурой обнаружены редкие реликты P-содержащего оливина (Fo_{69-76}) с содержанием P_2O_5 до 0.2 мас.%. В стекловатом мезостазисе обоих фрагментов наблюдается повышенное содержание титана, фосфора и щелочей (1.5–1.7 мас.% TiO_2, 0.1–0.3 мас.% K_2O, 0.3–0.4 мас.% Na_2O, 0.1–0.2 мас.% P_2O_5) [1].

Во фрагменте анортозитового норита, сохранившего реликты магматической структуры K-Si-стекло присутствует в интерстициях между главными породообразующими минералами. Несколько вытянутых идиоморфных кристаллов мерриллита (5x70 мкм), обогащенного РЗЭ (до 1-2 мас.%), расположены на контакте стекла с плагиоклазом или пироксеном. В стекле также присутствует троилит, Fe-Ni металл и единичный игольчатый кристалл Cl- апатита. В поздней ассоциации локально наблюдаются мелкие зерна ильменита, иногда в срастании с бадделеитом. Удивительно, но мерриллит – основной носитель РЗЭ в породах магнезиальной серии - имеет такое же содержание РЗЭ, как и мерриллит норитового метеорита Arguin 002, который по ряду геохимических признаков отнесен к обедненным KREEP породам магнезиальной серии [7].

Таким образом, поздние ассоциации как магнезиальных (троктолитовых), так и более железистых (норитовых) пород магнезиальной серии «Луны-16» демонстрируют признаки обогащения KREEP, что находит подтверждение и в изотопных данных [3], однако количество KREEP может быть незначительным.

Работа поддержана грантом РНФ 26-17-00143.

Список литературы:

1. Демидова С.И., Аносова М.О., Кононкова Н.Н., и др. Фосфор-содержащие оливины лунных пород: источники и их локализация в лунной коре // Геохимия. – 2019. – Т. 64. – С.803-825.
2. Демидова С.И., Аносова М.О., Лахманова Л.А. Материковые породы магнезиальной серии в образце реголита «Луны-16» // Труды ВЕСЭМПГ-2026. – М: ГЕОХИ РАН, 2026
3. Demidova S., Nemchin A., Guan Y., et al. A ~4.0-age Magnesian Suite rock fragment in Luna-16 soil sample: KREEP-rich or KREEP-poor? // Meteoritics & Planetary Science (submitted)
4. Elardo, S.M., Pieters, C.M., Dhingra, D., et al. The evolution of the lunar crust //

Reviews in Mineralogy and Geochemistry. – 2023. – V. 89. – P. 293-338.

5. Gross J., Hilton A., Prissel T. et al. Geochemistry and Petrogenesis of Northwest Africa 10401: A New Type of the Mg-suite Rocks // Journal of Geophysical Research Planets. – 2020. – V. 125. –e2019JE006225.

6. Shearer C., Neal C.R., Glotch T.D., et al. Magmatic evolution II: A new view of post-differentiation magmatism // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. – 2023. – V. 89. – P. 147-206.

7. Wang Z., Tian W., Wang W.-RZ, et al. 2025. Genesis and timing of KREEP-free lunar Mg-suite magmatism indicated by the first norite meteorite Arguin 002 // Nature Communications. – 2025. –V. 6. – P. 170.

ПЕРВАЯ НАХОДКА ФОСФОРСОДЕРЖАЩЕГО ОЛИВИНА В МЕЗОСИДЕРИТАХ

Камашева С. К. (*skk2001@mail.ru*),
Рязанцев К.М. (*ryazan-konst@rambler.ru)*,
Лоренц К.А. (*c-lorenz@yandex.ru*)

ГЕОХИ РАН, г. Москва

Аннотация: в ходе изучения крупной ультраосновной брекчии в мезосидерите Vaca Muerta, состоящей из обломков дунитовых и пироксенитовых пород с пироксен-троилитовым цементом, были обнаружены зерна фосфористого и фосфорсодержащего оливина. В краевых частях дунита на контакте с пироксен-троилитовым цементом брекчии часто выделяется зона с повышенными содержаниями фосфора (до 0,65 мас. % P2O5). Наиболее высокие концентрации фосфора были обнаружены в оливиновых ксеноморфных зернах (размером до 200 мкм), находящихся непосредственно в цементе брекчии (до 1,13 мас. % P2O5). Иногда в этих зернах наблюдается осцилляторная и секториальная зональность разной степени выраженности. Упоминаний о наличии фосфористых оливинов в мезосидеритах ранее встречено не было. Осцилляторная и секториальная зональность по фосфору обычно указывает на быструю скорость кристаллизации. А ксеноморфная форма зерен на эпизоды растворения с последующим дорастанием оливина и пироксена без фосфора. Обнаруженный фосфорсодержащий оливин может дать новую информацию об истории ультраосновных пород мезосидеритов.

Ключевые слова: *фосфористый оливин, метеорит, ультраосновной ксенолит, мезосидерит, брекчия*

Мезосидериты – это железо-каменные метеориты, состоящие из обломков силикатных горных пород (габбро, пироксениты и дуниты) и силикатно-металлической матрицы (никелистого железа до 50%) [3]. Метеорит Vaca Muerta относится к мезосидеритам типа A1.

Нами было начато изучение крупного (9 см) среза ксенолита из мезосидерита Vaca Muerta. Ксенолит является перекристаллизованной ультраосновной брекчией со сложным строением и сложен фрагментами ультраосновных пород разного размера в троилит-пироксеновой матрице (рис. 1). Троилит распространен по всей породе относительно равномерно. В матриксе брекчии помимо пироксена и троилита наблюдаются небольшие зерна меррилита, плагиоклаза, оливина, хромита и Fe-Ni металла. Пироксен в основной массе образует гранулитовую структуру. Фрагменты ультраосновных пород в брекчии в свою очередь также являются брекчиями, сложенными пироксенитовыми, оливиновыми и пироксен-оливиновыми породами в троилит-пироксеновой основной массе.

В некоторых кластах выделяются оливиновые породы, которые на контакте с вмещающей их основной массой имеют область богатую фосфором (до 0,64 мас. % P_2O_5) (рис. 2а, г). Область фосфорсодержащего оливина имеет разную толщину и уменьшает свою интенсивность по мере продвижения

вглубь оливина. В редких случаях можно наблюдать, как область фосфористого оливина огибает зерно оливина без фосфора, хотя в BSE изображении границ между зернами нет. Иногда в кайме фосфористого оливина выделяются отдельные зерна, которые имеют осцилляторную зональность (рис. 2г).

Пироксен-троилитовая основная масса имеет мелкозернистую структуру. Оливин представлен в породе в виде ксеноморфных зерен, небольшого размер (до 200 мкм) (рис. 2б, в) с сильно искривлёнными границами, в которых также наблюдается повышенное содержание фосфора, и даже большее чем в краевых областях оливиновых пород. Именно в них были получены самые высокие концентрации фосфора (до 1,13 мас. % P_2O_5). В таких оливинах часто наблюдается хорошо выраженная осцилляторная и секториальная зональность (рис. 2в-е).

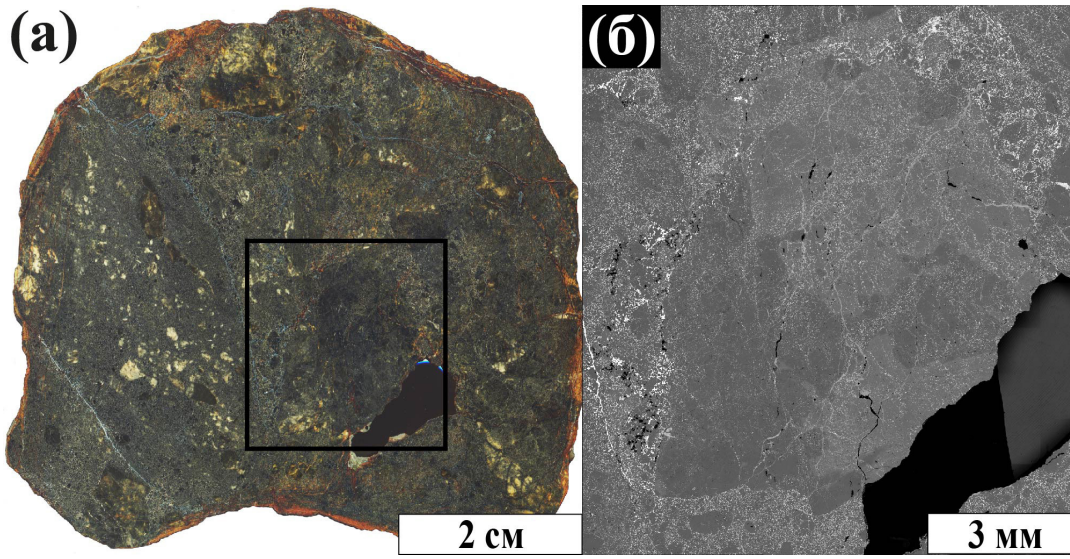


Рисунок 1. Крупный ксенолит ультраосновной брекчии из мезосидерита Vaca Muerta: (а) общий вид, квадратом выделен исследуемый обломок (1б); (б) один из обломков брекчии с фосфорсодержащим оливином (BSE изображение) (на рисунке 1а выделен квадратом).

Наличие осцилляторной зональности, может говорить о кристаллизации этих оливинов в течении очень короткого времени (от нескольких дней до нескольких месяцев) [5], а также говорит о их магматической природе [2]. Такая быстрая кристаллизация должна была произойти в следствии высокой степени переохлаждения. Некоторые возможные причины столь сильного переохлаждения: смешение магм, контакт с более холодной средой при внедрении или течении, срыв верхнего пограничного слоя магматической камеры в результате ударного события [1]. Одним из механизмов быстрого переохлаждения может быть также декомпрессия в ходе быстрого подъема расплава к поверхности, что могло привезти к извержению на поверхность [4].

Фосфорсодержащие оливины как в пироксен-троилитовой породе, так и в фосфористой кайме обломков дунита имеют неровные изъеденные очертания. На основе этого наблюдения можно предположить, что эти оливины подверглись частичному растворению, в ходе изменения состава окружающего расплава, и последующему дорастанию кристаллов оливина и пироксена без фосфора. Похожий сценарий был предложен для кумулятивных оливинов из массива Baima (Китай) [6].

Скорей всего можно сказать, что условия формирования дунитовых и пироксенитовых обломков, фосфорсодержащих оливинов и пироксен-троилитовой вмещающей массы были разные.

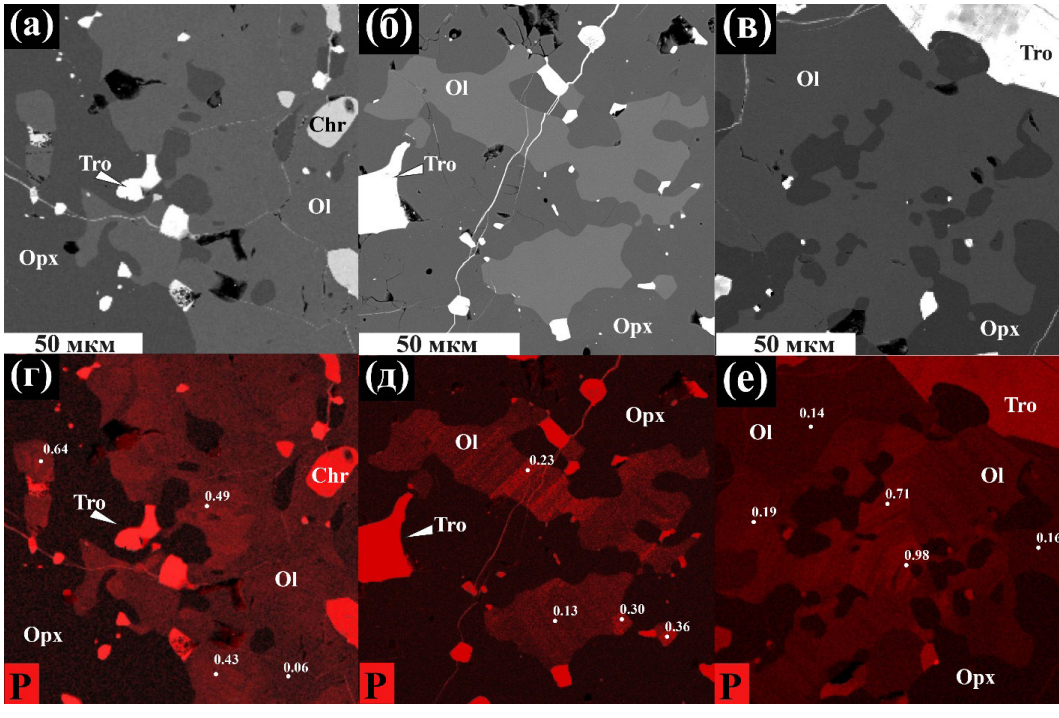


Рисунок 2. Оливины с повышенным содержанием фосфора. а), г) фосфорсодержащий оливин в краевых частях оливиновых пород: а) BSE, г) элементная карта по P; б) - е) фосфористый оливин в основной троилит-пироксеновой массе: б), в) BSE, д), е) элементная карта по P (цифрами отмечены содержания P_2O_5 (мас. %). *Примечание: яркий цвет троилита и хромита на элементных картах – артефакт обработки спектра, реальное содержание фосфора в них меньше предела обнаружения. Окраски силикатов корректно отражают концентрации фосфора.*

Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда №26-17-00143.

Список литературы:

1. Brandeis G., Jaupart C. (1986) On the interaction between convection and crystallization in cooling magma chambers. *Earth Planet. Sci. Lett.* 77(3–4), 345–361.
2. Grant T.B., Kohn S.C. (2013) Phosphorus partitioning between olivine and melt: An experimental study in the system Mg_2SiO_4-$Ca_2Al_2Si_2O_9$-$NaAlSi_3O_8$-$Mg_3(PO_4)_2$. *Amer. Mineral* 98, 1860–1869.
3. Mittlefehldt D.W., McCoy Timothy J., Goodrich C.A., and Kracher A. (1998) Non-chondritic meteorites from asteroidal bodies. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 36(1) 4.1–4.195.
4. Shearer C.K., Aaron P.M., Burger P.V. et al. (2013) Petrogenetic linkages among fO2, isotopic enrichments-depletions and crystallization history in Martian basalts. Evidence from the distribution of phosphorus in olivine megacrysts. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 120, 17–38.
5. Watson E.B., Cherniak D.J., Holycross M.E. (2015) Diffusion of phosphorus in olivine and molten basalts. *Amer. Mineral.* 100, 2053–2065.
6. Xing C.M., Wang C.Y., Tan W. (2017) Disequilibrium growth of olivine in mafic magmas revealed by phosphorus zoning patterns of olivine from mafic– ultramafic intrusions. *Earth Planet. Sci. Lett*. 479, 108–119.

МАТЕРИКОВЫЕ ПОРОДЫ МАГНЕЗИАЛЬНОЙ СЕРИИ ВО ФРАГМЕНТЕ БАЗАЛЬТОВОЙ БРЕКЧИИ ЛУННОГО МЕТЕОРИТА DHOFAR 287

Лахманова Л. А. (*lakhmanova.lida@list.ru*),
Демидова С. И. (*demidova@geokhi.ru*),
Аносова М.А. (*anosova@geokhi.ru*)

ГЕОХИ РАН, г. Москва

Аннотация: В лунной брекчии Dhofar 287B, помимо многочисленных кластов морских базальтов и их производных, были обнаружены два фрагмента материковых брекчий с ударно-расплавной матрицей. Химический состав плагиоклаза и оливина этих фрагментов отличается от наблюдаемых в морских базальтах метеорита более анортитовым составом плагиоклаза и более высокой магнезиальностью оливина. Совокупность данных признаков наряду с обогащением этих фаз редкоземельными элементами указывает на их связь с первичными материковыми породами магнезиальной серии.

Ключевые слова: *лунные метеориты, породы магнезиальной серии, лунные морские базальты*

Породы Луны преимущественно представлены брекчиями — продуктами интенсивной метеоритной переработки первичных магматических пород. Среди исходных материковых литологий преобладают ферроанортозиты и породы магнезиальной серии. Последние, по современным представлениям, соответствуют ранним интрузивным телам, внедрявшимся в ферроанортозитовый слой коры, и объединяют такие разновидности, как дуниты, (шпинелевые) троктолиты, нориты и габбро-нориты [3]. Породы магнезиальной серии служат уникальным ключом к пониманию магматической истории ранней Луны.

В настоящей работе был изучен один плоско полированный аншлиф лунного метеорита Dhofar 287, хранящийся в Метеоритной коллекции ГЕОХИ РАН. Химический состав минеральных фаз определялся с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Mira 3FEG (ГЕОХИ РАН). Условия работы соответствовали напряжению 20 кВ, рабочему расстоянию 15 мм и диаметру пучка 1 мкм. Содержание микроэлементов было определено методом лазерной абляции на масс-спектрометре ThermoElement-XR с ионизацией в индуктивно-связанной плазме, оснащенным лазерной системой TELEDYNE Photon Machines LSX-213 G2+ (ГЕОХИ РАН).

Изученный образец является базальтовой обломочной брекчией, состоящей из множества фрагментов пород и мономинеральных обломков, расположенных в мелкозернистой матрице. Главными компонентами метеорита являются класты базальтов, имеющие полнокристаллические и витрофировые структуры [2]. Помимо обломков пород морского генезиса, в составе метеорита идентифицированы два фрагмента брекчий с ударно-расплавной

матрицей, отличающиеся по составу минералов.

Наиболее крупный из них, имеющий вытянутую форму и достигающий 4,5х0,5 мм в длину, содержит многочисленные класты неправильной формы. В его составе доминируют плагиоклаз и оливин, наблюдается единичный оливин-плагиоклазовый сросток, реже отмечается пироксен (рис.1). Среди акцессорных минералов присутствуют редкие кристаллы хромита и ильменита. Второй фрагмент размером 240х140 мкм, содержит угловатые обломки пироксена, оливина, плагиоклаза, апатита и фазы кремнезёма. В обоих случаях матрица брекчий состоит из более мелких обломков минеральных зёрен и раскристаллизованного ударного расплава.

Плагиоклаз изученных брекчий имеет высококальциевый состав с узкими вариациями состава (An_{92-96}). От плагиоклазов морских базальтов лунного метеорита Dhofar 287B они отличаются более низким содержанием железа (до 0,5 мас. % FeO), титана (до 0,07 мас. % TiO_2) и повышенными концентрациями алюминия. Средняя магнезиальность оливина в брекчиях (Mg# = 72–80) заметно выше, чем в морских базальтах, где пик значений приходится на интервал Mg#=45–59. Самый магнезиальный оливин брекчии (Fo_{90}) встречается в оливин-плагиоклазовом сростке. Данный оливин характеризуется повышенным содержанием фосфора (до 0,1 мас. % P_2O_5). Пироксен представлен преимущественно пижонитом, исключение составляют два зерна, относящиеся к высококальциевому авгиту. Они имеют магнезиальность (Mg#= 55–75) в меньшем кластe и (Mg#= 72–81) в большом кластe. Матрица изученных брекчий отличается от преобладающих базальтов более высокой магнезиальностью (MG#=67) и повышенным содержанием алюминия (20 мас. %), что указывает на их материковое происхождение.

Таким образом, магнезиальный состав оливина и анортитовый состав плагиоклаза, преобладание в ассоциации обломков оливина и плагиоклаза, а также присутствие редких фосфатов позволяет предположить, что исходной породой мог быть троктолит, относящийся к материковым породам магнезиальной серии, согласно [3]. Подтверждением служит находка фосфорсодержащего оливина, который рассматривается в качестве индикаторного минерала для пород данной группы [1].

Геохимические данные по распределению редкоземельных и других элементов полностью согласуются с минералогическими наблюдениями. Спектры распределения редкоземельных элементов (РЗЭ) в плагиоклазах изученных брекчий характеризуются отчетливым обогащением легкими РЗЭ и выраженной положительной европиевой аномалией. Содержание РЗЭ в плагиоклазе варьируют от 10 до 100 хондритовых значений CI. Плагиоклазы отличаются высокими концентрациями Y 1,5–1,7 мкг/г и Ba 131–163 мкг/г. Повышенные концентрации этих некогерентных элементов указывают на примесь KREEP, что является характерным признаком первичных пород магнезиальной серии, изученных в образах миссий «Аполлон» [3].

Таким образом, совокупность минералого-геохимических признаков с высокой степенью достоверности позволяет установить связь изученных брекчий с материковыми породами магнезиальной серии.

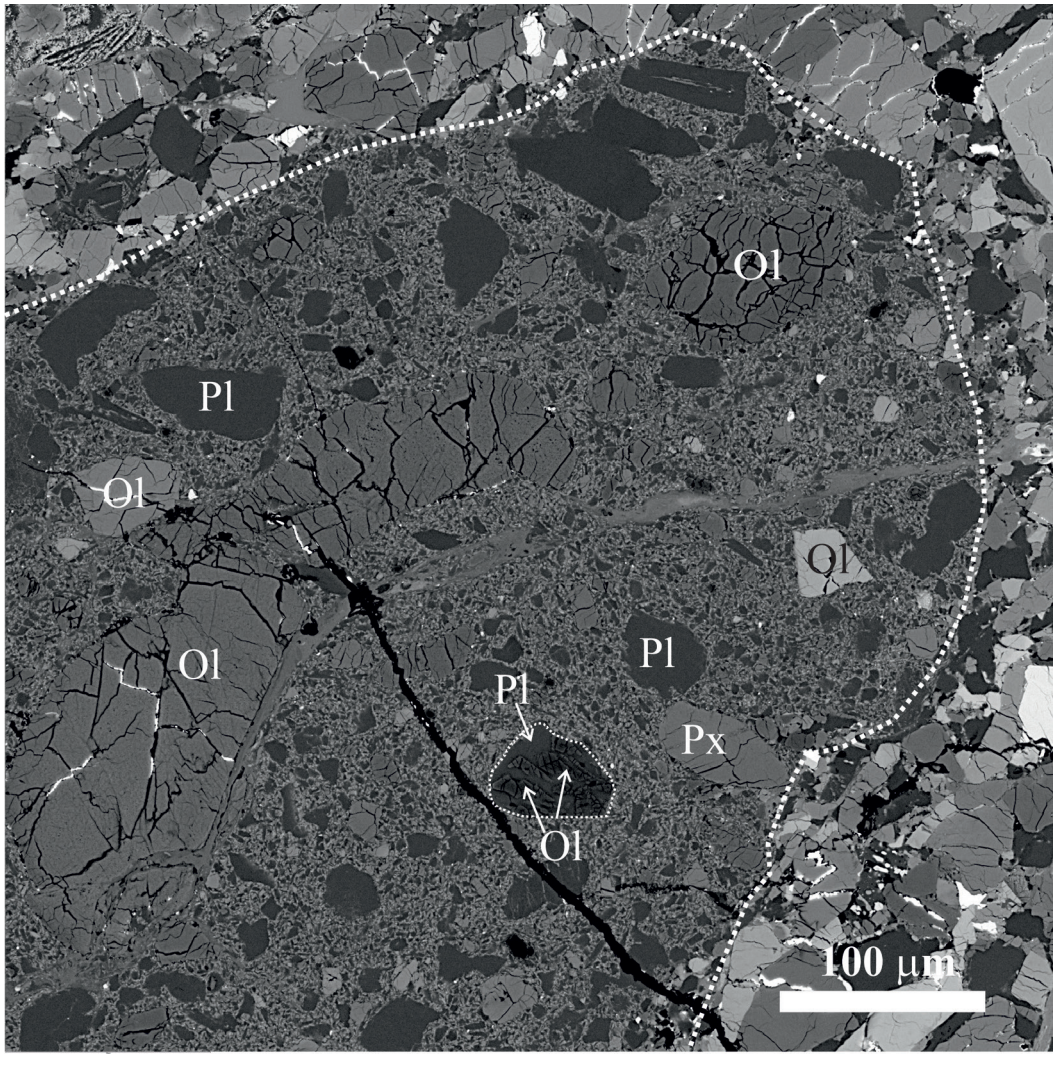


Рис. 1. Брекчия с ударно-расплавной матрицей в метеорите Dhofar 287

Исследования выполнены в рамках гранта РНФ, тема № 26-17-00143.

Список литературы:

1. Демидова С. И., Аносова М. О., Кононкова Н. Н., Нтафлос Т., Брандштеттер Ф. Фосфорсодержащие оливины лунных пород: Источники и их локализация в лунной коре // Геохимия. – 2019 – Т. 64, № 8 – С. 803–825.

2. Demidova S. I., Nazarov M. A., Anand M., Taylor L. A. Lunar regolith breccia Dhofar 287B: A record of lunar volcanism // Meteoritics & Planetary Science. – 2003 – Т. 38, № 4 – С. 501–514.

3. Shearer C. K., Elardo S. M., Petro N. E., Borg L. E., McCubbin F. M. Origin of the lunar highlands Mg-suite: An integrated petrology, geochemistry, chronology, and remote sensing perspective // American Mineralogist. – 2015 – Т. 100, № 1 – С. 294–325.

ЭКЗОТИЧЕСКИЕ НАХОДКИ КРУПНЫХ ФРАГМЕНТОВ ТЕЛ, СЛОЖЕННЫХ СИЛИЦИДАМИ ЖЕЛЕЗА, НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ (РОССИЯ, ЗАБАЙКАЛЬЕ И МАГАДАНСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Савва Н.Е. (*nsavva78@mail.ru*)

ФГБУН Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н. А. Шило ДВО РАН, г. Магадан

Аннотация: Рассмотрены составы двух экзотических тел, упавших на земную поверхность, сложенных силицидами Fe. В обоих случаях они имеют следы плавления и кипения. Одно из тел массой массой 12 кг, обнаружено охотником в Сибирской тайге в 1982 г на правобережье реки Нерча (Забайкалье), в зоне пролета Тунгусского метеорита. Оно сложено гупейитом Fe3Si и содержит вкрапления игольчатого рабдита. В расплавленной пористой коре наблюдается эвтектика шрейберзит – гупеит. Второе тело – массой более 50 кг найдено в 2005 г в заболоченной местности у подножия г. Абориген (Магаданская область, Ягоднинский район, вблизи оз. Джека Лондона).; сложено преимущественно дисилицидом железа FeSi2 – лебоитом? с редким вхождением мелких кристаллических фаз карбидов кремния и титана. Сделан вывод о прохождении этих тел через плотные слои атмосферы.

Ключевые слова*: силициды железа, космос.*

Введение

Силициды железа – природные соединения и искусственные сплавы железа и кремния, которые относительно редко, встречаются в природе. Обычно, их выявляют в осадочных отложениях (Тищенко и др., 2016), имеются находки в лунном грунте и исключительно редко в метеоритах (Yu Zuxiang ,1984). Ряд работ посвящен изучению этой группы минералов (Новогородова и др. 1983; Keil, Berkley, Fuchs (1982); Jenniskens et al, 2009, Шевко и др., 2014). Как правило, размеры находок не велики, поэтому в настоящем сообщении мы расскажем о двух крупных телах силицидов железа, имеющих следы прохождения через плотные слои атмосферы (нагрев, плавление, кипение), обнаруженных на Земной поверхности, в разных районах России. Об одной из находок в Сибири (Забайкалье) ранее была публикация (Savva et al., 2019), другая находка в Магаданской области (район горы Абориген, оз. Джека Лондона), описывается впервые.

Забайкалье – «Илекта»

Тело силицида железа, массой 12 кг было случайно обнаружено охотником села Кыкер в Сибирской тайге на правобережье реки Нерча, Тунгокоченского района, Забайкальского края в 2010 г. Координаты места находки: 53° 19’ С.Ш., 116° 19’ В.Д. Территория расположена в зоне пролета Тунгусского метеорита в 25 км от охотничьего поселка Зеленое Озеро. Тело названо «Илэкта» по ближайшему ручью, впадающему в реку Нерча. Охотник Николай Дунаев обратил внимание на округлую форму камня,

его ямчатую поверхность, большой вес (12кг.), оплавленность, высокую магнитность и металличность основной массы на свежем сколе. Фрагмент тела (отпил размером 12х4х1 см) и фотографии были переданы нам на изучение в СВКНИИ ДВО РАН, г. Магадан. Внешний вид находки и определение химического состава позволили выявить следы кипения и плавления на поверхности тела, и установить, что его основная масса сложена силицидом железа – гупеитом (Fe_3Si). В составе устойчиво отмечаются концентрации: Fe-85 мас% и Si-15мас%; а также включения шрейберзита в коре плавления, а по массе тела развит игольчатый марганцовистый рабдит и редкие скопления мелких кристалликов карбида титана (рис 1, табл. 1). Общий вид тела «Илекта» на рис 1 ***а*** передан нам Г.П. Берзиным – одним из авторов находки.

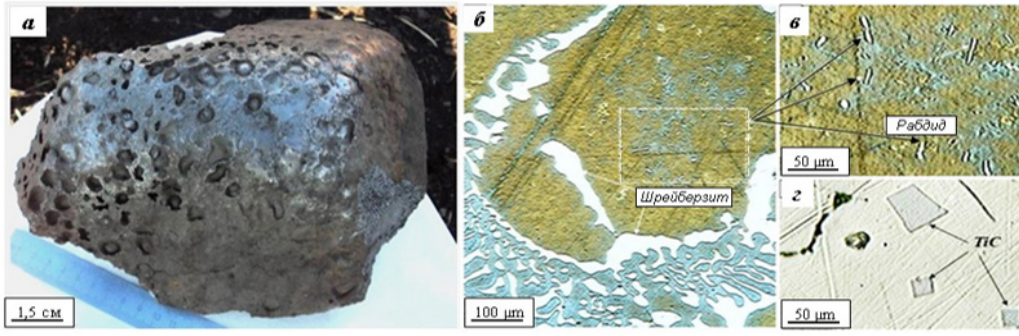


Рис.1.Общий вид и минеральные ассоциации тела «Илекта»: ***а*** – оплавленное тело-силицида железа; ***б*** – эвтектика гупеита и шрейберзита; ***в*** – игольчатые кристаллы рабдита в гупеите (структурное травление HCl) ***г*** – идиоморфные кристаллы карбида Ti в гупейите.

На срезе у краев тела отчетливо отмечаются следы пластических деформаций.

Вначале при изучении экзотической находки было выполнено сканирование его поверхности. Предварительно стало известно, что по химическому составу образец соответствует силициду железа (Fe_3Si) и покрыт пленкой глинисто-слюдистых минералов с примесью гидроксидов Fe (налеты земного происхождения).Там же в поверхностном слое образца методами ME-ICP были установлены: Ni – 0,11; Co – 0,03; Ti – 0,49; Mn – 1,03; P – 2,6 мас.%.

По данным микрорентгеноспектрального анализа основная масса тела состоит из гупейита – Fe_3Si, редкого силицида железа. Трапециевидные в срезе кристаллические включения в коре плавления представлены карбидом титана (до 68.5 мас.% Ti), в эвтектическом расплаве присутствуют также марганцовистый фосфид железа, отвечающий по составу марганцовистому шрейберзиту, а в матриксе силицида железа отмечаются закономерно расположенные включения игольчатых кристаллов рабдита (рис 1 ***в-г*****,** таб.1).

Таблица1. Результаты микрорентгеноспектрального анализа различных фаз образца, вскрытых в аншлифах, мас%

Si	P	Ti	Cr	Mn	Fe	Итог
Шрейберзит						
6.62	15.27	1.79	0.51	5.24	73.53	102.96
7.53	13.79	0.63	0.41	5.28	74.83	102.47
6.99	14.60	0.72	0.40	5.15	75.38	103.24
7.29	14.23	0.58	0.36	5.00	75.65	103.11
Гупейит						
15.35	0.42			1.09	86.57	103.43
15.54				1.23	86.87	103.63
15.38		1.17			85.48	102.03
15.40		1.25			85.60	102.24
15.49		1.19			85.33	102.01
15.30		1.13			85.52	101.96
15.54				1.15	85.73	102.42
14.97	0.32			1.13	82.50	98.91
14.68	0.32			1.17	81.60	97.77
14.63	0.30			1.06	83.78	99.76
15.54				1.15	85.73	102.42
Карбид титана						
		68.50			2.70	71.20
0.26	0.56	65.90	1.86	0.17	3.82	72.58
30.25	4.35	47.48	0.80			90.44

САМЕВАХ, СВКНИИ ДВО РАН, аналитик Т.В.Субботникова.

Гупейит (Fe_3Si; IMA 1983-087) описан и назван в честь метеорита Яньшань провинции Хэбэй (Китай), где впервые был найден в 1984 году (Yu Zuxiang,1984). Минерал образуется в среде, лишенной кислорода, возможно даже в космосе. Искусственное получение массы гупейита 12 кг в земных условиях невозможно. Это обусловлено тем, что гупейит получают в высоком вакууме 10^{-7} Па, когда при взаимодействии атомов железа с поверхностью кремния образуются супертонкие пленки, растущие со скоростью 0,16 нм/мин (Варнаков и др., 2014; Тарасов и др., 2014; Овчинников и др. 2016). В справочных данных гупейит отнесен к классу редких минералов космического происхождения. Оплавленная поверхность и следы кипения предполагают, что гупеитовое тело попало на Земную поверхность из космоса (Savva et al., 2019).

Магаданская область – «Абориген»

Обломки тела плитообразной формы найдены в 1994 г. Александром Сергеевичем (фамилия не известна) у подножия пика Абориген (Ягоднинский район, Магаданская область, вблизи оз. Джека Лондона. Координаты вершины горы 61°58′ с. ш., 149°23′ в. д., высота: 2287 м) По описанию очевидца, плитообразные обломки серебристо-белого цвета с оплавленной натёчной поверхностью лежат в неглубокой воронке на поверхности в заболоченной тундре. К сожалению, точных координат находки не имеется. Тело названо «Абориген» по названию, возвышающейся рядом горной вершины.

Для исследования был передан скол, захватывающий натёчную поверхность и подошву тела, размером 15х15х5.5см. Натёчные выступы имеют бугристую поверхность, и каплевидные образования. На подошве тела отпечатки выгоревшей растительности (рис.2 ***а-б***). Вещество имеет оловянно-белый цвет с лёгкой серовато-голубой побежалостью. Оно хрупкое, плотность около 12 г/см^3. Магнитность отсутствует. Твердость, по шкале Мооса, 6-7 (режет стекло).

Для изучения материала тела «Абориген» проведены микроскопические исследования, выполнены количественный спектральный анализ по методике ЭКСА (аналитик Рязанова Г. С.) микрорентгеноспектральные анализы на приборе «Camebax» по эталонам сравнения (аналитик Михайлов Д. Н) в Аналитическом Центре СВКНИИ ДВО РАН, г. Магадан.

Спектральный анализ показал, что основу составляют Fe, Si, Al. В меньших количествах встречен ряд химических элементов (см.таб.2).

В аншлифах установлено несколько фаз, отличающихся по составу (таб. 3) и отражению: главная фаза наиболее распространенная - $FeSi_2$ (дисилицид железа лебоит? с небольшой примесью Al). Менее распространенная, титанистая фаза (Ti до 17; Fe до 40, Si до 37 и Al до 5 мас.%) с более низким отражением иногда образует эвтектику с лебоитом? (рис. 3 ***б, в, г***). Кроме того, содержатся редкие включения идиоморфных кристаллов карбида Ti. Отмечаются единичные мелкие (0,5-1,0 мм) ксеноморфные включения Cu (рис. 3 ***б***).

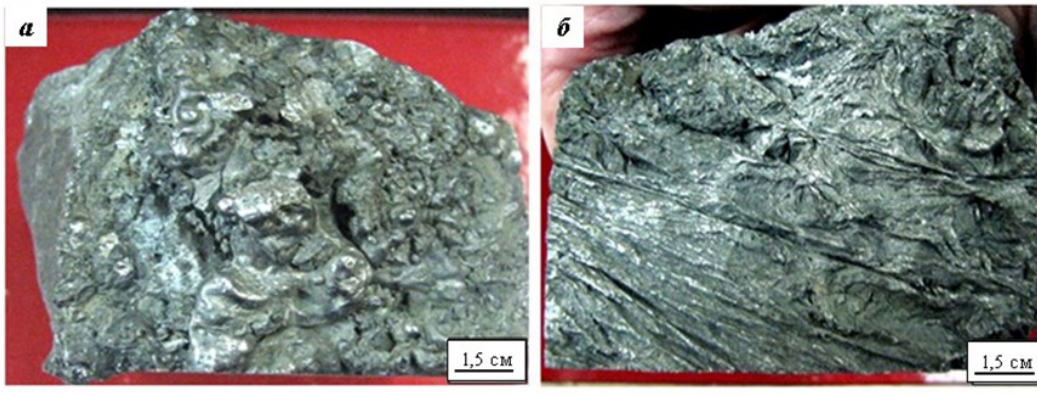


Рис.2. Поверхности тела «Абориген»: ***а*** – верхняя оплавленная; ***б*** - нижняя с отпечатками выгоревшего растительного покрова.

Таблица 2. Валовый состав компонентов, тела «Абориген», (г/т).

Ti	Mg	Cu	Pb	Cr	Mn	Mo	Sn	Ca	Zn	Co	Ni
0.25%	0.67%	1.4	0.0018	0.007	2.0%	0.0008	0.0026	1.8	0.008	0.008	0.055

Таблица 3. Состав основных фаз, тела «Абориген», по данным микрорентгеноспектрального анализа, мас%

Al	Ca	Mn	Ti	Mg	Fe	Si	Сумма
Основная фаза, отвечающая по составу лебоиту $FeSi_2$ ($Fe_{1.020}$ $Si_{1.980}$)							
4.0	0.0	0.7	0.0	0.0	52.4	43.3	100.4
0.7	0.0	0.2	0.0	0.0	54.9	46.6	100.2
0.4	0.0	0.1	0.0	0.1	50.9	49.4	100.9
1.7	0.0	0.4	0.0	0.1	50.5	47.6	100.3
Титанистая фаза (более низкоотражающая)							
5.7	0.0	0.4	17.2	0.1	40.2	36.4	99.9
1.3	0.0	0.9	26.8	0.0	37.6	34.4	101.0

Представляется, что обломки лебоита? выпали из космоса в разогретом и оплавленном состоянии (кора плавления с натеками и отпечатки растительности в подошве тела (рис.2). Также на внешней оболочке следы пластических деформаций (рис. 3 ***а***), полученные при ударе о земную поверхность, в разогретом состоянии.

В системе Fe-Si существует ряд силицидов: Fe_3Si, Fe_2Si, Fe_5Si_3, FeSi, $FeSi_2$, $FeSi_{2,33}$. При 1000 ºС степень разложения FeSi 2,33 составляет 94,5 %. Основными продуктами разложения является FeSi, Si и $FeSi_2$. В небольшом количестве образуется $FeSi_{2,43}$. (Шевко и др., 2014). Возможно, при разогреве и плавлении в плотных слоях атмосферы, произошло разложение силицида железа с изменением первичного состава. Вхождение в состав титана, предположительно связано с исходным составом шихты (титаномагнетит) при получении сплава.

Лебоит – $FeSi_2$, $FeSi_{2,33}$ и связанные с ним другие соединения, изучаются в контексте металлургии, нанотехнологий и электроники, так как эти соединения могут находить применение в различных технологических процессах. Температура плавления лебоита находится в районе 950° С (Шевко и др., 2014).

По строению и составу экзотического объекта «Абориген» предполагается его техногенное происхождение и плавление с диффузионным перераспределением вещества при прохождении плотных слоев атмосферы, также имеются признаки эвтектики, но не надо забывать и о том, что все подобные фазы, присутствуют среди минералов Луны, но в очень незначительных количествах.

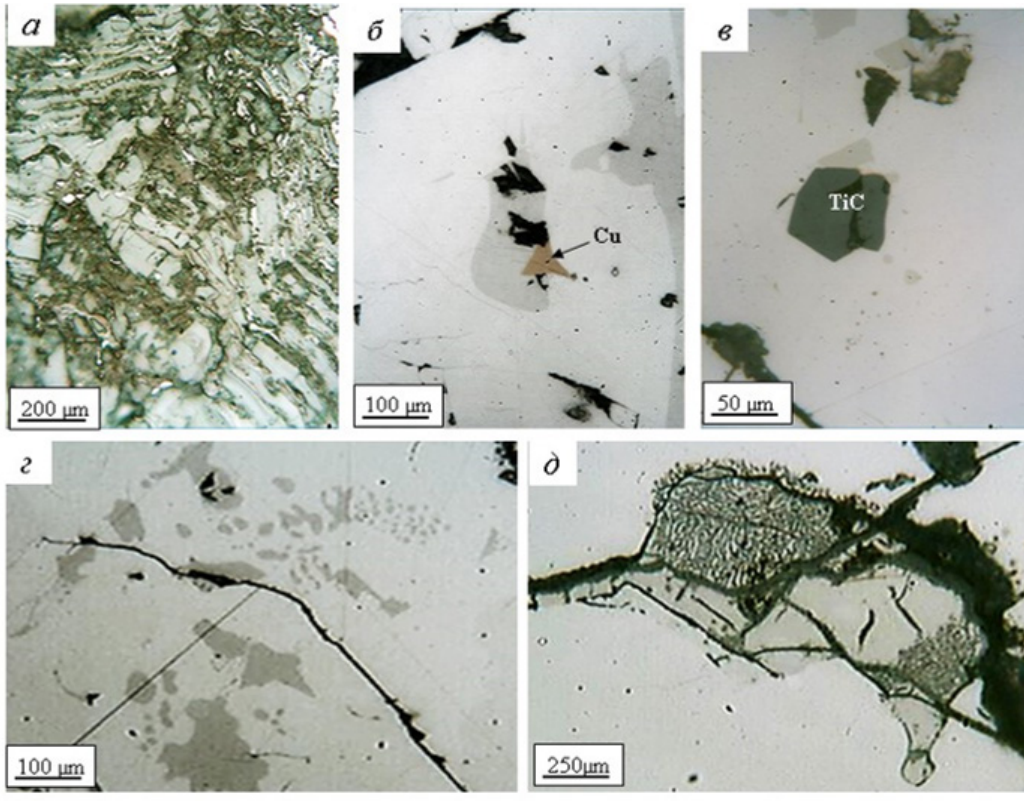


Рис.3. Различные фазы силицида железа в теле «Абориген» на поверхности аншлифов: ***а*** – следы пластических деформаций в оплавленной оболочке тела; ***б*** – основная составляющая лебоит с включениями низкотражающей титанистой фазы и темножелтое – самородная медь; ***в*** – идиоморфное включение карбида титана; ***г*** – эвтектика лебоита с титанистой фазой; ***д*** – хрупкие деформации лебоита и эвтектика с титанистой фазой.

Заключение

Рассмотренные особенности крупных фрагментов силицидов железа, найденных на Земной поверхности в глухих таежных местах, со следами плавления и кипения, которые не могут интерпретироваться кроме как прохождение ими плотных слоев атмосферы. Результаты изучения составов и внутреннего строения показали, что они имеют различное происхождение. Тело «Илекта» – космической природы, так как получение такой массы гупеита в земных условиях невозможно. Второе тело – «Абориген», сложено преимущественно лебоитом, предположительно имеет техногенное происхождение и подобный материал мог использоваться в космических аппаратах, ступенях ракет. Он содержит в своем составе широкий спектр микропримесей и получение подобного сплава технически возможно в земных условиях.

Список литературы

1. Варнаков С. Н., Молокеев М. С., Федоров А. С., Яковлев И. А., Федоров Д. А., Овчинников С. Г. Оптические свойства эпитаксиальной пленки силицида железа Fe3Si/Si (111) // Письма в ЖЭТФ. 2014. Т. 99. Вып. 10. С. 651–655.

2. Великанов Д.А., Тарасов А.С., Жандун В.С., Замкова Н.Г. Наноструктуры ферромагнитный металл/полупроводник на основе силицидов железа // Физика тв. тела. 2016. Т. 58. Вып. 11. С. 2195–2199.

3. Новогородова М.И., Юсупов Р.Г., Дмитриева М.Т., Цепин А.И., Сивцов А.В., Горшков А.И., Коровушкин В.В., Якубовская Н.Ю. Первая находка зюссита на Земле // ДАН СССР, 1983, том 271, №6, стр. 1480-1483.

4. Овчинников С.Г., Варнаков С.Н., Лященко С.А., Тарасов И.А., Яковлев И.А., Попов Е.А., Жарков С.М.,

5. Первая находка зюссита на Земле // ДАН СССР, 1983, том 271, №6, стр. 1480-1483.

6. Тарасов И. А., Попов З. И., Тищенко А.И., Касаткин А.В.. Шкода Р. (нагчуит, линьджиит,лобусаит, и циангпоит) в сарматских известняках Крыма //Новые данные о минералах, 2016, Вып. 51, с. 20-30.

7. Шевко В.М., Сержанов Г.М., Бадикова А.Д., Утеева Р.А. Термоповедение силицидов железа// Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований, 2014, №10, с 41-45.

8. Jenniskens P.; et al. (2009-03-26). “The impact and recovery of asteroid 2008 TC3”. Nature. 458 (7237, number 458): 485–488. Bibcode:2009 Natur.458.485J. doi:10.1038/nature07920. PMID 19325630. Published in Letters to Nature.anetary embryo.– 2019 – Ntw York– Part 2. Pages – 56-62.DOI: 10.18411/scienceconf -09-2019-28.

9. Keil, K., J.L. Berkley, and L.H. Fuchs (1982) Suessite, Fe3Si: a new mineral in the North Haig ureilite // Amer. Mineral., 1982, 67, 126–131.

10. Savva, N.E. (2019) Exotic find of iron silicid in the zone of flyby Tunguska meteorite and Vitim space bolide [Text] / N. E. Savva, P. S. Minyuk, T.V. Subbotnikova //X International Scientific Conference: “Scientific achievements of the third millennium”, 30 September.

11. Yu Zuxiang (1984) Two new minerals gupeiite and xifengite in cosmic dusts from Yanshan // Acta Petrologica Mineralogica et Analytica, , 3, 231–238 (на китайском языке с абстрактом на английском).

МИНЕРАЛОГИЯ КОРЫ ПЛАВЛЕНИЯ LL6 ХОНДРИТА ОКУЛОВКА, НОВГОРОДСКАЯ ОБЛАСТЬ

Шарыгин В. В.[1,2] (*sharygin@igm.nsc.ru*),
Вишневский А. В.[1] (*vishnevsky@igm.nsc.ru*)

[1] *Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия*
[2] *EXTRA TERRA CONSORTIUM, УрФУ, Екатеринбург, Россия*

Аннотация: Приводятся первые данные по минералогии коры плавления для LL6 хондрита Окуловка (силикаты, оксиды, сульфиды, металлические фазы)

Ключевые слова: *кора плавления, оливин, хизлевудитовый твердый раствор, годлевскит, никель, бунзенит, магнетит, треворит, PGE сплав, минералогия, LL6 хондрит, Окуловка*

Падение метеорита Окуловка (Okulovka, 58°24.00’ N, 33°16.00’ E) произошло 27 октября 2025 года в Новгородской области в 03:32:27 UTC и было видно в центральных и северо-западных регионах европейской части России. Метеорит классифицируется как обыкновенный хондрит LL6S2W0 [5]. На данный момент найден лишь один образец метеорита (528 грамм), который при падении на крышу жилого дома разрушился на многочисленные фрагменты. Метеорит имеет тонко-, среднезернистую структуру (размер зерен 50-500 μm). Хондры и их реликты встречаются очень редко. Толщина коры плавления может достигать до 1.5 мм (Рис. 1).

Первичный хондритовый парагенезис метеорита Окуловка представлен оливином $Fo_{66.9\pm0.2}Fa_{32.5\pm0.2}Tph_{0.6\pm0.1}$ (N=48), низко-Ca пироксеном $En_{70.6\pm0.3}Fs_{27.0\pm0.3}Wo_{2.3\pm0.3}$ (Cr_2O_3 – 0.1, Al_2O_3 – 0.1, TiO_2 – 0.2 мас.%, N=15), плагиоклазом $Ab_{83.3\pm1.2}An1_{0.6\pm0.3}Or_{6.1+1.1}$ (N=20), Cr-содержащим клинопироксеном $En_{44.5\pm0.3}Fs_{11.5\pm0.4}Wo_{44.0\pm0.4}$ (Cr_2O_3 – 0.9, Al_2O_3 – 0.5, TiO_2 – 0.5, Na_2O – 0.6 мас.%, N=11), хромитом $Crt_{79.2}Spl_{13.4}$ (N=11), хлорапатитом (Cl – 4.5-5.1, F – 0.5-0.9 мас.%), мерриллитом, FeNi-металлами, троилитом и пентландитом (данные авторов). Хондры (от 500 μm до 5 мм) обычно имеют зернистую или колосниковую структуру, и достаточно плохо выявляются в матриксе (рис. 1). Редкие зерна FeNi-металла (до 2 мм), в основном, представлены тетратэнитом, реже встречается тэнит (таб. 1). Наиболее характерна следующая металл-сульфидная ассоциация: тетратэнит + троилит ± пентландит (Рис. 1).

Кора плавления (КП) в метеорите Окуловка варьирует по мощности, но не превышает 1.5 мм. Своеобразная зональность проявляется лишь по присутствию газовых пузырьков, большее количество которых приурочено к контакту с неизмененным хондритом (рис. 1-2). В целом, КП представлена крипто-, мелкокристаллическим агрегатом, в котором присутствуют скелетные кристаллы оливина и магнетита (до 5 μm), силикатное стекло, реликты первичных минералов хондрита (оливин, хромит, реже пироксены и плагиоклаз) и суль-

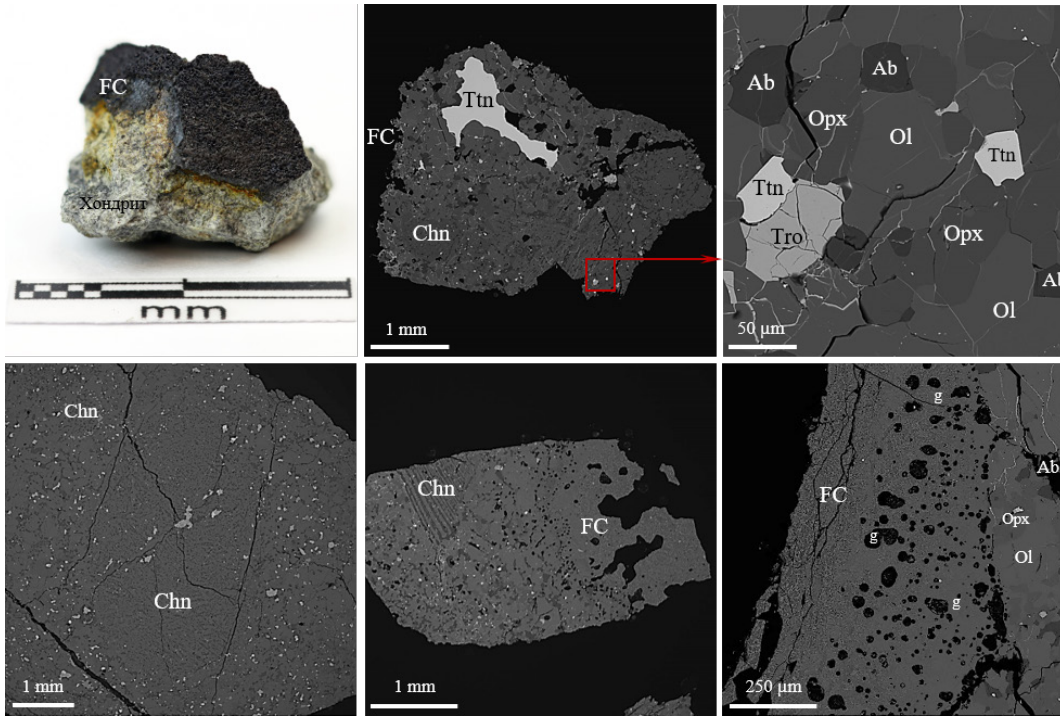


Рис. 1. Внешний вид, матрикс, хондры и кора плавления, метеорит Окуловка, BSE изображения. Условные обозначения: FC – кора плавления, Chn – хондра, Ttn – тетратэнит, Tro – троилит, Ab – альбит, Ol – оливин, Opx – низкокальциевый пироксен, g – газовый пузырь, Gl – стекло альбитового состава.

фидные и металл-сульфидные ассоциации (рис. 2-3). Локально в КП встречаются участки с более крупными кристаллами новообразованного оливина и магнетита и крупными скоплениями сульфидов. На поверхности КП иногда присутствует ассоциация железо + цинк из-за падения метеорита на крышу, покрытую оцинкованным железом (рис. 2).

Зональность в новообразованных оливинах иногда хорошо выражена: высоко-Mg центр ($Fo_{89.2}Fa_{7.3}Tph_{0.2}La_{0.3}Lie_{3.0}$) и высоко-Fe край ($Fo_{53.0}Fa_{45.2}Tph_{0.4}La_{0.5}Lie_{0.9}$), причем в некоторых зернах центральные зоны ($Fo_{68.1}Fa_{31.2}Tph_{0.6}La_{0.01}$) соответствуют первичному оливину. В целом, новообразованный оливин может содержать Cr_2O_3 (до 0.5), CaO (до 0.6) и NiO (до 3.0 мас.%), реже P_2O_5. Хромит из КП отличается от первичного хромита более широкими вариациями по составу и постоянными примесями NiO (до 3.0 мас.%). Магнетит близок к идеальному составу, однако некоторые зерна содержат Cr_2O_3 (до 2.3 мас.%) и NiO (до 6.1 мас.%). Магнетит также образует оторочки вокруг реликтов первичного хромита. Стекло широко варьирует по SiO_2 (31.5-65.6 мас.%) и другим компонентам в зависимости от того, какие минералы попадают в конкретную зону плавления: от маскелинитового состава до составов, обогащенных FeO_t (до 35 мас.%) и P_2O_5 (до 17 мас.%). Следует отметить, что P-обогащенные стекла на контакте с хлорапатитом не содержат хлор, что свидетельствует

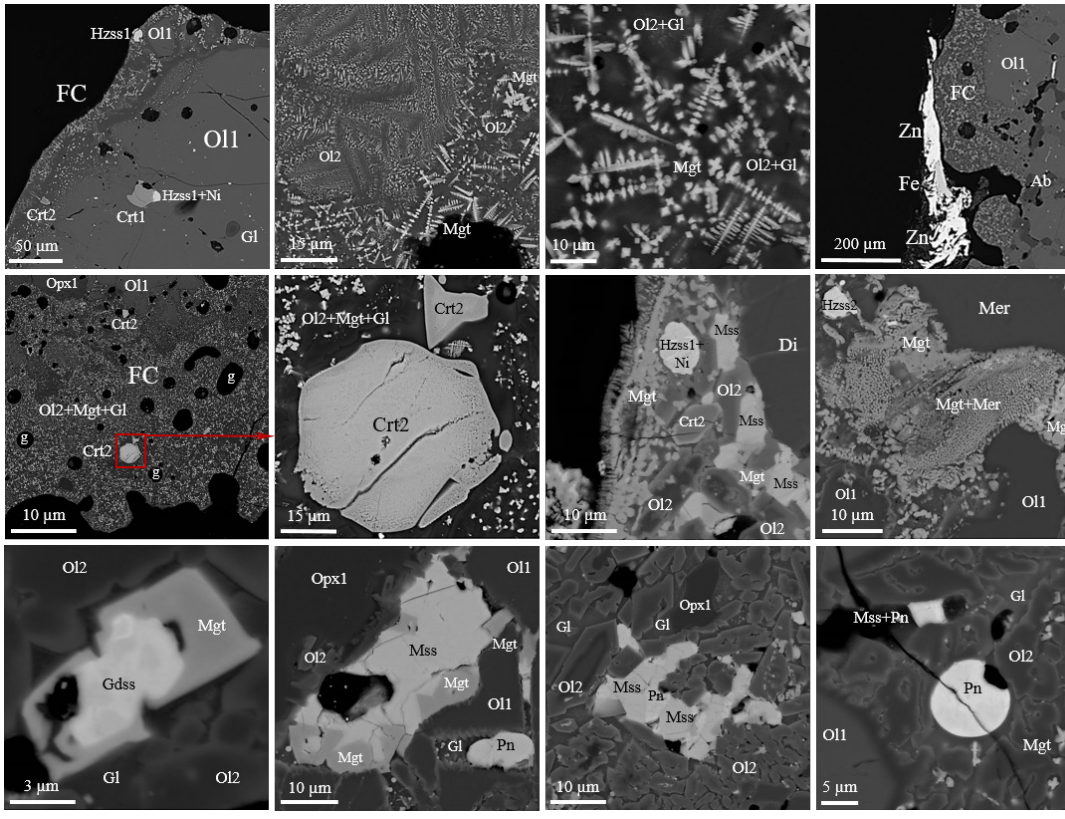


Рис. 2. Минеральные ассоциации в коре плавления метеорита Окуловка, BSE изображения. Условные обозначения: Ol1 – первичный оливин, Ol2 – новообразованный оливин КП, Opx1 – первичный низкокальциевый пироксен, Ab – первичный альбит, Crt1 – первичный хромит, Crt2 – новообразованный хромит КП, Hzss1 – хизлевудитовый твердый раствор $(Ni,Fe)_{3\pm x}S_2$, Ni – никель, Mss – моносульфидный твердый раствор (Fe,Ni)S, Gdss – годлевскитовый твердый раствор $(Ni,Fe)_{7\pm x}S_6$, Pn – пентландит $(Fe,Ni)_9S_8$, Mgt – магнетит, g – газовый пузырек, Gl – силикатное стекло разного состава, Fe – железо, Zn – цинк.

о диссипации этого компонента в процессе плавления.

Фазовый состав сульфидных и металл-сульфидных глобул и ассоциаций (до 10-20 µm) сильно варьирует (Рис. 3). По химизму они имеют высоконикелевый и малосульфидный состав. Выявлены следующие типы ассоциаций (обозначения смотри рис. 2-3): Hzss1 + Ni, Hzss1, Hzss2, Hzss2 + Pn, Gdss, Pn, Pn + Ni, Mss + Pn, Mss + Gdss. Ассоциации, содержащие хизлевудитовые фазы, доминируют в КП, причем в глобулах состава Hzss1 + Ni иногда присутствует наноразмерная неидентифицированная фаза Pt-Os-Ir (металл ?) (рис. 3). Также следует отметить присутствие ассоциаций сульфид + оксид (рис. 2-3), причем с Hzss1+Ni обычно сосуществует бунзенит (NiO – 93.5, FeO – 5.8, MgO – 0.8 мас.%, N=6), а с Hzss, Mss и Pn - магнетит. В ассоциации с Hzss1 был также выявлен треворит $NiFe_2O_4$ (FeO_t – 70.98, CoO - 1.81, NiO – 27.36 мас.%). Хизлевудитовые фазы обычно имеют неоднородный состав, что связано с их

неизбежным твердофазным распадом на две и более фазы по мере остывания, согласно схемам, указанным в работах [1, 2]. Усредненные анализы ключевых минералов из металл-сульфидных ассоциаций приведены в Таблице 1. К сожалению, из-за сверхмалых размеров не удалось проанализировать Pt-Os-Ir фазу, можно лишь сказать, что это сплав с варьирующим содержанием Pt и Os (рис. 3).

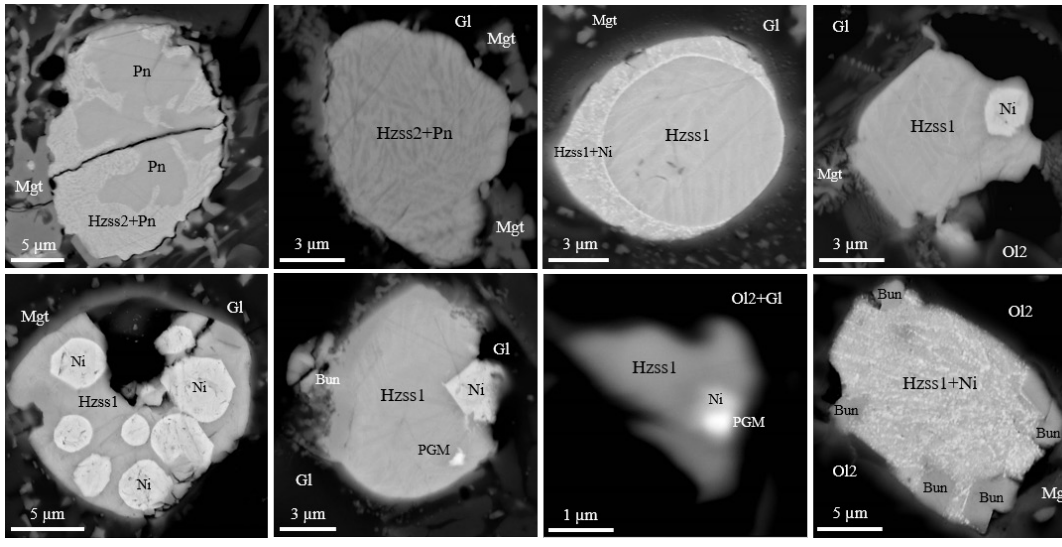


Рис. 3. Металл-сульфидные ассоциации в коре плавления метеорита Окуловка, BSE изображения. Условные обозначения: Hzss2 - хизлевудитовый твердый раствор $(Ni,Fe)_{4\pm x}S_3$, Bun – бунзенит NiO, PGM – Pt-Os-Ir- -минерал (сплав). Остальные обозначения смотри Рис. 2.

Таблица 1. Представительные анализы (мас.%) минералов из металл-сульфидных ассоциаций КП и металлов первичного парагенезиса, метеорит Окуловка.

Mineral	*n*	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	S	Сумма
Первичный парагенезис								
Tetrataenite	*17*	40.74	2.28	57.05	0.04	0.00	0.00	100.07
Taenite	*1*	62.09	1.72	36.31	0.00	0.00	0.00	100.12
Кора плавления								
Nickel	*18*	3.50	0.35	95.51	0.43	0.00	0.00	99.78
Hzss1	*41*	3.52	0.07	70.19	0.13	0.00	26.29	100.20
Hzss1*	6	13.29	0.43	59.67	0.05	0.05	26.50	99.97
Hzss2	*10*	3.17	0.15	67.50	0.07	0.00	29.21	100.10
Gdss	*4*	15.01	0.93	52.55	0.00	0.00	31.93	100.43
Pn*	*5*	23.12	1.76	42.32	0.05	0.00	32.68	99.94
Pn	*12*	34.65	1.20	31.29	0.04	0.16	32.69	100.03
Mss	*22*	46.51	0.87	15.82	0.02	0.00	36.82	100.04

n – среднее, Hzss1* - хизлевудитовый твердый раствор в ассоциации с магнетитом, Pn* - пентландит из глобул состава Pn+Hzss2.

Таким образом, исследования КП в метеорите Окуловка и в других хондритах [3, 4] позволяют детализировать процесс их поверхностного плавления, который происходил при вхождении в атмосферу Земли. Классические реакции с кислородом ($2Fe^o + O_2\downarrow \rightarrow 2FeO$, $2FeS + O_2\downarrow \rightarrow 2FeO + S_2\uparrow$, $2FeO + 2O_2\downarrow \rightarrow 2Fe_2O_3$) показывают реальность появления Fe-оксидов и удаление газообразной серы из системы при плавлении. Изучение КП на контакте с хлорапатитом и мерриллитом показало, что при их плавлении фосфор остается в силикатном стекле, а хлор удаляется из системы как газ Cl_2. Большая часть железа в оксидной форме концентрировалась в силикатном расплаве с последующим образованием вюстита, магнетита и Fe-оливина. Часть никеля в оксидной форме также переходила в силикатный расплав (бунзенит, треворит, примеси в оливине и магнетите). В условиях повышенной fO_2 новообразованная металл-сульфидная жидкость существенно обогащалась Ni и обеднялась S и Fe с последующей кристаллизацией самородного никеля и высоко-Ni сульфидов с X_S<0.5. Несмотря на быстротечность процессов плавления и последующей кристаллизации, PGE сохранялись в металл-сульфидном расплаве с образованием PGE сплава. Следует отметить, что метеорит Окуловка пока является третьей находкой высоко-Ni глобул с PGE фазой в КП обыкновенных хондритов. Ранее глобулы подобного состава (Hzss1 + Ni + PGM) были описаны в КП метеоритов Челябинск LL4 и Озерки L6 [3, 4].

Список литературы:

1. Косяков В. И., Краева А. Г., Федорова Ж. Н., Синякова Е. Ф. Топологический анализ эволюции фазовых равновесий в системе Fe-Ni-S в области X_S < 0.5 при понижении температуры // Геология и геофизика. - 1996. - Т. 37. - № 12. - С. 7-17.

2. Косяков В. И., Синякова Е. Ф. Схема фазовых реакций в системе Fe – FeS – NiS - Ni // Вестник ОГГГГН РАН. – 2000. - № 5 (15) - Т. 1. – С. 38-40.

3. Шарыгин В. В. Высоконикелевые металл-сульфидные глобулы в коре оплавления L6 хондрита Озерки, Липецкая область: предварительные данные // 18-я всероссийская конференция по термобарогеохимии. - М: ММФ РАН, 2018. - С. 148-150.

4. Шарыгин В. В., Тимина Т. Ю., Карманов Н. С., Томиленко А. А., Подгорных Н. М. Минеральные ассоциации в коре оплавления фрагментов метеорита Челябинск // Материалы научной конференции «Метеорит Челябинск – год на Земле». - г. Челябинск: ЧГКМ, 2014. - С. 654-666.

5. Gattacceca J., Grossman J. N., Weisberg M. M. et al. The Meteoritical Bulletin, No. 114 // Meteoritics and Planetary Science. – 2026. - V. 61. – No. 5. - P. 942-946. doi: 10.1111/maps.70157

Минералогический музей
имени А.Е. Ферсмана РАН

310 ЛЕТ

МУЗЕЙНАЯ СЕКЦИЯ

посвящённая 80-летию
В. С. Чернавцева



1 октября 2026 года

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ МУЗЕЙ В СИСТЕМЕ ПРЕДМЕТНО-ЯЗЫКОВОГО ОБУЧЕНИЯ (АНГЛИЙСКИЙ ЯЗЫК) В ШКОЛЕ

Васюкова Е.А.[1,2] (*lenav@inbox.ru*), **Кальнеус Е.Г.** [3]

[1]*Центральный сибирский геологический музей, г. Новосибирск,*
[2]*Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск,*
[3] *СУНЦ НГУ, г. Новосибирск*

Аннотация: В тезисах рассматривается опыт интеграции ресурсов геологического музея в школьный образовательный процесс. Описана трехэтапная методика проведения занятий по английскому языку на базе Центрального сибирского геологического музея. Продемонстрирована эффективность использования междисциплинарных связей для повышения вовлеченности учащихся и формирования профессиональной англоязычной лексики.

Ключевые слова: *предметно-языковое интегрированное обучение (CLIL), музейная педагогика, Музей геологии и минералогии, междисциплинарный подход, английский язык, профильная школа, СУНЦ НГУ, проектная деятельность, минералогия.*

В современной педагогической практике актуализируется поиск новых образовательных площадок, способных преодолеть разрыв между теоретическими знаниями и реальностью. Потенциал академических музеев зачастую используется не в полной мере, уступая место исключительно просветительской или развлекательной функциям. Между тем, интеграция музейного пространства в школьную программу открывает доступ к уникальному иллюстративному материалу, необходимому для реализации междисциплинарного подхода.

В данной работе представлен опыт взаимодействия СУНЦ НГУ и Музея геологии и минералогии ИГМ СО РАН по внедрению методики предметно-языкового интегрированного обучения (CLIL — Content and Language Integrated Learning). Целью проекта стала апробация модели обучения английскому языку через погружение в научно-естественную тематику.

Образовательный трек включал три последовательных этапа:

Подготовительный (урочный) этап. Работа была направлена на формирование терминологической базы и мотивационной основы учащихся. Школьники изучали научно-популярные видеоматериалы и адаптированные тексты о строении Земли и свойствах минералов. Итогом этапа стало составление индивидуальных глоссариев, послуживших опорой для дальнейшей коммуникации.

Экспериментально-музейный этап. Практическое занятие проводилось непосредственно в экспозиционных залах музея в формате полного языкового погружения (анлийский язык как единственный инструмент коммуникации). Маршрут экскурсии был выстроен по принципу усложнения: от шкалы твердости Мооса к комплексному анализу физико-химических свойств минералов (спайность, флюоресценция, двулучепреломление, кристалличе-

ская структура). Интерактивная часть включала проведение самостоятельных мини-экспериментов, актуализирующих знания учащихся по физике и химии (природа цвета, изоморфизм, ионы-хромофоры). Особое внимание уделялось элементам геммологии, разграничению природных и синтетических минералов. Занятие проходило в диалоговой форме на основе заранее подготовленных учащимися вопросов.

Рефлексивно-оценочный этап. Закрепление материала осуществлялось через проектную деятельность (составление тематических кроссвордов, инфографики). Итоговый контроль знаний был реализован в формате мини-конференции, где учащиеся выступали с докладами и презентациями на самостоятельно выбранные темы в области геологии.

Внедрение разработанной методики в шести учебных группах СУНЦ НГУ показало высокую вовлеченность учащихся. Около 20% школьников выбрали для итоговой аттестации сложные академические темы естественно-научной направленности, продемонстрировав свободное владение специализированной лексикой.

Опыт подтверждает, что Центральный сибирский геологический музей является эффективной междисциплинарной площадкой. А описательный характер геологической науки позволяет органично расширять словарный запас учащихся, переводя иностранный язык из статуса объекта изучения в статус функционального инструмента познания.

Список литературы:

1. Ковалева А. В. Музейная педагогика как средство реализации межпредметных связей в условиях современной школы // Педагогика и просвещение. — 2021. — № 2. — С. 45–53.

2. Салехова Л. Л., Данилов А. В. Использование концепции CLIL (Content and Language Integrated Learning) в профильном обучении // Филология и культура. — 2019. — № 4 (58). — С. 234–240.

3. Coyle D., Hood P., Marsh D. CLIL: Content and Language Integrated Learning. — Cambridge : Cambridge University Press, 2010. — 173 p.

4. Центральный Сибирский геологический музей [Электронный ресурс] // Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН : [офиц. сайт]. — URL: https://www.igm.nsc.ru/index.php/ob-institute/struktura/museum

МИНЕРАЛЫ ПЛАТИНОИДОВ ИЗ СТАРЫХ КОЛЛЕКЦИЙ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО МУЗЕЯ ИМ. А.Е. ФЕРСМАНА

Генералов М.Е. (*mgeneralov@mail.ru*),

Минмузей РАН, г. Москва

Аннотация: среди задач научной инвентаризации фондов Минералогического музея – уточнение данных о минералогии, географии, источниках и истории поступления фондовых материалов. На примере переизучения старых материалов, связанных с именами А. Б. Кеммерера, А. В. Стенбок-Фермора, П. Л. Драверта и О. Е. Звягинцева, представляющих минералы платиноидов, показаны полученные при этом новые сведения.

Ключевые слова: *Минералогический Музей, исторические коллекции, минералы, платиноиды*

Возраст коллекции Минералогического Музея им. А.Е. Ферсмана перешагнул за три века. Среди материалов в его фондах выделена «спецколлекция» - музейные предметы, содержащие драгметаллы и драгкамни. Она включает и группу образцов с платиноидами. В инвентарных книгах они записаны под названиями «платина», «осмистый иридий», иногда использованы устаревшие названия - «иридосмин», «осмирид», «невьянскит», «сысертскит», «поликсен».

Но со времени, когда было добыто большинство этих материалов, заметно изменились представления о минералогии и систематике минералов платиноидов (МПГ) [7]. А учитывая сложность геохимии и минералогии платиноидов, можно предполагать, что эти материалы минералогически очень разнообразны.

Поэтому при обращении к этой части фондов Музея для инвентаризации, фотографирования, проводившихся в последнее время, часть их исследовалась с использованием локальных рентгеноспектральных и рентгеноструктурных методов.

Одними из первых отечественных материалов в коллекции Музея, содержащих находки МПГ, являются уральские образцы, принадлежавшие химику, минералогу, педагогу, преподававшему естественные науки детям императорской семьи Александру Богдановичу Кеммереру (1789-1858) [2].

Его материалы относятся к 20-30м годам XIX в., так что имеют практически двухвековой возраст. Отобранные для исследования визуально отличающиеся зерна россыпного материала из образца FMM_1_208 записанного как осмистый иридий, показали наличие отличающихся по составу зерен системы Os-Ir-Ru, среди которых, следуя современной номенклатуре, можно выделить соответствующие минералы — осмий, иридий и рутений. В ассоциации с ними отмечены такие МПГ как дисульфиды ряда лаурит-эрлихманит, а также ирарсит .

Наряду с этими фазами здесь же присутствуют зерна железистой пла-

тины, представляющие собой разные стадии распада твердых растворов. В некоторых избыток иридия выделяется в виде мелких октаэдрических и червеобразных включений, в других возникают ламелларные системы, связанные с выпадением из матрицы МПГ с повышенным содержанием Os и Ru с гексагональной структурой. Все эти зерна характеризуются крайне слабой окатанностью.

Имеющиеся сведения о привязках и особенности МПГ позволили сделать вывод о том, что эти платиноиды добыты из выработанных еще в XIX в. слабоперемещенных россыпей Нижнетагильского массива.

Другая исследованная подборка россыпных МПГ (FMM_1_208) поступила в Музей в 1907 г. от графа Александра Владимировича Стенбок-Фермора [1]. Его семья владела золото-платиноносными россыпями в районе Невьянска. Судя по тому, что уже при передаче в привязку вкралась ошибка («Туралинская россыпь» вместо корректного «Шуралинская»), а интенсивные работы в этом районе проводились в 90-х годах XIX в., переданные материалы были добыты несколько ранее, вероятно, в конце XIX в., так что их возраст около 130 лет.

Изучался уже предварительно рассортированный по внешнему виду материал под названием «Осмистый иридий с платиной». Здесь также выявлен широкий спектр составов в системе Os-Ir-Ru. Не обнаружены лишь составы соответствующие рутениридосмину.

Железо-платиновые фазы также показывают наличие распадных ламмелей, но судя по составу, распад здесь зашел существенно дальше, чем в материалах Кеммерера, а МПГ перемещены сильнее, в связи с чем их зерна сильно окатаны, а твердые ламмели распадных фаз в них, в основном, выкрошены. МПГ россыпи соответствуют минерализации, отмечавшейся в Верх-Нейвинском дунит-гарцбургитовом массиве, что подтверждает уточненную привязку россыпи.

На поверхности зерен Os-Ir-Ru состава присутствуют более поздние фазы, в частности дисульфиды Os, Ru, а на некоторых отмечены интерметаллиды Ni-Fe-Ir состава.

Одна из таких фаз с привлечением рентгеноструктурного анализа диагностирована как гарутиит («гексагональный никель»), другая, отличающаяся по составу, предположительно является иридиевой разновидностью кубической никелевой фазы (самородного никеля или аваруита). Судя по описаниям аналогичной минерализации, эти фазы связаны с процессами в платиноносных массивах на этапе их гипергенного изменения [6].

Еще одним ярким исследователем, минералогическое наследие которого влилось в фонды Музея, является геолог, «охотник за метеоритами», ботаник, краевед, археолог, писатель, поэт Пётр Людовикович Драверт (1879-1945) [3]. Среди его образцов в Музее есть зерна МПГ, отобранные им в районе заповедника Боровое (сейчас Бурыбай) в Казахстане. Они были описаны как платина и эта находка упоминается в обзорах по региональной минералогии. Однако, изучение конкретных зерен показало, что их основа – осмий состава $Os_{0.38-0.43}Ir_{0.30-0.36}Ru_{0.22-0.30}$ с лауритом и купроиридситом. Возможно, в музей

попали зерна, оставшиеся от химического исследование зерен МПГ, при котором железо-платиновые фазы были растворены.

В 1938 году от профессора, исследователя в области химии и технологии благородных металлов, организатора отечественной платиновой промышленности Ореста Евгеньевича Звягинцева (1894-1967) в фонд Музея попали зерна МПГ из россыпей Угольного ручья в окрестностях Норильска. Они были описаны как платина.

Изучение показало, что кристаллы параллелепипедального облика с проявлениями скелетного роста — тетраферроплатина с внешней каймой, замещенной минералами системы Pd–Cu–Sn–Pb, в том числе минералами ряда атокит-звягинцевит и станнопалладинитом.[4]. Его переизучение показало, что ранее использовавшаяся формула этого минерала, впервые описанного именно в этой россыпи – Pd_3Sn_2 [5] некорректна, уточненная идеальная формула — $(Pd,Cu)_3Sn$ [8]

Таким образом, изучение старых материалов из фондов Музея, часто из давно не разрабатываемых объектов, позволяет уточнить их источники, диагностировать минералы и выявить среди них мало представленные и даже отсутствующие в систематической коллекции, получить для ранее найденных новые минералогические характеристики. Эти сведения помогают повысить как научную, так и культурно-историческую ценность фонда Музея.

Работа подготовлена в Минмузее в рамках бюджетной темы Минобрнауки FMWF – 2025-0005

Список литературы:

1. Генералов М.Е., Агаханов А.А. Драгоценные зерна истории. Минералы платиноидов из образцов А.В. Стенбок-Фермора // Новые данные о минералах, том 57, вып. 2 (2023), с 42–51
2. Генералов М.Е., Агаханов А.А. Учитель императора и его наследие. Материалы А.Б. Кеммерера в коллекции Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана // Новые данные о минералах. 2024. Т. 58. Вып. 3. С. 80–93.
3. Генералов М.Е., Карпенко В.Ю. Материалы П.Л. Драверта в коллекции Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН, // Новые данные о минералах. 2025. вып. 1, Т. 59. стр. 105-113
4. Генералов М.Е., Паутов Л.А. Платина Угольного ручья (Норильск) из фондов Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН // Новые данные о минералах.2005, вып.40, стр. 120 - 124
5. Масленницкий И.Н., Фалеев П.В., Исюл Е.В. (1947) Оловосодержащие минералы платиновой группы в сульфидных медно-никелевых рудах. Доклады Академии наук СССР: 58: 1137-1140.
6. Aiglsperger, T., Proenza, J.A., Font-Bardia, M. et al. Supergene neoformation of Pt-Ir-Fe-Ni alloys: multistage grains explain nugget formation in Ni-laterites. // Miner Deposita 52, 1069–1083 (2017).

7. Harris, D.C. and Cabri, L.J. Nomenclature of platinum-group-element alloys; review and revision. The Canadian Mineralogist: 29: 1991 p. 231-237.

8. Kasatkin A.V. , Vymazalová A., Fabrizio Nestola F., Gurzhiy V.V., Atali A. Agakhanov A.A., Škoda R., Belakovskiy D.I., Generalov M.E. A re-evaluation of stannopalladinite using modern analytical techniques // Mineralogical Magazine (2023), 87, 773–782

ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА МЕМОРИАЛЬНОЙ КОЛЛЕКЦИИ В МУЗЕЕ ЗЕМЛЕВЕДЕНИЯ МГУ

Громалова Н. А.[1] (*gromalnat@mail.ru*),
Набелкин О. А.[2] (*mulderfw@yandex.ru*),
Чехович П. А.[1] (*p.chekhovich@gmail.com*)

[1] *Музей землеведения МГУ, Москва*
[2] *ФГБУ «ИМГРЭ», Москва*

Аннотация: Проведено ревизионное изучение типовых минералов из коллекции профессора Р. Николаева, собиравшейся в «кабинетном» формате в начале XX столетия. Приоритетное значение отдавалось предметам, которые были отнесены к основному фонду Музея землеведения. Использован портативный рентгенофлуоресцентный анализатор.

Ключевые слова: *музейные коллекции, типовые минералы, переизучение фондовых собраний, рентгенофлуоресцентная спектрометрия, неразрушающие аналитические методы*

Повторное изучение старых коллекций — важный путь к новым находкам и даже открытиям. Квалифицированное переизучение музейных образцов, выполненное с применением современных инструментальных методов, повышает аналитический статус образца, делает его атрибуцию более достоверной и, в итоге, увеличивает коллекционную значимость музейного предмета [3, 4]. Это позволяет сместить акцент с чисто декоративных свойств минералогической экспозиции, продемонстрировать скрытые природные особенности фондового материала и, что наиболее важно – совершенствовать его научную каталогизацию.

В ходе изучения материала, включенного в состав основного фонда Музея землеведения, нами была проведена поэтапная инструментальная диагностика некоторых типовых минеральных видов (type specimens) из мемориальной коллекции, собиравшейся известным русским ученым-металловедом, профессором Р. С. Николаевым, в первом десятилетии прошлого века. Исследования проводились с использованием рентгенофлуоресцентного анализатора X–MET 7500 (производство Oxford Instruments, Финляндия/Великобритания).

Характеристика метода. Метод рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) характеризуется нижними пределами количественного анализа от 0,0005% и широким диапазоном определяемых элементов. Анализатор X-MET 7500 позволяет измерять спектры рентгеновского излучения в диапазоне от магния до урана. Точность и воспроизводимость результатов РФА, полученных на современных приборах по аттестованным методикам, позволяют применять его для количественного анализа горных пород и минералов, особенно в условиях, когда отсутствует возможность осуществлять сложную пробоподготовку материала, включающую разложение или разрушение

образца. Пересчёт данных РФА на нормативный состав (содержание элементов в исходном образце) производится с помощью градуировочных методов. В описываемом случае применялся подход с использованием образцов сравнения. Интенсивность линии аналита в пробе сравнивалась с интенсивностью линии в стандарте, концентрация которого известна.

Результаты. Получены новые данные о минералого-геохимическом составе ряда образцов из упомянутой выше коллекции. По данным рентгенофлуоресцентного анализа установлены содержания минералообразующих компонентов, выявлено практически полное соответствие основного состава их кристаллохимическим формулам. В формате краткого сообщения целесообразно остановиться на нескольких исследованных экспонатах.

1. Перовскит (Копи Чувашских степей, Южный Урал). Старые южноуральские копи в окрестностях г. Златоуста являются типовым местонахождением этого минерала, впервые обнаруженного здесь немецким минералогом Густавом Розе в середине XIX века. Название минерала, как известно, связано с именем влиятельного российского вельможи – графа Льва Перовского, отца знаменитой участницы русского революционного движения.

Минерализация приурочена к узкой полосе скарнов в зоне контакта Купинско-Копанской расслоенной интрузии пироксенитовых габбро с доломитами саткинской свиты рифея. Индивиды крупных кристаллов перовскита различных габитусных форм по данным [6] заключены в полостях крупнозернистых кальцитовых пород.

В образце из музейной коллекции (рис. 1) отмечены повышенные содержания примесей железа и ниобия, пониженное содержание примеси церия, практически полное отсутствие стронция и лантана. Учитывая кубический габитус исследованного кристалла и данные, приведенные в работе [6], можно считать, что он представляет собой модификацию, образовавшуюся в условиях перовскит-магнетит-клинохлор-кальцитовой ассоциации (в обстановке «низкотемпературной» среды кристаллизации).

2. Гауерит (серный рудник Дестричелла, Сицилия). Относительно редкий минерал класса сульфидов представлен октаэдрическим кристаллом бурого цвета (рис. 2). Такие кристаллы содержатся в миоценовых глинах, перекрывающих пласты самородной серы, и чрезвычайно высоко ценятся коллекционерами. Исследования показали, что минерал отвечает своей кристаллохимической формуле MnS_2, в качестве основных примесей в нем установлены – SiO_2 и CaO.

3. Рутил (местонахождение Грейвс Маунтин, США, Джорджия). Минерал класса оксидов, самая устойчивая полиморфная модификация оксида титана. Гора Грейвс традиционно считается одним из лучших типовых местонахождений этого минерала [8]. Минерализация жильного типа связана с палеозойской серией метаморфитов Литл Ривер, сложенной метавулканитами, кварцитами и кварц-серицитовыми сланцами с кианитом и пиритом.

Крупные (до 10-12 см), нередко сдвойникованные кристаллы рутила на местонахождении Грейвс Маунтин издавна являются главным объектом добычи для собирателей минералогических коллекций. Образец из собрания



Рис. 1. Кристалл перовскита из собрания Музея землеведения МГУ



Рис. 2. Кристалл гауерита. Рудник Дестричелла, Сицилия. Музей землеведения МГУ.



Рис. 3. Рутил из местонахождения Грейвс-Маунтин, США. Двойник срастания по грани (011). Музей землеведения МГУ.



Рис. 4. Непрозрачная разновидность турмалина (шерл) из местонахождения Пьеррепойнт, массив Адирондак. Музей землеведения МГУ.

музея (рис. 3) представляет собой восьмерик, двойник срастания по грани (011). Его размер достигает 2 см. Основными выявленными примесями являются оксид ванадия – 0,84 вес.%, оксид двухвалентного железа – 1,87 вес. %, что несколько выше среднего содержания примеси железа в рутилах (до 1,40 %), и др.

4. Турмалин (Северная Америка, штат Нью-Йорк). Минералы группы турмалина относятся к классу каркасных боросиликатов. Изученный образец (рис. 4), происходящий из турмалин-кварцевых жил в протерозойских комплексах горного массива Адирондак, представлен сростком из двух черных короткостолбчатых кристаллов. На гранях хорошо видна штриховка, отражающая ростовую зональность. Размер образца около 4 см. По результатам нашего исследования он отнесен к шерлу, что обусловлено окраской и химическим составом.

Содержание Fe_2O_3 достигает 7,90 вес. %, MgO – 6,27 вес. %, CaO – 2,49 вес. %, SrO – 0,11 вес. %. По данным детальных исследований, проводившихся в последнее десятилетие [7, 9], турмалины на адирондакском местонахождении Пьеррепойнт были диагностированы как непрерывная смесь ювит-дравит, что согласуется с полученными нами результатами, показавшими присутствие в составе музейного образца кальция и магния.

Помимо перечисленных выше минеральных видов выполнены измерения состава на некоторых других экспонатах из мемориальной коллекции, в том числе цирконе и кианите, представленных на рис. 5 и 6.



Рис. 5. Кристалл циркона. Музей землеведения МГУ.



Рис. 6. Кристалл кианита. Музей землеведения МГУ.

Заключение. Регулярный пересмотр и доизучение старых коллекций представляет собой важный аспект музейной практики. Он позволяет обновить знания о предметах, выявить новые данные об их научной, исторической или культурной значимости. Успешная реализация этого процесса может быть поддержана различными факторами, в том числе использованием передовых научных подходов и аналитических технологий, что особенно актуально, в частности, для ревизии минералогических экспозиций [3, 5 и др.]. Например, использование современных инструментальных методов неразрушающего анализа, таких, как рентгенофлуоресцентная спектрометрия, может раскрыть ранее неизвестные детали, касающиеся вещественного состава и природы коллекционных образцов [1, 2].

Исследования выполнены в рамках Государственного задания для МГУ имени М.В. Ломоносова на 2023-2028 гг., тема ИД № 26873884.

Список литературы:

1. Громалова Н. А., Чехович П. А. Минералого-геохимическое изучение материалов из музейных коллекций методами неразрушающего экспресс-анализа // Жизнь Земли. – 2016 – Т. 38, № 2 – С. 167–175.
2. Громалова Н. А., Чехович П. А. Исследование драгоценных камней из коллекции Музея землеведения методами оптической и сканирующей электронной микроскопии. Первые результаты // Жизнь Земли. – 2021 – Т. 43, № 3 – С. 361–367.
3. Касаткин А. В. К вопросу о переизучении минералогических образцов из музейных коллекций. I. Общие аспекты // Новые данные о минералах. – 2020 – Т. 54, № 1 – С. 38–51.
4. Пеков И. В. В развитие некоторых вопросов музейного дела в области минералогии. II. О разных аспектах значимости минералогического образца // Новые данные о минералах. – 2019 – Т. 53, № 1 – С. 6–15.
5. Силаев В. И., Шанина С. Н., Петровский В.А., Плоскова С. И. Минералогическая коллекция Л. А. Попугаевой как культурно-исторический феномен и актуальный объект исследований // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. – 2009 – № 1. – С. 13–21.
6. Степанов С. Ю., Шарпёнок Л. Н., Паламарчук Р. С., Глазов А. И. Особенности распределения микропримесей в перовските из скарнов и жильных кальцитовых образований Чернореченского и Назямского хребтов (Южный Урал) // Минералогия. – 2017 – № 1. – С. 61–70.
7. Chamberlain S. C., Robinson G. W. The Collector's Guide to the Minerals of New York State. Schiffer Books. – 2013. – 96 p.
8. Hurst V. J. The Geology and Mineralogy of Graves Mountain, Georgia // The Geol. Surv. Bull., Atlanta – 1959 – №68 – P. 100.
9. Lupulescu M. V., Chiarenzelli J. R. Geochemistry of tourmaline from some Adirondacks locations: indicator of the host environment // Technical Report. Field Trip A-3. – October 2014. – P. 56–70.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ МУЗЕЙ – ОТДЕЛ ИСТОРИИ ИНСТИТУТА ИЗК СО РАН

Иванова Л.А. (*liva@crust.irk.ru*), **Данилова Ю.В.** (*jdan@crust.irk.ru*)

ИЗК СО РАН, г. Иркутск

Аннотация: работа посвящена созданию, развитию и преобразованию Геологического музея в отдел истории Института земной коры СО РАН, сохраняющего, расширяющего и демонстрирующего собранную многоплановую геологическую информацию в виде наглядных стендов и тематических коллекций.

Ключевые слова: *отдел истории института, экспозиция, коллекции образцов, тематические выставки.*

Решение о создании Геологического музея в Институте геологии Восточно-Сибирского филиала АН СССР, переименованного в 1962 в Институт земной коры, было принято на заседании Президиума АН СССР при утверждении структуры института в 1953 году [2]. Через 40 с лишним лет музей действительно был создан. По решению Ученого совета в апреле 1995 года было выделено помещение, в котором по инициативе и при непосредственном участии д.г.-м.н., профессора Ю.В. Комарова было организовано вспомогательное подразделение института – Геологический музей.

За время существования, начиная с 1995 года, Геологический музей, пройдя с 2009 года этап научно-вспомогательного подразделения - музея Института земной коры, в 2023 году был преобразован в отдел истории института. Основными научными задачами отдела являются: сбор и систематизация данных по каждому из научных направлений; история возникновения и развития секций и лабораторий; сбор, обработка, хранение и демонстрация отдельных документов и рабочих коллекций, собранных сотрудниками института. В отделе представлена информация о научном наследии выдающихся ученых – организаторов института, внесших весомый вклад в развитие сибирской науки. Демонстрируются экспозиции: фрагменты мемориальных кабинетов, отдельные выставки, витрины, демонстрационные фотостенды, повествующие о жизни и научной деятельности ученых, фрагменты их библиотек, частные разноплановые коллекции. Одна из таких коллекций, принадлежащая чл.-корр. АН СССР Е.В. Пиннекеру, коллекция этикеток минеральных вод разных стран мира, полностью оформлена в этом году к 100-летию со дня его рождения. Более 1500 этикеток из 43 стран мира переданы в дар детьми и внуками Евгения Викторовича. Отдел является хранителем многоплановой геологической информации: пополняемые систематизированные коллекции горных пород, руд, минералов, результаты научно-прикладной деятельности лабораторий.

Подчеркивая тесную связь фундаментальных исследований и основанных на них прикладных разработках, экспонируются в отделе результаты дея-

тельности лабораторий в этом направлении. Среди таких разработок открытие И.В. Беловым и Н.Я. Волянюком в Западном Забайкалье месторождения вулканических стекол и туфов, пригодных для получения строительного материала – вспученного перлита [1]. Производство бетона из перлита было принято Иркутским совнаркомом для внедрения в народное хозяйство. За открытие месторождения и разработку возможностей использования вулканических стекол в качестве сырья для получения вспученного перлита И.В. Белову в 1960 году присуждена малая золотая медаль ВДНХ.

В витринах выставочных залов экспонируются более пятидесяти тематических коллекций. Постоянно действующая экспозиция новых минералов, открытых сотрудниками института при содействии коллег других институтов, к настоящему времени насчитывает 30 минеральных видов. Экспозиция представлена дипломами, выданными КНМ ВМО (РМО) авторам – первооткрывателям новых минералов, утвержденных комиссией IMA по новым минералам, номенклатуре и классификации (CNMNC), образцами, фотографиями шлифов и структур, отдельных минеральных видов.

Поделочные камни Иркутской области: нефриты, лазуриты, чароиты; разноокрашенные кварцы Прибайкалья и Монголии; агаты и халцедоны разных регионов; окаменелые деревья Забайкалья и Монголии; выставка модифицированных минералов; каменная соль Тыретского солерудника; выставка ископаемой флоры палеозоя-кайнозоя; рудные полезные ископаемые и многие другие коллекции представлены в экспозиции отдела.

С историей ряда важных естественно-научных открытий в Сибири связано имя академика Э.Г. Лаксмана (1737–1796), который находясь на должности минералогического путешественника от Кабинета императрицы, с 1782 года жил в Иркутске. В 1785 году им был обнаружен и диагностирован лазурит по реке Слюдянке и описаны жилы с «темной слюдой и зеленым шерлом» (диопсид-флогопитовые). Обе эти находки – лазурита и флогопита стали предпосылкой будущего Слюдянского горно-промышленного узла. В 1790 году, путешествуя по северу Сибири, Э.Г. Лаксман нашел на реке Вилюй в Якутии несколько минералов, среди которых были довольно хорошо ограненные светло-зеленые кристаллы. Эти кристаллы изучали П.С. Паллас (1793), В.М. Севергин (1798), А.Г. Вернер (1810), назвавший минерал гроссуляром, позже Н.И. Кокшаров выполнил гониометрические измерения этого граната. Вилюйское (Скарновое), затопленное водами Вилюйского водохранилища, созданного в 1960-е годы при строительстве Вилюйской ГЭС, месторождение коллекционных гроссуляров, наряду с андрадитом, вилюитом, ахтарандитом украшают экспозицию нашего выставочного зала.

Научно-просветительская и образовательная деятельность отдела направлена на представление и популяризацию геологических знаний среди сотрудников институтов, студентов, школьников, населения города. Особое внимание уделяется детским геологическим и экологическим кружкам, увлекательные экскурсии для которых поддерживают пробудившийся у них интерес к возможно будущей профессии и большой науке. Залы отдела используются для проведения семинаров и в качестве учебных аудиторий для студентов

Иркутского государственного университета и Иркутского национального исследовательского технического университета, в которых преподают сотрудники Института земной коры СО РАН.

Список литературы:

1. Иванова Л.А., Дорофеева Р.П. Музейные экспозиции как напоминание о неисчерпаемых возможностях развития науки./Научно-исторический и культурно-образовательный потенциал сибирских музеев. Новосибирск.2010. С. 150–156.
2. Павлов С. Ф. Институт земной коры СО РАН 1949-1994. Иркутск : Вост.-Сиб. кн. изд-во : АО
3. «Норма плюс», 1994. 160 с.

НАСЛЕДИЕ В СВЕТЕ: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦИФРОВКИ И АТРИБУЦИИ ВИЗУАЛЬНОГО НАСЛЕДИЯ АКАДЕМИКА А. Е. ФЕРСМАНА ИЗ ФОНДОВ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО МУЗЕЯ РАН

Ильин Г. С.[1] (*g.ilin@ksc.ru*), **Павлова Т.М.**[2] (*pavlovaminmus@yandex.ru*)

[1]ФИЦ КНЦ РАН, г. Апатиты, [2]Минмузей РАН, г. Москва

Аннотация: Представлены результаты проекта «Наследие в свете», выполненного в рамках конкурса «Инициативы для Ферсмана» к 310-летию Минералогического музея РАН. В апреле 2026 г. выполнена цифровая пересъёмка более 1000 стеклянных фотопластинок, хранящихся в Минералогическом музее РАН: 765 диапозитивов и 280 негативов. Определены состав и внутренняя организация коллекции, география и хронология сюжетов, особенности сопроводительных подписей. Сопоставление музейных пластинок с описью из фонда А. Е. Ферсмана в Архиве РАН позволило восстановить часть утраченных описаний. Полученные в результате реализации проекта материалы могут быть полезны при подготовке научных публикаций, выставок, а также для дальнейшего изучения экспедиций А. Е. Ферсмана и истории Минералогического музея РАН.

Ключевые слова: *история науки, А.Е. Ферсман, фотосъемка, негативы, диапозитивы*

Фотографические материалы, связанные с экспедициями и музейной работой академика А.Е. Ферсмана, являются значимыми источниками по истории отечественной минералогии и организации научных исследований первой половины XX в. Они фиксируют полевые маршруты, участников экспедиций, состояние ландшафтов и горных выработок, этапы освоения месторождений, устройство музейных залов и способы документирования минералогических коллекций. Оригинальные стеклянные фотопластинки сохраняют изображения с высокой детализацией, но остаются хрупкими и уязвимыми при использовании и длительном хранении. Оцифровка решает две связанные задачи: уменьшить необходимость обращения к оригиналам и сохранить историческую информацию вместе с сопровождающими её номерами, подписями и следами прежней систематизации.

Проект «Наследие в свете: оцифровка и введение в научный оборот уникальной коллекции стеклянных фотопластинок из экспедиций академика А. Е. Ферсмана» был представлен на конкурс «Инициативы для Ферсмана», приуроченный к 310-летию Минералогического музея. Первоначальная заявка предусматривала пересъёмку около 500 диапозитивов, их первичную обработку и создание структурированного набора метаданных. Во время работы объём выявленного материала оказался значительно больше. В течение двух недель в апреле 2026 г. было переснято более 1000 стеклянных фотопластинок: 765 диапозитивов и 280 негативов. Материалы хранятся в музейных коробках под номерами 1–7 и 7а. Коробки 1–5 содержат только диапозитивы, коробки 6, 7 и 7а содержат, в основном, негативы. Таким образом, практический этап

охватил примерно вдвое больше единиц хранения, чем предполагалось при подготовке заявки.

Внутренняя организация коллекции отражает несколько систем учёта. На каждом диапозитиве имеются по два наклеенных номера: один трёхзначный, другой состоит из двух чисел, разделённых дробной чертой, отражающих код географии места съемки. Пластинки сгруппированы в блоки, между которыми помещены картонные разделители с диапазонами номеров, указанием географии и отсутствующими номерами в подборке.

Негативы, в свою очередь, по большей части находятся в индивидуальных бумажных конвертах; на них могут быть указаны подписи к сюжетам и шифры снимка. Эти сведения необходимо также учитывать как часть источника. Электронная запись должна связывать цифровое изображение не с одним условным номером, а со всем комплексом маркировок, надписей, сведений об упаковке и физическом состоянии оригинала.

В подписях к ряду пластинок встречаются ссылки на книгу-опись, которая в фондах музея пока не выявлена. Сходная книга обнаружена в фонде академика А. Е. Ферсмана в Архиве РАН в Москве, где также хранится довольно объемная часть стеклянных негативов, связанных с его экспедициями. Сопоставление записей этой книги с номерами и сюжетами музейных пластинок уже позволило найти некоторые отсутствовавшие описания. Этот результат показывает, что атрибуция коллекции требует совместного изучения разобщённых музейных и архивных комплексов. Нумерация, подписи на конвертах, географические разделители, визуальное содержание кадров и сведения параллельной описи в совокупности дают более надёжную основу для определения места, времени и обстоятельств съёмки, чем любой из этих признаков по отдельности.

Хронологический диапазон коллекции охватывает период с 1910-х по 1940-е гг. География включает Кольский полуостров, Среднюю Азию, Урал, Кавказ, Норвегию и другие районы деятельности учёного. Среди выявленных комплексов имеются серия кадров авиаперелёта 1929 г. над пустыней Кара-Кум и материалы минералогического автопробега 1935 г. по Уралу. Отдельно хранятся негативы с видами залов Минералогического музея после переезда в Москву, изображения музейных образцов и рисунков кристаллографических форм. Благодаря такому составу коллекция документирует не только экспедиционную биографию А. Е. Ферсмана, но и историю музейной экспозиции, научной иллюстрации и представления минералогических материалов.

Особое место занимает крупная серия негативов с Кольского полуострова. В неё входят снимки первых хибинских экспедиций 1920-х гг., начала работы первого апатитового рудника и строительства «Тиетты» – первой научной станции на Кольском полуострове. Часть этих кадров известна по книжным публикациям, репродукциям и музейным копиям, однако стеклянные оригиналы во многих случаях сохраняют значительно больше деталей. Высококачественная пересъёмка позволяет увидеть многие детали: особенности рельефа, построек, техники и лиц людей, которые терялись при прежнем воспроизведении. Вместе с тем состояние пластинок неодинаково: некоторые

изображения имеют дефекты, у отдельных стеклянных основ утрачены отколотые фрагменты. Цифровая фиксация сохраняет доступную на сегодняшний день информацию и снижает потребность в повторной работе с повреждёнными оригиналами.

Источниковедческую ценность имеют и пометки на упаковке. Одна из коробок с хибинскими негативами подписана «Хибины. Хорошие виды», соседняя - «Хибины. Виды не очень хорошие». В коллекции портретов академика сохранились многочисленные оценки, сделанные рукой его вдовы Е.М. Ферсман: «Хороший портрет», «Отретушированный. Плохой» и другие. Эти краткие записи показывают, как внутри фотоархива производился отбор изображений для дальнейшего использования. В массиве фотопластинок встречаются и повторы. Разные пластинки с одним видом или вариантом портрета иногда имеют различные подписи, вероятно созданные в разное время и разными людьми. Такие расхождения также следует фиксировать при каталогизации как свидетельство истории формирования и описания коллекции.

К настоящему времени первично обработано около 500 цифровых изображений. Создана рабочая таблица, в которой указываются номера диапозитивов, география съёмки и, при наличии данных, более подробное описание кадра. Следующий этап предполагает завершение обработки всего отснятого массива, фиксацию надписей и продолжение сопоставления с материалами Архива РАН. Для долговременного хранения проектом предусмотрены цифровые копии высокого разрешения в формате TIFF и копии для использования в формате JPEG.

Проведённая работа подтверждает, что оцифровка стеклянного фотоархива не сводится к получению репродукций. Полноценное введение снимков в научный оборот требует одновременно сохранять изображение, материальные особенности носителя и все слои сопроводительной документации. Сочетание цифровой пересъёмки с анализом номеров, подписей, повторов и параллельных архивных описей возвращает кадрам утраченный контекст. Создаваемый электронный каталог может использоваться при подготовке научных публикаций, выставок и материалов к 310-летию музея, а также для дальнейшего изучения экспедиций А. Е. Ферсмана и истории Минералогического музея РАН.

Работа выполнена в рамках конкурса проектов «Инициативы для Ферсмана», приуроченного к празднованию 310-летия Минералогического музея РАН



Рис. 1. Вид на зал Минералогического музея. Оцифровка со стеклянного негатива из фондов Минералогического музея РАН.



Рис. 2. Вид на зал Минералогического музея. В дальней части зала видна статуя И.В. Сталина и карта СССР. Оцифровка со стеклянного негатива из фондов Минералогического музея РАН.

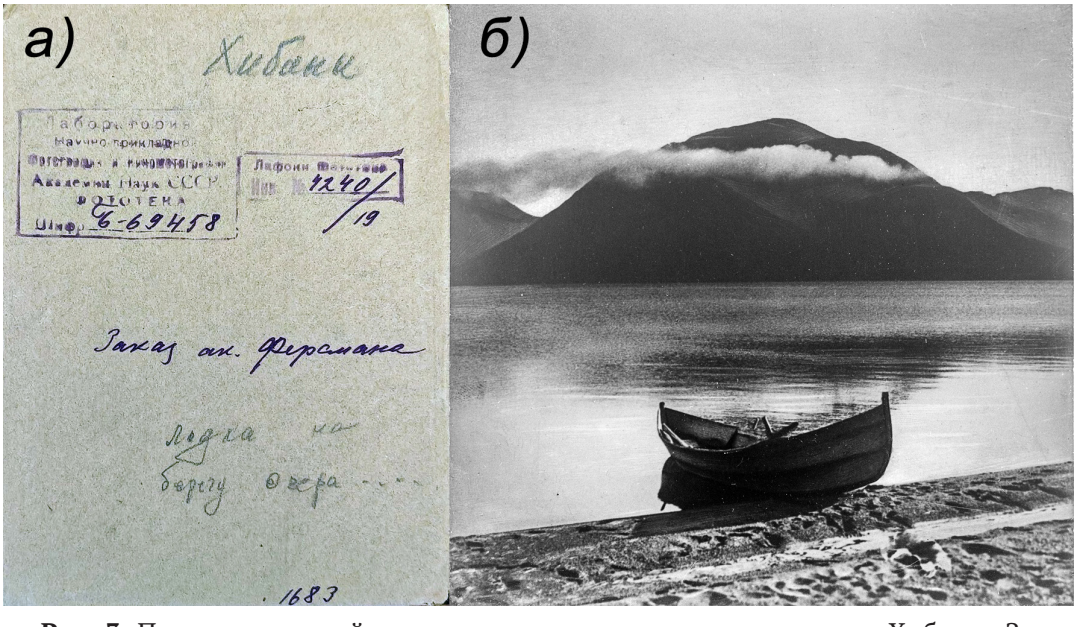


Рис. 3. Пример подписей на конверте со стеклянным негативом «Хибины. Заказ ак. Ферсмана. Лодка на берегу озера …» (а) и оцифрованное изображение с лодкой на берегу оз. Большой Вудъявр в Хибинах (б). Из фондов Минералогического музея РАН.

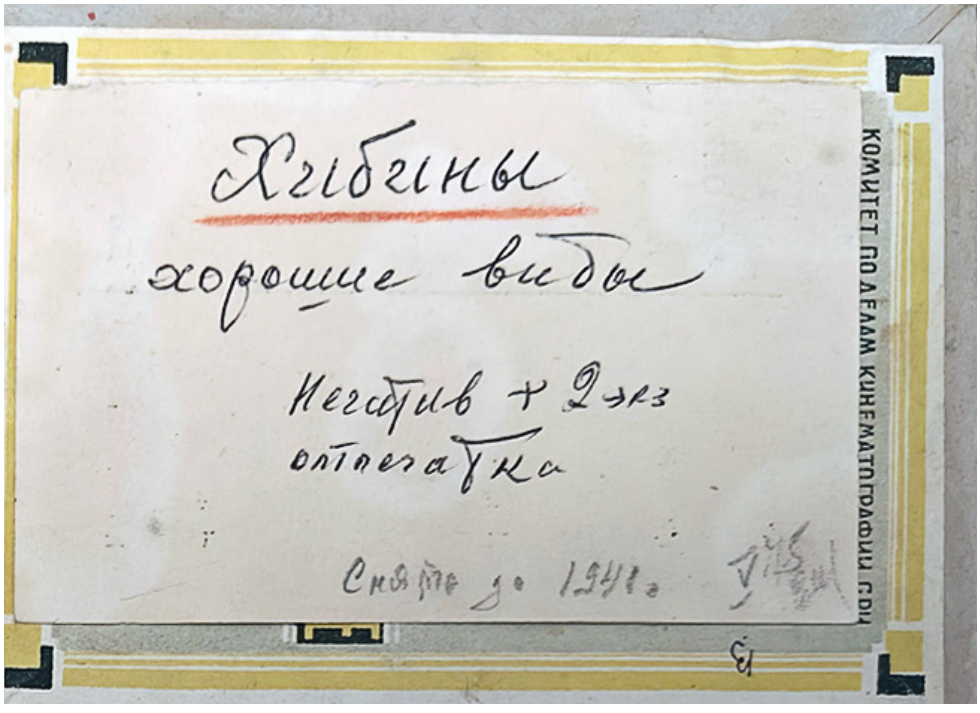


Рис. 4. Пример подписи на коробке со стеклянными негативами «Хибины, хорошие виды». Внизу подпись карандашом: «Снято до 1941 г.» Из фондов Минералогического музея РАН.



Рис. 5. Участники первых хибинских экспедиций во главе с акад. А.Е. Ферсманом. Пример стеклянного негатива, сохранившего высокую детализацию изображения, но имеется утраченный отбитый фрагмент. Из фондов Минералогического музея РАН.

ПАМЯТНИКИ КУЛЬТУРЫ ИЗ КАМНЯ С ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗ КОЛЛЕКЦИИ «МУЗЕЯ МОСКВЫ». КРАТКИЙ ОБЗОР

Карсакова Т.Н. (*KarsakovaTN@culture.mos.ru*)

Государственное бюджетное учреждение культуры города Москвы
«Музейное объединение «Музей Москвы»

В фондах Музея Москвы хранятся обширные коллекции, куда входят, в том числе, предметы, состоящие полностью из камня, либо с отдельными элементами из камня, с включением ювелирных образцов. В докладе представляется обзор коллекции по хронологическому принципу, типологии предметов, а также даётся характеристика отдельных образцов минералов, определение которых удалось осуществить в отсутствии пристального внимания к коллекции со стороны специалистов – минерологов и геммологов на протяжении многих лет. Демонстрация начнётся с рассмотрения орудий труда древнего человека из кремня – часть археологической коллекции. Будут представлены жернова Нового времени из лыткаринского известняка, использовавшиеся на водяной мельнице в московской усадьбе «Кузьминки». Будут продемонстрированы скульптуры из итальянского белого мрамора, а также мраморные постаменты бронзовых скульптур различных цветов и фактуры. Музей Москвы сохраняет не только бытовые и декоративные предметы с использованием камня, выполненные в различных техниках, но и архитектурные элементы, в том числе: детали декора Храма Христа Спасителя и образцы облицовки метро.

ПАЛЕОТАКСОНОМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ФАУНЫ БАЛТИЙСКОГО ЯНТАРЯ НА ПРИМЕРЕ ДАРВИНОВСКИХ ОС (HYMENOPTERA, ICHNUEMONIDAE)

Манукян А. Р. (*manukyan@list.ru*)

ГБУК «Калининградский областной музей янтаря», г. Калининград

Аннотация: На примере дарвиновских ос (Hymenoptera, Ichneumonidae) обоснована возможность палеотаксономических экстраполяций фауны балтийского янтаря за пределы хронологических рамок позднего эоцена.

Ключевые слова: *балтийский янтарь, палеоэнтомология, дарвиновские осы*

Балтийский янтарь – крупнейший лагерштетт в палеонтологической летописи, наиболее полноценно отражающий наземную биотическую ситуацию позднего эоцена. Возраст по современным данным оценивается как ране приабонский (37.2±0.1–33.9±0.1 млн лет) [2, 10]. Уникальность местонахождения заключается в обилии находок и превосходной сохранности беспозвоночных организмов. Несмотря на это, попытки рассмотрения биологический состав балтийского янтаря в общем контексте истории жизни в кайнозое сталкиваются с определенными трудностями поскольку классические представления строятся на данных по морским организмам или позвоночным животным, в то время как янтарь фиксирует информацию о беспозвоночных лесных экосистем.

Настоящая работа выполнена на основе изучения фауны дарвиновых ос (Hymenoptera, Ichneumonidae) балтийского янтаря. Рассмотренное семейство один из наиболее крупных таксонов насекомых, насчитывающего более 25 тыс. описанных современных видов [4]; число ископаемых видов несопоставимо меньше – около 322.

Всего нами рассмотрено около 200 экз. включений дарвиновских ос в янтаре из собрания Калининградского музея янтаря, коллекции Палеонтологического института РАН (г. Москва) и Геолого-палеонтологического музея Гамбургского университета (г. Гамбург, Германия). Ниже приводятся выявленные таксономические элементы родового ранга.

Базальноэоценовые таксономические элементы представлены родами подсемейства Pherhombinae (рис. 1). Ранее подсемейство считалось филогенетическим эндемиком — специализированным таксоном, приспособленным к обитанию исключительно в условиях «янтарного» леса. Однако, описанный по материалам коллекции Музея янтаря род *Furpherhombus* оказался общим для балтийского янтаря и датской формации Фур (базальный эоцен Дании, 56.0–48.1 млн лет, Fur Formation, Ypresian, Denmark) [9, 8], что противоречило ранее утвердившейся точки зрения. Пересмотр эволюционной истории подсемейства переносит время появления группы в палеонтологической летописи в ранний эоцен или, возможно поздний палеоцен. Диверсификация под-

семейства в эоцене происходила путем специализации в двух эволюционных линий – “forpherhombus” и “pherhombus”. Доминирующая в раннем эоцене линия “forpherhombus” на протяжении всего эоцена вытеснялась группой “pherhombus”. В результате этого в верхнем эоцене группа “furpherhombus” уже присутствует в виде угасающей линии, а группа “pherhombus” напротив, диверсифицировала и достигла максимального разнообразия в позднем эоцене [6, 8]. Следы группы “pherhombus” в палеонтологической летописи обнаружены в миоцене (собственные неопубликованные данные), что позволяет предположить ее угасание в олигоцене и окончательное вымирание в миоцене.

Базальноэоценово-олигоценовые таксономические элементы (рис. 1). Обнаруженный в балтийском янтаре раннеэоценовый элемент представлен родом *Crusopimpla* Kopylov et al., 2018 (подсем. Pimplinae). Ранее род был известен только из базального эоцена (формация Фур; Тадуши, Дальний Восток, Россия) и из Флориссанта (граница эоцен–олигоцен, США) [1, 5]. Описанный из балтийского янтаря *Crusopimpla klopfsteinae* Manukyan, 2023 заполняет около четырехлетний пробел в эволюционной истории ос подсем. Pimplinae (Ichneumonidae) [7].

Базальноэоценово–рецентные элементы (рис. 1). Наиболее многочисленная группа, включает ряд родов подсемейств Poemeniinae и Xoridinae. Ярким образом этот тип связей для иллюстрирует род *Xathopimpla* Saussure, 1892 (подсем. Pimplinae), который в балтийском янтаре представлен видом *X. zherikhini* Manukyan, 2025 [8]. Другие виды были известны из раннего эоцена [11] и приабона (Биамо, Дальний Восток России) [3]. По нашим неопубликованным данным род *Xanthopimpla* присутствует также в миоцене.

Как показали результаты исследования таксономический состав дарвиновских ос содержит ряд элементов, указывающих на связи как с более ранними, так и поздними местонахождениями, что ставит под сомнение специфичность фауны. Биота “янтарного” леса имела широкие фаунистические связи и распространение в эоцене (возможно, на протяжении всего палеогена). В связи с этим, фауну балтийского янтаря нельзя рассматривать как изолированный палеотаксономический феномен. Полученные результаты демонстрируют значимость фауны балтийского янтаря для палеотаксономических экстраполяций.

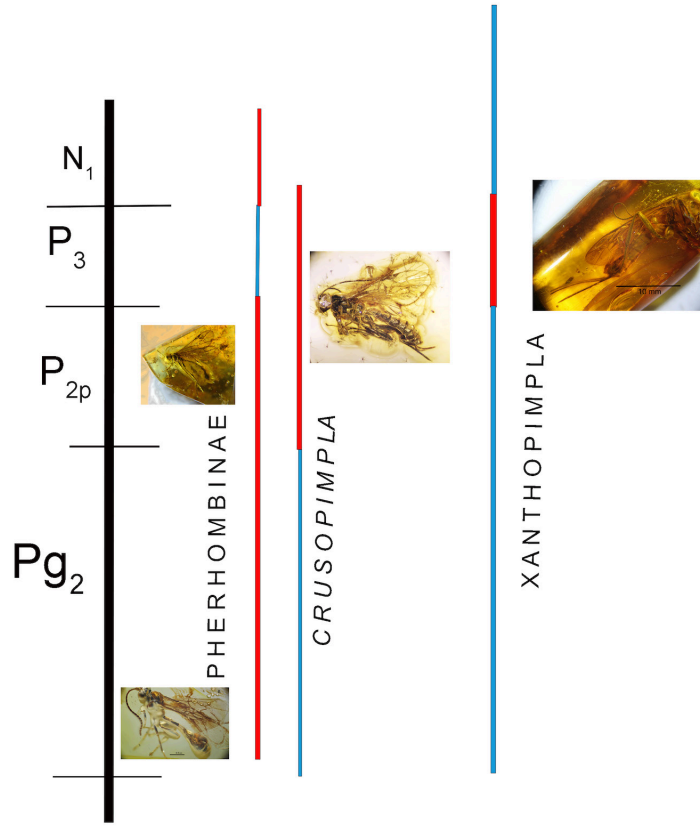


Рис. 1. Палеотакосономические элементы дарвиновских ос (Hymenoptera, Ichneumonidae) в позднеэоценовом балтийском янтаре. Красными линиями показаны новые связи, выявленные по материалам Музея янтаря

Список литературы:

1. Brues C. T. The parasitic Hymenoptera of the Tertiary of Florissant, Colorado // Bulletin of the Museum of Comparative Zoology at Harvard University. – 1910 – V. 54 – P. 1-125.

2. Iakovleva A.I., Aleksandrova G.N. & Mychko E.V. Late Eocene (Priabonian) dinoflagellate cysts from Primorsky quarry, southeast Baltic coast, Kaliningrad Oblast, Russia // Palynology – 2021 – P. 1–40. https://doi.org/10.1080/01916122.2021.1980743

3. Khalaim A.I. Fossil ichneumon wasps (Hymenoptera: Ichneumonidae) from Biamo (Russia), Oligocene // Alavesia – 2008 – V. 2 – P. 101–112.

4. Khalaim A.I. Subfamily Pimplinae. In: Belokobylskij S.A., Samartsev K.G., Il'inskaya A.S. (Eds). Annotated catalogue of the Hymenoptera of Russia. V. II. Apocrita: Parasitica // Proceedings of the Zoological Institute Russian Academy of Sciences. Suppl. 8 – 2019 – P. 406–417.

5. Kopylov D.S. New ichneumonids (Hymenoptera, Ichneumonidae) from the Eocene

Tadushi Formation, Russian Far East // Zootaxa – 2018 – V. 4442, N. 2 – P. 319–330. https://doi.org/10.11646/zootaxa.4442.2.8

6. Manukyan A.R. New data on ichneumon wasps of the subfamily Pherhombinae (Hymenoptera, Ichneumonidae) from Baltic amber, with descriptions of three new species // Entomological Review – 2019 – V. 99 – P. 1324–1338. https://doi.org/10.1134/S0013873819090112

7. Manukyan A.R. A New Species of the Genus *Crusopimpla* Kopylov et al., 2018 (Hymenoptera, Ichneumonidae, Pimplinae) from Upper Eocene Baltic Amber // Paleontological Journal – 2023 – V. 57, N. 3 – P. 84–91. https:doi.org/10.1134/S0031030123030115

8. Meier N., Wacker A. & Klopfstein S. New fossil wasp species from the earliest Eocene Fur Formation has its closest relatives in late Eocene ambers (Hymenoptera, Ichneumonidae, Pherhombinae) // A publication of the Society of Systematic Biologists – 2021 – V. 1 – P. 1–16. https://doi.org/10.18061/bssb.v1i1.8427

9. PBDB: Paleobiology Database [URL: https://paleobiodb.org/#/] (accessed July, 2026).

10. Spasojevic T., Wedmann S. & Klopfstein S. Seven remarkable new fossil species of parasitoid wasps (Hymenoptera, Ichneumonidae) from the Eocene Messel Pit // PLoS ONE – V. 13, N. 6 –e0197477. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0197477

ПУТЬ КАМНЯ: ИСТОРИЯ ПОСТУПЛЕНИЯ ЭКСПОНАТОВ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО МУЗЕЯ В ФОТОГРАФИЯХ И ТЕКСТАХ

Пармузина И.С. (*iparm@yandex.ru*)

Архив РАН, г. Москва

Аннотация: На примере экспедиции А.Е. Ферсмана и Д.И. Щербакова в Каракумы 1925 г. представлена краткая история поступления двух экспонатов Минералогического музея, проиллюстрированная фотоснимками (негативы и диапозитивы) из собраний Архива РАН и Минералогического музея.

Ключевые слова: *экспедиция, Каракумы, серное месторождение, история науки, фотосъемка*

Истории поступления образцов минералов, которые сейчас украшают зал Минералогического музея РАН им. А.Е. Ферсмана или хранятся в его запасниках, представляют важную для научных исследований информацию и часто складываются в захватывающие приключенческие повести, в основе которых, наряду с воспоминаниями и статьями участников экспедиций, лежат документы и фотографии.

В составе документального собрания А.Е. Ферсмана, хранящегося в Музее вместе с библиотекой ученого, находится большая коллекция стеклянных диапозитивов. Они систематизированы по регионам от Северной Европы до Монголии. Очевидно, что диапозитивы предназначались для демонстрации во время лекций и других выступлений, ведь использование волшебного фонаря для проекции изображения на экран стало распространённой практикой в образовании и просвещении еще в последней трети XIX в.

Главным специалистом Минералогического музея Т.М. Павловой была проведена систематизация материалов А.Е. Ферсмана, многие документы уже опубликованы и вошли в научный оборот. Но диапозитивы и негативы оставались мало востребованными исследователями и малоизвестными широкой публике в силу технических сложностей их воспроизведения. Развитие цифровых технологий позволило в XXI в. упростить и ускорить этот процесс. Благодаря проведенной научным сотрудником Кольского научного центра РАН Г.С. Ильиным оцифровке диапозитивов из собрания Минералогического музея стало возможным сопоставить их с иллюстрациями из изданий и негативами из личного фонда А.Е. Ферсмана в Архиве РАН (далее: АРАН). В результате было установлено, что большая часть диапозитивов выполнена с негативов архивного фонда [2], были определены их время и место съемки. Надо отметить, что коллекция негативов в АРАН включает в себя съемки не только Ферсмана, но и других сотрудников Минералогического музея [6, с.252-254]. Коллекцию сопровождал каталог, благодаря которому в нескольких из тех случаев, когда нет совпадающего изображения среди негативов,

можно с достаточной степенью уверенности определить сюжет диапозитива по аннотации в каталоге [4].

Для части диапозитивов также удалось обнаружить сведения об их изготовлении. В документах Комиссии по научным экспедициям сохранилось отношение директора Минералогического музея А.Е. Ферсмана от 1 января 1926 г. с просьбой оплатить счет фотографа В.С. Смирницкого на 60 рублей за 60 диапозитивов «в связи с лекциями академика Ферсмана и Д.И. Щербакова об их экспедиции в Каракумы». [5, л.39-41]. В начале февраля счет был принят к оплате на заседании правления АН СССР. Лекция «Впечатления о поездке в Фергану и Каракумскую пустыню» в марте1926 г несколько раз переносилась, и дата ее проведения в настоящее время неизвестна [5, л.48,51-53,56]. Число диапозитивов в счете соответствует количеству негативов, записанных в каталог, сохранилось 54 негатива этой первой каракумской экспедиции [3; 4, л.7об-8].

Путешествие в центр Каракумов было внеплановым, своего рода научной авантюрой. В начале октября 1925 г. академик Ферсман был командирован на месяц (до 8 ноября) в Узбекистан и Таджикистан для изучения месторождений радиевых и ванадиевых руд [1, л.172-173]. Выполнив основную программу в Фергане, он и геолог Туя-Муюнского радиевого рудника Д.И. Щербаков в конце октября решили обследовать серные бугры в центральных Каракумах с целью определить, достаточно ли богато месторождение, чтобы обеспечить страну сырьем, а также оценить «роль жаркого пустынного климата как фактора своеобразного минералообразования» [9, с.64]. Сборы каравана сначала в Ашхабаде, потом в Геок-Тепе (совр. Гёкдепе) заняли гораздо больше времени, чем планировал Ферсман (рис. 1). В качестве переводчика и охранника к ним был определен «знающий быт и психологию населения» бывший командир одного из приграничных отрядов Закаспийской области М.Д. Поспелов, а также переводчик туркмен и три проводника [7, с. 12] (рис. 2). Путь от стен лессовой крепости в Геок-Тепе до Дарваза занял 12 дней. Открытием для ученых стала в первую очередь жизнь в пустыне. Вопреки представлениям о заполненных исключительно песком пространствах здесь произрастали растения, которые давали тень днем и материал для костра холодной ночью (рис. 3), к жаркому засушливому климату приспособились и немало животных. Как писал Ферсман, «никто из нас не ожидал, что здесь, в этих безбрежных песках, имеется столько населения» [7, с. 16]. Основой жизни людей в пустыне являлись такыры, на плотной глине которых вода весенних ливней образовывала небольшие озера и по вырытым канавкам собиралась в колодцы (рис. 4), сцены у которых: водопой, сбор воды - составляют значительную часть съемок (рис. 5-6). На такырах возле колодцев располагались и аулы кумли - людей песков, которые гостеприимно встречали путешественников.

Первым путешественники достигли самый высокий и массивный из серных бугров - бугор Чеммерли (рис. 7). Они «соскучились по камню среди бесконечных песков» и с первыми лучами солнца устремились к вершине, «почти сплошь состоявшей из прекрасной серной руды» [7, с. 20]. Еще два дня

потребовалось, чтобы достичь колодцев Шиих, за которыми располагался бугор Дарваза. Месторождение было известно с древности, что подтверждали ямы старых разработок, где «среди белоснежных рыхлых измененных песчаников, искрилась и сверкала ярко-желтая, почти чистая сера» [8, стб. 88] (рис. 8). Значительную часть поверхности бугров покрывала «своеобразная корка гипса и кремня» - «результат климатического режима южной пустыни» [7, с. 20; 8, стб. 88] (рис. 9).

Нагрузив верблюдов образцами и запасами воды, участники экспедиции двинулись в обратный путь. 25 ноября1925 г Ферсман направил телеграмму в Академию наук в Ленинград о благополучном возвращении. В пустыне они провели 23 дня. Часть добытых тогда штуфов серной руды находится сейчас в Минералогическом музее в Коллекции месторождений - образец № 7770 (из Дарваза) и № 7816 (из Чеммерли). Фотоснимки Ферсмана и Щербакова позволяют увидеть, в каком ландшафте находились образцы минерала до того, как оказаться в витрине музея, как была устроена жизнь людей в этом пространстве, как ведут свои полевые исследования ученые, наглядно представить те самые «путешествия за камнем», как поэтично была названа книга воспоминаний А.Е. Ферсмана.



Рис. 1. Станция Геок-Тепе, встреча поезда из Ашхабада. Ноябрь 1925 г. Фотограф А.Е. Ферсман (?). АРАН. Ф. 544. Оп. 7. Д. 208. Л2.



Рис. 2. Укладка каравана при отъезде из Геок-Тепе. Ноябрь 1925 г. Фотограф А.Е. Ферсман (?). АРАН. Ф. 544. Оп. 7. Д. 208. Л10.



Рис. 3. «Лесной холодок» по Хивинскому тракту между Иербентом и Кызыл – Такыром
Ноябрь 1925 г. Фотограф А.Е. Ферсман. АРАН. Ф. 544. Оп. 7. Д. 208. Л30



Рис. 4. Канавы для сбора воды на такыре Иербент. М.Д. Поспелов и Д.И. Щербаков. Ноябрь1925 г. Фотограф А.Е. Ферсман. АРАН. Ф. 544. Оп. 7. Д. 208. Л25



Рис. 5. Караван у колодцев Иербент. Ноябрь 1925 г. Фотограф А.Е. Ферсман (?). АРАН. Ф. 544. Оп. 7. Д.208. Л 27.



Рис. 6. Тщательное собирание пресной воды в колодце Учаджи. Ноябрь 1925 г. Фотограф А.Е. Ферсман (?). АРАН. Ф. 544. Оп. 7. Д. 208. Л49



Рис. 7. Бугор Чиммерли, вид с юга. Ноябрь 1925 г. Фотограф А.Е. Ферсман (?). АРАН. Ф. 544. Оп. 7. Д. 208. Л31



Рис. 8. Серные разработки на вершине бугра Дарваза. Ноябрь 1925 г.
Фотограф А.Е. Ферсман (?). АРАН. Ф. 544. Оп. 7. Д. 208. Л42



Рис. 9. Бугор Дарваза, кремневые корки на южном склоне. Ноябрь1925 г.
М.Д. Поспелов и Д.И. Щербаков. Фрагмент фотоснимка.
Фотограф А.Е. Ферсман. АРАН. Ф. 544. Оп. 7. Д. 208. Л43

Список литературы и источников:

1. АРАН. Ф. 411. Оп. 5. Д. 49.
2. АРАН. Ф. 544. Оп. 7. Дд. 202 - 214.
3. АРАН. Ф. 544. Оп. 7. Д. 208. Ч. 2.
4. АРАН. Ф. 544. Оп. 7. Д. 215.
5. Санкт-Петербургский филиал Архива РАН. Ф. 138. Оп. 1 (125). Д. 10.
6. Пармузина И.С. Фотонегативы в составе личных архивных фондов (на примере Архива РАН) // Историческая наука и архивы в XXI веке. Материалы Третьей Всероссийской научной конференции историков и архивистов, посвященной 80-летию Победы в Великой Отечественной войне. Самара, 2025. С. 249 – 258.
7. Ферсман А.Е. В песках Каракумов // Природа и люди. Ежемесячное приложение к журналу «Вестник знания». Ленинград, 1929. 66 с., 1 вклад. л. карт.
8. Щербаков Д.И. Экспедиция на серные бугры в пустыню Кара-Кумы осенью 1925 г. // Природа. Научно-популярный журнал АН СССР. 1926 г. № 7-8. Стб. 73-90.
9. Щербаков Д.И. Отчет экспедиции на серные месторождения у колодцев Шиих в Кара-Кумах // Сера. Сборник статей. Материалы для изучения естественных производительных сил СССР, издаваемые Комиссией при Академии наук. Вып. 59. Л., 1926. С. 63-100.

ЛИТОТЕЧНЫЙ ФОНД ВИМСА — НАУЧНОЕ И КУЛЬТУРНОЕ ОТЕЧЕСТВЕННОЕ НАСЛЕДИЕ

Коровко А. А. (*korovko.aa@vims-geo.ru*),
Печенкин И. Г. (*pechenkin@vims-geo.ru*)

ФГБУ «ВИМС», г. Москва

Аннотация: Литотечный фонд ВИМСа содержит коллекции минеральных образцов многих отечественных месторождений. Ряд коллекций представляет историческую ценность. Многие из них знакомят с недоступными зарубежными объектами, а другие — с уже исчезнувшими с лица Земли в процессе отработки геологических тел. Это служит подспорьем не только в работе института, но и широко используется в процессе обучения студентов, аспирантов, а также знакомит с основами геологии школьников.

Ключевые слова: *В. В. Аршинов, Lithogaea, ВИМС, литотека, промышленные типы руд*

Литотека ВИМСа является государственным достоянием, обеспечивающим развитие знаний об условиях формирования, вещественном составе и технологических свойствах полезных ископаемых. Собрание основано на базе частного научно-исследовательского института России — института «Литогеа» (Lithogaea). Основатель института, профессор Владимир Васильевич Аршинов, в 1904 г. покупает у известной фирмы «Dr. F. Krantz» (Бонн, Германия) эталонную коллекция штуфов горных пород (250 образцов с петрографическими шлифами). Она стала основой для музейного собрания № 1. Затем была приобретена коллекция горных пород Норвегии (206 шт.), образовавшая музейную коллекцию № 2. В литотечном фонде хранятся образцы и из самых первых сборов фирмы «Dr. A. Krantz» Подтверждением служат этикетки с указанием «Фрайберг» Коллекционный материал при размещении фирмы в этом городе собирался в 1833–1835 гг. По-видимому, они были куплены В. В. Аршиновым для личной коллекции. Одним из древних в первой коллекции является образец № 665 — лава Везувия, изверженная в 1858 г. [2, 4].

Впоследствии первая коллекция объединила образцы «Dr. F. Krantz» и образцы горных пород окрестностей Крыма, Балаклавы, окрестностей Пятигорска, Волыни, собранные В. В. Аршиновым, В. И. Вернадским, К. И. Висконтом на полевой университетской практике в Крыму и на Кавказе (1903–1905 гг.). Возможно, эти сборы были проведены ранее, поскольку с 1892 по 1905 г. Висконт был домашним учителем у В. В. Аршинова и мог брать его с собой летом в Крым и на Кавказ. Шлифы к образцам в эти годы заказывались в Москве в Пыжевском переулке, д. 7, а также в фирме «Voigt & Bochgesang Göttingen» в Ганновере или Бремене.

Ныне литотечный фонд ВИМС — уникальное собрание образцов более чем 1 500 отечественных и зарубежных месторождений, многие из которых уже отработаны.

Первая коллекция образцов из российских месторождений поступила

в институт в 1911 г. Это были горные породы района оз. Тургояк на Урале (251 образец), собранные К. И. Висконтом при геологической съемке. В 1917 г. Е. А. Кузнецов передал институту петрографическую коллекцию горных пород Кыштымского района Среднего Урала. Систематическое поступление коллекционного каменного материала в хранилище института по результатам полевых работ сотрудников началось лишь с 1928 года. Это образцы Красноуральского асбестового рудника. В 1931 г. в специальном помещении был открыт Музей технологии минерального сырья. Выставочная экспозиция сразу же получила четкую практическую направленность. В ней демонстрировался весь процесс разрабатываемого в институте геолого-промышленного цикла — от месторождения и руды через технологические цепочки передела до конечных товарных изделий. При литотеке действовало «Бюро минералов», которое формировало коллекции для учебных заведений, занималось обменом коллекционных материалов с заинтересованными организациями, закупкой необходимых экспонатов и продажей излишков дублетного фонда [1, 2].

В 1937 г. часть коллекций была передана созданному в то время Московскому геологоразведочному институту (МГРИ), помещение выставки заняли другие подразделения института, а оставшиеся коллекции сохранялись в плохо приспособленном для хранения каменного материала подвальном помещении литотеки ВИМС. Даже после этого фонды литотеки постепенно увеличивались, расширялись их разнообразие и представительность.

В ноябре 2007 г. выставка промышленных типов руд открылась в обновленном виде. На ней представлено около 2 000 минеральных видов. Выставка демонстрирует руды главных геолого-промышленных типов рудных месторождений и частично, неметаллического минерального сырья, которые в основном служили объектами исследований института. Она размещена в 107 выставочных шкафах, где хранятся более 5 000 образцов, иллюстрирующих многообразие руд промышленных типов месторождений железа, марганца, хрома, титана, вольфрама, молибдена, олова, ниобия, тантала, бериллия, бора, флюорита, слюд. Перечень и основные данные по экспозиционным образцам занесены в электронный каталог. В закрытых ящиках экспозиционных шкафов размещены образцы вмещающих пород, прозрачные шлифы и аншлифы, изучение которых можно проводить на месте с использованием бинокуляра или микроскопа.

Особое внимание уделено демонстрации новых типов месторождений, большей частью выявленных и оцененных сотрудниками ВИМС, в том числе с комплексными многокомпонентными рудами. За 120-летнию деятельность института ее сотрудниками открыто 125 новых минералов, которые также нашли свое место в экспозиции. В настоящее время общее количество предметов хранения в литотеке 147 400 шт., в том числе свыше 36 тыс. образцов, 31 тыс. шлифов и аншлифов. Обменный фонд насчитывает более 37 тыс. образцов. Коллекции образцов регулярно используются для проведения уникальных исследований с применением новейших технических средств [3].

Геологические образцы служат единственным первоисточником

информации о геологических процессах, происходивших на Земле миллионы лет назад и проходящих в наши дни. Большая их часть в собрании является эталонной, проанализированной и потому представляет собой своеобразный банк данных — хранилище геологической и научной информации. Дополнительная ценность образцов заключается в том, что они характеризуют как поверхностные, так и глубокие горизонты, так как отобраны сотрудниками ВИМС при сопровождении разведочных работ, вскрывавших рудные тела в полном объеме.

Основная концепция задач и развития экспозиции включает:

• Накопление, сохранение и демонстрацию полученных сотрудниками института научных результатов в исследовании месторождений. Ознакомление с уже оцененными объектами, проходящими в настоящее время геолого-экономическую переоценку.

• Использование экспозиций и непосредственно каменного материала, продуктов переработки руд, сопровождающих коллекции шлифов, аншлифов, монофракций и фондом подобранной геологической литературы для переквалификации как сотрудников ВИМСа, так и молодых специалистов.

• Соединение создаваемой в институте базы данных по месторождениям совместно с созданной уже сейчас экспозицией каменного материала является, по сути, Центром повышения квалификации для геологов.

• Сохранение созданной экспозиции и обширной коллекции по рудам, изучаемым в институте, дает специалистам возможность обратиться к изучению этого материала уже на новом витке развития как теоретических, геологических, технических разработок, позволяющих детализировать, углублять и по-новому оценивать выводы предыдущих исследований. Собранный геологами и хранящийся в литотеке института каменный материал традиционно используется в проведении научно-исследовательских работ минералогами, химиками, технологами [1, 3].

Углубленному изучению проблемы минерально-сырьевой базы представленных в экспозиции типов минерального сырья способствует и литература — издания геолого-экономической серии журнала «Минеральное сырье», а также методические разработки минералогического направления в виде методических указаний, рекомендаций, инструкций, утвержденных НСОММИ, которые размещены в зале.

Золотой фонд нашего института Научно-техническая библиотека им. проф. В. В. Аршинова. Не покидая ВИМС, можно ознакомиться с любым разделом наук о Земле. Рукописный фонд показывает нам пути решения проблемы импортозамещения, которая стояла перед сотрудниками института в первые пятилетки советской власти, особенности работ по созданию минерально-сырьевой базы страны по многим видам полезных ископаемых, в первую очередь неметаллических. Эти работы — хорошее подспорье при работе с образцами из коллекций литотеки.

Построение музейных коллекций в экспозиции по принципу промышленной типизации месторождений наглядно показывает реальное состояние отечественной минерально-сырьевой базы каждого полезного ископаемого,

предметное сопоставление ее с зарубежной и помогает разработке стратегии ее совершенствования и дальнейшего развития.

Список литературы:

1. ВИМС–LXXV / гл. ред. А. Н. Еремеев. – М.: Недра, 1993. – 334 с.
2. Владимир Васильевич Аршинов. Материалы к библиографии ученых ВИМСа / И. Г. Печенкин, Л. А. Антоненко, И. Е. Любимова, В. И. Кузьмин, Н. А. Серпер. Вып. 3. – М.: ВИМС, 2018. – 112 с.
3. Машковцев Г. А., Печенкин И. Г., Рогожин А. А. Выставка промышленных типов руд — действенный центр повышения квалификации / Международная конференция, посвященная 250-летию Государственного геологического музея им В.И. Вернадского РАН. – М.: ГММ РАН, 2009. – С. 150–153.
4. Печенкин И. Г., Луговская Н. В. Геологическая экспедиция из XX в XXI век. Исторический альбом. – М.: ВИМС, 2025. – 188 с.

ОСОБЕННОСТИ СОХРАНЕНИЯ ДОМОНГОЛЬСКИХ БЕЛОКАМЕННЫХ ПАМЯТНИКОВ АРХИТЕКТУРЫ ОКСКО-ВОЛЖСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ

Рыжков О. В. (*ryzhkov@vladmuseum.ru*)

Владимиро-Суздальский музей-заповедник, г. Владимир

Аннотация: обобщён опыт Владимиро-Суздальского музея-заповедника по сохранению белокаменных построек XII–XIII вв. Основные проблемы их реставрации — влажностный режим участка, подбор камня для вычинки, выбор связующего, поиск мест добычи, сохранение патины — по существу минералого-петрографические; обозначен круг задач, где нужно участие минералогов.

Ключевые слова: *белый камень, мячковский горизонт, фузулиниды, патина, вычинка кладки, реставрация.*

Окско-Волжское междуречье как ландшафт определено опольями — островами серых лесных почв на покровных суглинках среди залесённой равнины. Суздальское Ополье с XI–XII вв. — очаг плотного расселения на пашенном земледелии, в отличие от редко заселённых лесов севернее Оки. Эта хозяйственная база сделала возможным белокаменное строительство XII–XIII вв.: Спасо-Преображенский собор в Переславле-Залесском, церковь Бориса и Глеба в Кидекше, Успенский и Дмитриевский соборы и Золотые ворота во Владимире, Рождественский собор в Суздале, ансамбль в Боголюбове и церковь Покрова на Нерли, Георгиевский собор в Юрьеве-Польском.

Материал построек — органогенно-обломочный известняк мячковского горизонта карбона. По фузулинидам домонгольские постройки сложены камнем нижней зоны горизонта (Fusulinella bocki), послемонгольская Москва — камнем верхней зоны (Fusulina cylindrica); различаются и районы добычи — подземные каменоломни у Подольска и Сьянова против открытых разработок у Мячкова [1]. Под Владимиром эти известняки залегают на глубинах, недоступных для средневековой добычи, а местный камень шёл только на обжиг извести: строительный был привозным. Свойства «хорошего» камня: 45–75 % породы — остатки организмов, зёрна кальцита сцеплены по стилолитовым швам (вязкость, «гвоздистость»), пористость 5–15 % — камень «дышит» и потому уязвим для влаги и солей.

Конструктивно это крестово-купольная система, в Византии плинфяная, здесь выполненная в квадрах. Кладка полубутовая: две облицовочные стенки из тёсаных квадров и забутовка на известковом растворе [2]. Рельефы, судя по завершённости изображения в границах блока, вырезались до укладки; плоская резьба нижних ярусов Георгиевского собора переходит с блока на блок и выполнена по готовой кладке. Квадровая белокаменная кладка романского происхождения впервые на Руси фиксируется в Галицком княжестве (О. М. Иоаннисян). Резные блоки — меньшая часть кладки и только на фасадах: для них утрата поверхности есть утрата авторского произведения, для рядовых

квадров — утрата тёсаной поверхности и патины.

Первая группа — влажностный режим, диагноз по каждому объекту. По Георгиевскому собору в Юрьеве-Польском изыскания показали капиллярный подсос при таянии снега: влага поднимается в стены до 2 м, давая высолы. Для портала Рождественского собора в Суздале главным источником увлажнения признаны осадки [3]. Процент влаги без учёта пористости ничего не значит: выбор мер задаёт граница сорбционной и сверхсорбционной влажности [3]. Тот же режим задаёт биопоражение: пористые известняки наиболее подвержены биокоррозии, а механическая расчистка снимает вместе с обрастанием часть поверхности [4]. Открытый вопрос — обессоливание кладки в натуре: практика ограничена компрессами и вымачиванием, пригодными для предмета, но не для стены [4]; обсуждается жертвенная штукатурка.

Вторая группа — материал вычинки и связующее. Рыхлая вставка становится центром разрушения, плотная или на цементе перекрывает капилляры и ускоряет выщелачивание соседних блоков [1]. Удачен опыт замещения крымским известняком Бьюк-Янкоя (Трофимов, 1945–1950), неудачен — доломит 1960-х. Подбор ведётся по прочности и цвету, а натурных данных о поведении вставок через 20–50 лет почти нет; музей располагает фотофиксацией реставрации 1985–1986 гг. (Покрова на Нерли, Георгиевский собор) — основой такого ряда при повторной съёмке.

Третья группа — поиск источников камня: образцы из кладок сопоставляются с камнем исторических ломок по микрофауне (совместно с ИА РАН). Добыча была крестьянским промыслом, привязанным к сёлам с малой вскрышей: по земской статистике за 1899 г. ломкой известняка в Меленковском уезде занимались 88 человек, крупнейшие ломки — на надельной земле с. Георгиевского, участки делились по душам, артели по 6–12 человек [5]. Часть источников — локальные аномалии вне основного пояса, как старицкие выходы на Волге; запасы их невелики, ручная добыча могла выбрать участок полностью, а выемки зарастали лесом, не оставляя отвалов [2]: искать приходится не месторождение, а следы добычи. Известняки Георгиевского карьера в 1998 г. признаны близкими камню суздальского портала [3]; ныне карьер заброшен, добыча ориентирована на известь.

Четвёртая группа — патина и облик фасадов. Патина образуется путём псевдоморфизма приповерхностного слоя (гипс, переотложившийся кальцит), наследует объём авторской поверхности и не восстановима [4]. Отсюда острота дискуссии по Золотым воротам: после раскрытия видны утраты патины и разновременные вставки, и предлагается вернуть единый белый цвет, привычный последние два столетия (во многом память о набелах); цена ошибки известна по Дмитриевскому собору, где расчистка ускорила разрушение рельефов. Корректная постановка задачи — палитра вычинки и обратимые покрытия, а не унификация.

Итог: сохранение белокаменного наследия упирается в задачи минералогии и петрографии — диагностика пород в кладке, картирование источников, реестр месторождений с возвратом части в реставрационный оборот, натурные ряды по вставкам.

Список литературы:

1. Флоренский П. В., Соловьёва М. Н. Белый камень белокаменных соборов // Природа. – 1972. – № 9. – С. 48–55.
2. Заграевский С. В. Организация добычи и обработки белого камня в Древней Руси – М.: РОСИ, 2008. – С. 5–28.
3. Сизов Б. Т. Сохранение памятников из камня на открытом воздухе: дис. … канд. техн. наук. – М.: ГосНИИР, 1998.
4. Макарова А. С. Археологические находки из белого камня: исследование, консервация, реставрация: дис. … канд. культурологии. – Краснодар, 2022.
5. Материалы для оценки земель Владимирской губернии. Т. III, вып. III: Промыслы крестьянского населения Меленковского уезда. – Владимир, 1901. – С. 37.

ПРИРОДНЫЕ ФОРМЫ БАЛТИЙСКОГО ЯНТАРЯ В КОЛЛЕКЦИИ КАЛИНИНГРАДСКОГО МУЗЕЯ ЯНТАРЯ

Смирнова А.В. (*smirnit@gmail.com*)

ГБУК «Калининградский музей янтаря»

Аннотация: рассмотрена коллекция образцов балтийского янтаря Музея янтаря. Проведена типологизация коллекции и выделены стандартные формы очевидного онтогенеза: натёчные, каплевидные, пластины и внутриствольные образования. Показаны аберрантные формы янтаря, уникальные по своему происхождению.

Ключевые слова: *ископаемая смола, калининградский музей янтаря, формы янтаря, слоистый и монолитный янтарь, янтарные натёки, пластины, сталактиты, каплевидный янтарь*

Ископаемая смола – балтийский янтарь – сформировалась в лесном сообществе северной части современной Европы в позднем эоцене [3].

Янтарь в течение нескольких столетий является предметом коллекционирования, преимущественно собираются разнообразные природные оттенки и образцы, содержащие органические включения.

Большое информационное значение имеют разновидности природных форм янтаря, демонстрирующие специфику выделения смолы янтареносным деревом.

Ежегодно на территории Калининградской области добывается несколько сотен тонн балтийского янтаря, основная масса которого представляет собой неокатанные и слабоокатанные куски [2], но некоторая часть сырья имеет форму, которая демонстрирует обстоятельства и условия смолотечения. Первые попытки классификации форм балтийского янтаря предпринимались в XIX в. [6,7]. Во второй половине XX в. были опубликованы работы, существенно расширившие представления о природных формах [5, 4, 1], авторы которых указывали на их прямую зависимость от места выделения смолы, температурно-влажностного режима и др.

В Музее янтаря (КМЯ) уже более 40 лет формируется коллекция природных форм янтаря, наиболее активно – последние 15 лет. Комплектуются как «стандартные», так и аберрантные формы. К стандартным мы относим разновидности янтаря, морфологические признаки которых очевидно указывают на его происхождение. Янтарь аберрантных форм имеет отклонения от типичных вариантов формирования кусков.

«Стандартные» формы янтаря.

В зависимости от места смолоистечения выделяют поверхностные (наствольные) и внутренние (внутриствольные) скопления смолы граница между ними не всегда четкая.

Поверхностные формы сформированы смолой, истекавшей из ран и трещин коры на наружную поверхность ствола дерева. В результате формировались разнообразные натёки и сталактиты (иногда именуемые сосульками),

которые характеризуются: 1). слоистой структурой, так как сформировались в результате многочисленных выделений жидкой свежей смолы, происходивших с небольшими промежутками и в течение короткого времени; 2). светопроницаемостью (прозрачностью); 3). мощной коркой окисления; 4). обилием включений беспозвоночных и растительных фрагментов.

Натёки (рис.1) формировались в результате многократного стекания отдельных порций смолы поверх предыдущих, отвердевших по наружной поверхности. Одной плоскостью они были прикреплены к внешнему слою коры, рост натеков происходил перпендикулярно к поверхности ствола. В результате образовывались крупные куски натечно-слоистой структуры.



Рис.1. Образцы янтаря натёчной формы с удаленной коркой окисления. Очевидна видна слоистая структура янтаря. Собрание КМЯ №8455, 9236

Частный случай натеков представляют собой **сталактиты**, сформировавшиеся в свободном пространстве и прикрепленные к дереву только в своей вершине. Сосульки имеют удлиненную цилиндрическую форму, скорлуповато-концентрическую структуру, состоят из многочисленных скорлупок, образовавшихся из отдельных порций смолы, расположенных асимметрично. Слоистая структура натеков и сосулек снижает устойчивость таких экземпляров ко внешним воздействиям и повышает вероятность их распада на отдельные скорлупки (рис. 2).



Рис. 2. Янтарный сталактит, распавшийся по отдельным скорлупкам

Внутриствольные формы образованы смолой, скапливавшейся внутри ствола дерева – в заболони, заполнявшей полости между годичными кольцами или образовавшиеся при повреждении ствола (в результате гниения, морозов, молний и т.д.). Отдельные порции смолы, в отличии от наружных натёков, не отвердевали на воздухе, поэтому такой янтарь имеет массивную структуру и преимущественно матовый.

Пластины формировались в полостях между годовых колец деревьев. Они имеют монолитную структуру, вытянутую по вертикали форму, часто близкую к овалу, длину превышающую ширину и небольшую толщину. Корка выветривания имеет разнообразную фактуру, в некоторых случаях видны отпечатки волокон смолоносного дерева (рис. 3.).



Рис. 3. Пластина янтаря с отпечатком. Собрание КМЯ №4249

Крупные, с минимальным радиусом изгиба, пластины указывают на большой диаметр стволов смолоносных деревьев (рис. 4).



Рис.4. Пластина янтаря (вес 320 г). Собрание КМЯ №7748

Янтарь смешанного происхождения формировался в случае выхода смолы, скопившейся внутри ствола, наружу. К таким промежуточным формам относится каплевидный янтарь (рис. 5). Первый этап формирования капли происходил внутри дерева, например, в слабонаклоненных ветвях [4], затем уже загустевшая смола выходила наружу и благодаря своей вязкости

принимала форму, близкую к сферической. Поверхность капель отвердевала в разных условиях влажности и температуры, поэтому корка усыхания таких образцов отличается большим разнообразием. Каплевидный янтарь преимущественно монолитный, непрозрачный, с тонкой коркой окисления, имеет разный размер и вес – от экземпляров в менее одного грамма до самого крупного в коллекции КМЯ – около 100 г.



Рис. 5. Каплевидный янтарь.
Собрание КМЯ № 4495.13, 4295.3, 1063.40, 4295.10, 4295.43, 4495.18

Большой интерес для комплектования представляет **янтарь аберрантных форм**, то есть имеющий отклонения от типовой массы добываемого сырья и не укладывающийся в параметры «стандартных» природных форм. Эти формы уникальны по своему генезису и являются, как правило, результатом воздействий внешних факторов на смолу в моменте её выделения: уникальностью места и самого процесса истечения смолы и особенностями окружающих условий, например, соседства других организмов.

«Янтарь в янтаре». В процессе смолоистечения поверхность отдельных тонких струек смолы отвердевала, в некоторых случаях этот отдельный поток мог быть обильно покрыт следующей порцией. В результате формировалась «сосулька», зафиксированная в своего рода смоляном контейнере.



Рис. 6. «Янтарь в янтаре». Собрание КМЯ № 8669

Янтарь фитотельматного происхождения представляет собой специфичную секрецию (рис. 7). По стенкам полости в стволе дерева - небольшого дупла, заполненного водой - стекала свежая смола. Одна из её порций попала в воду и отвердела, приняв сферическую форму. Последующие потоки смолы полностью заполнили дупло, сохранив внутри полость с отвердевшей «каплей». В результате получился кусок, содержащий внутри каплевидный янтарь, который был обнаружен случайно при вскрытии образца и удаления окисленного слоя.



Рис. 7. Янтарь фитотельматного происхождения. Собрание КМЯ № 5049

Слепки (рис. 8) представляют собой отпечатки на одной стороне куска ископаемой смолы поверхности листьев без сохранения растительных остатков. В коллекции музея находятся три отпечатка листьев пальмы (Palmaceae) и два – листьев покрытосеменных (Angiospermae). Такие образцы формировались в результате обильного смолоистечения на листья растений, произраставших в непосредственной близости от смолоносного дерева.

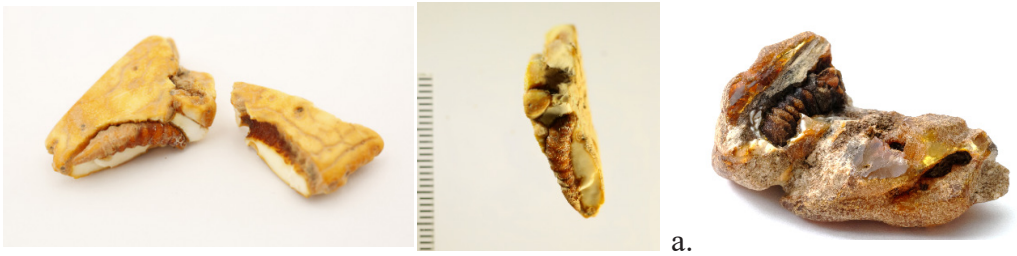


Рис. 8. Отпечатки листьев. Собрание КМЯ № 6531, 6360

Образцы беспозвоночных животных, замещенные янтарем. Формирование этих образцов происходило в ходах ксилофагов, где находилась личинка и куда выделялась свежая смола, затем в процессе окаменевания происходило замещение смолой тканей насекомого. В результате сформировавшийся образец янтаря может содержать как негативный отпечаток (рис. 9), так и сам окаменевший организм (рис. 10). Такие образцы имеют особую ценность, так как включения ксилобионтов преимущественно визуально не просматриваются или трудно идентифицируются из-за светонепроницаемости янтаря внутриствольного происхождения.



Рис. 9. Отпечаток личинки на янтаре. Собрание КМЯ № 6655.



а. б.

Рис. 10. Замещенные янтарем личинки ксилобионтов. Собрание КМЯ
а - № 6602, б - 8545

Коллекция природных форм не исчерпывается упоминаемыми в этой работе разновидностями. Развитие данного направления позволяет создать своего рода природный архив данных о происхождении янтаря и использовать особенности морфологии янтарных образований для реконструкции палеоэкологических условий древнего лесного сообщества, его таксономического состава, особенностей смолотечения и др. Поэтому сбор природных форм является одной из важнейших задач в комплектовании Музея и формировании полноценного янтарного собрания.

Список литературы:

1. Катинас В. Янтарь и янтареносные отложения Южной Прибалтики – Вильнюс: Минтис, 1971 – 156 с.
2. Киевленко Е. Я., Сенкевич Н. Н. Геология месторождений поделочных камней. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Недра, 1983 – С. 110-111.
3. Кузьмина О. Б., Яковлева А. И. Новые данные о спорово-пыльцевой характеристике верхнеэоценовых отложений Самбийского полуострова, Калининградская область // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2023 – Т. 31, № 3 – С. 99-115.
4. Савкевич С. С. Янтарь. – Л.: Недра, 1970 – 192 с.
5. Andree K. Der Bernstein: Das Bernsteinland und sein Leben. – Stuttgart: Kosmos, 1951 – 96 s.
6. Aycke J. Ch. Fragmente zur Naturgeschichte des Bernsteins. – Danzig, 1835 – 107 s.
7. Klebs R. Der Bernstein: Seine Gewinnung, Geschichte und geologische Bedeutung: Erläuterung und Catalog der Bernstein-Sammlung der Firma Stantien & Becker – Koenigsberg, 1880 – 39 s.

ПЕЧАТЬ ИЗ «СОЮЗНОГО КАМНЯ» В СОБРАНИИ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО МУЗЕЯ ИМ. А.Е.ФЕРСМАНА РАН

Соколова Е.Л.[1] (*sokolova.e_59@mail.ru*),
Спиридонов Э.М.[1,2] (*ernstspiridon@gmail.com*)

[1] *Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, Москва*
[2] *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

Аннотация: исследована резная печать из уральского «союзного камня»; герб на ней указывает на род дворян Миклашевских. Установлено, что «союзный камень» это альбитизированные рихтерит-феррорихтеритовые щелочные граниты, пересеченные жилой щелочного кварцолита с реакционной оторочкой ферриферровинчита.

Ключевые слова: *«союзный камень», камнерезные изделия, коллекция Минмузея РАН, резная печать, герб Миклашевских, Екатеринбургская и Петергофская гранильные фабрики, альбитизированные щелочные граниты, феррорихтерит, кварцолит, ферриферровинчит.*

Проявление своеобразного поделочного «союзного камня» - пестрого гранитоида с прожилками светлого зернистого полупрозрачного кварца - было обнаружено во второй половине XVIII века на Среднем Урале [1, 4-7]. Изделия из этого камня весьма редки. В коллекции ПДК Минмузея РАН хранится 6 образцов «союзного камня» - полированные штуфы, кабошон и резная печать [8, 9]. Печать высотой 8,5 см имеет цилиндрическую форму; канелированный столбик и подошва приходятся на кварцолитовый прожилок, а гладкое полусферическое навершие — на пестрый гранитоид с тёмной оторочкой на контакте с кварцолитом (рис. 1). На подошве печати диаметром 3,5 см вырезан герб, дополненный орденом и медалью на лентах (рис. 2).



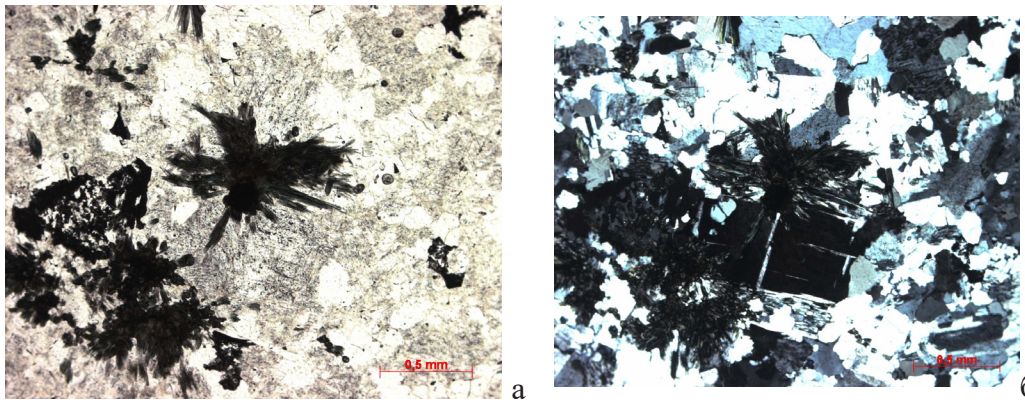
Рис. 1. «Союзный камень» № ПДК 4169, резная печать. Фото Н.А. Пековой.



Рис. 2. Герб на подошве резной печати. Фото Н.А. Пековой.

Изучение резного герба на печати из «союзного камня» позволило предположить, что печать принадлежала дворянскому роду Миклашевских [2, 3] и, вероятно, была изготовлена на Екатеринбургской гранильной фабрике в середине XIX века. Орден слева, скорее всего, является орденом Св. Станислава; медаль справа — либо за участие в Крымской войне, либо за оборону Севастополя. Однозначно определить, кому именно принадлежала печать, пока не представляется возможным. Однако, можно предположить, что история печати связана с Петром Ивановичем Миклашевским (1825 - 1889) - выдающимся практиком в области горного дела. В 1858 - 1866 гг. он был директором Екатеринбургской гранильной фабрики и Горно-щитского мраморного завода на Урале [10].

Нами исследован состав «союзного камня» и определена номенклатура пород. Это мелко-среднезернистые интенсивно альбитизированные двуполевошпатовые щелочные граниты с массивной текстурой, пересеченные жилой кварцолита. В альбитовой и кварц-альбитовой матрице пород разбросаны срастания длиннопризматических зональных кристаллов щелочного амфибола - железистого рихтерита с оторочками феррорихтерита (рис. 3). Альбитизированные щелочные граниты содержат заметное количество акцессорных минералов. Это фторсодержащий титанит, гидроксилфторапатит, обогащённый лантанидами. Более редки – слабо зональный циркон, бедный гафнием (0.6-0.8 масс. % HfO_2), монацит-(Ce), монацит-(La), твёрдый раствор хаттонит - чералит, бацирит $BaZr[Si_3O_9]$.



а б

Рис. 3. Альбитизированные щелочные граниты с гнёздами длиннопризматических кристаллов железистого рихтерита с оторочками феррорихтерита. В проходящем свете, а – при 1 николе, б – николи X. Фото Э.М. Спиридонова

Породы пересечены жилами зернистого кварцолита, практически мономинерального. Вдоль контактов жил развита реакционная оторочка щелочного амфибола тёмно-зелёного цвета — феррифферровинчита. Полученные нами фактические данные свидетельствуют, что описанные в образцах «союзного камня» кварцевые жилы представляют собой щелочные кварцолиты, редкую магматогенную горную породу существенно кварцевого состава.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы Минмузея РАН FMWF-2025-0005 № 122041800017-2 «Междисциплинарный подход в формировании принципов научного комплектования, хранения и экспонирования фондов музея и популяризации минералогической науки».

Список литературы:

1. Мавродина Н.М. Искусство екатеринбургских камнерезов. Каталог. Спб. Издательство Государственного Эрмитажа. 2000.
2. Общий гербовник дворянских родов Российской империи. Ч. III, Л. 105. https://gerbovnik.ru/arms/405.html
3. Остоя (герб) — история, описание, символика и значение. https://ru.ruwiki.ru/wiki/Остоя_(герб)
4. Севергин В.М. Подробный словарь минералогический. Т. 2. Спб. 1807.
5. Семенов В.Б. «Союзный» камень. Из сб. Старый Екатеринбург. Екатеринбург. Аква-Пресс ИГЕММО «Lithica». 2002. С. 561-589.
6. Ферсман А.Е. Драгоценные и цветные камни России. Т. 1. Петроград. 4-я Государственная Типография. 1920.
7. Ферсман А.Е. Очерки по истории камня. 2 т. М.: Издательство Академии наук СССР. 1954.
8. Чистякова М.Б. Камнерезные изделия фирмы Фаберже в коллекции Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН // Новые данные о минералах. 2004. Вып. 39. С. 124-140.
9. Чистякова М.Б. Камнерезные изделия в коллекции Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН. М.: Издательство «Майер». 2019. 264 с.
10. Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона. Спб. 1890-1907.

СИБАЙСКАЯ ШКОЛА ФЛОРЕНТИЙСКОЙ МОЗАИКИ: ВОЗНИКНОВЕНИЕ, РАЗВИТИЕ, СВЯЗЬ С РОССИЙСКИМ И СОВРЕМЕННЫМ НАСЛЕДИЕМ, ОТЛИЧИЕ ОТ ДРУГИХ НАПРАВЛЕНИЙ РОССИЙСКИХ ШКОЛ ФЛОРЕНТИЙСКОЙ МОЗАИКИ

Тюльпакова О.Н. (*tulip60@mail.ru*)

РГХПУ им. С. Г. Строганова

Аннотация: выполненная работа посвящена феномену возникновения в конце *XX* века и развития на Южном Урале, в городе Сибай, центра создания флорентийской мозаики. По уровню исполнения и декоративным достоинствам эта мозаика превзошла достижения мастеров прошлых эпох и настоящего времени за всю историю этого вида декоративно-прикладного искусства. Основная манера изображений – живописная, а не аппликативная, основной материал – яшма. Подобную технологию А.Е. Ферсман характеризовал как тонкое сочетание флорентийской и русской мозаики.

Ключевые слова: *Сибай, Южный Урал, флорентийская мозаика, русская мозаика, pietre dure, яшма, статус «Всемирного ремесленного города», сибайская школа флорентийской мозаики.*

14 августа 2026 года *«в рамках празднования Дня города и VIII Всероссийского инвестиционного сабантуя «Зауралье-2026» Сибай получил международный сертификат о присвоении статуса «Всемирного ремесленного города» за художественные изделия из камня и башкирские национальные ювелирные украшения. Памятную гранитную плиту главе администрации города Сергею Озерцову передала вице-президент Всемирного ремесленного совета (WCC-AISBL) Надя Меер (ЮАР)»* [16] (Рис. 1)



Рис. 1. Памятную гранитную плиту главе администрации города Сергею Озерцову передала вице-президент Всемирного ремесленного совета (WCC-AISBL) Надя Меер (ЮАР)» (Сибай, 14 августа 2026) [16]

«Ещё в сентябре прошлого года на форуме „Зауралье-2025“ мы принимали делегацию Всемирного ремесленного совета во главе с президентом господином Саадом Аль-Каддуми (Кувейт). Вместе мы посетили производственные площадки, увидели, как в учебно-производственном предприятии „Артель“ мастера-камнерезы превращают уральские минералы в настоящие произведения искусства. Именно тогда зарубежные эксперты воочию убедились ***в уникальности башкирской школы обработки камня*** *и самобытности наших национальных украшений»*, — рассказала Маргарита Болычева (авт. - министр внешнеэкономических связей и конгрессной деятельности республики)» [17]. (Рис. 2)



Рис. 2. Надя Меер с коллегами Всемирного ремесленного совета в мастерской «Девятов и К», Сибай, август 2026 г. (Фото О. Н. Тюльпаковой, экспедиция, 2026 г.)

На рубеже XX – XXI веков на Южном Урале, в Сибае и Уфе (Башкортостан), в силу ряда обстоятельств сформировалась сильнейшая в мире школа флорентийской мозаики, которую можно назвать «сибае-уфимской школой флорентийской мозаики». Мозаичные панно мастерских этих городов стали победителями Всероссийских и международных конкурсов и выставок камнерезного и ювелирного искусства в Москве (конкурс Гохрана) [15], в Калининграде [21], Екатеринбурге. Эти панно стали объектами страстного вожделения коллекционеров, украшают залы частных музеев [7]. (Рис. 3,4, 5, 6)



Рис. 3. В галерее флорентийской мозаики Виталия Заседкина, Москва, 2025 г. (Фото О. Н. Тюльпаковой)



Рис. 4. В галерее флорентийской мозаики Виталия Заседкина, Москва, 2025 г. (Фото О. Н. Тюльпаковой)



Рис. 5. С. В. Петухов, директор Музея истории Мироздания (Дедовск, Московская область) представляет посетителям коллекцию флорентийской мозаики мастеров Уфы и Сибая из фондов музея, 2025 г. (Фото О. Н. Тюльпаковой)



Рис. 6. Панно художника Юлии Валитовой (мастерская «Девятов и К», Сибай) «Ромео и Джульетта на балконе» по мотивам живописной работы Юлиуса Кронберга (1886 г.), флорентийская мозаика (яшма, виолан, родусит, родохрозит, чароит, белореченский кварцит, авантюрин, ирнимит, мукаит, мрамор). Из собрания Музея истории Мироздания (Дедовск, Московская область)

Сразу обозначим, что термин «флорентийская мозаика» употребляется только в России. Во всем мире для мозаик, выполненных подобным образом с античных времен, используется термин «opus sectile», что в российской академической практике звучит как «пластинчатая» или «штучная» [20, стр. 26]. В самой Италии употребляют термин «commesso» (состыковочный), «pietre dure» (твёрдый камень) или - реже - «commesso and pietre dure» [12, 4] (Рис. 7)



Рис. 7. Тигрица нападает на теленка (техника opus sectile). I четверть IV в. н. э. Из Базилики Юния Басса, Рим. Сейчас - в Капитолийских музеях, Рим. [12]

Основным материалом для создания панно уральским мастерам служит яшма, а не мрамор, как в знаменитых с XVI века западноевропейских (флорентийских) мозаиках. Это уже первый определяющий характерный признак, лежащий в основе отличия башкирских работ. У данных горных пород есть существенные различия и в технике обработки, и в декоративных свойствах. Мрамор относится к мягким камням, имеет жирный блеск, зеркальную полировку держит не долго [2]. В европейских мозаиках использовались как инкрустация и твёрдые камни, но также цветные стекла, смальта, раковина. Надо отметить, что в самой Италии так называемую флорентийскую мозаику не многие могли себе позволить: в основном храмы и дворцы украшались изображениями, имитирующими мозаику, выполненными в технике «скальола» (штукатурка под камень). [5] (Рис. 8 и 9)





Рис. 8 и 9. Столешница итальянской работы (мрамор, доломит, раковина). Из собрания Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана в Москве (Фото автора О. Н. Тюльпаковой, 2026 г.)

Почему именно яшма стала визитной карточкой сибайских мастерских? Ответ очевиден: Сибай находится на юге Яшмового пояса Урала, который протянулся на 500 км от реки Миасс на севере до города Орска на юге с небольшими перерывами полосой до 50 км в ширине [11]. Яшма Сибая и окрестностей отмечена уникальным сочетанием красок и рисунков [8]. И население, конечно, не могло этого не замечать. Уфа находится в стороне от Яшмового пояса. Возникает закономерный вопрос: почему на столь обширной территории именно только в двух населенных пунктах - Уфе и Сибае – и только в конце прошлого века возникли центры изготовления флорентийской мозаики, не имеющие себе равных в мире за всю историю этого вида декоративно-прикладного искусства по уровню технического и художественного исполнения?

Уральские города априори связаны с геологической отраслью, с полезными ископаемыми. Город Сибай возник и начал развиваться в связи с открытием здесь в 1913 году полезных ископаемых (полиметаллов) и их освоением. Экономика Сибая до 2019 года практически полностью была сосредоточена вокруг горнодобывающей отрасли [6].

В 1990-е годы большинство геологических предприятий по стране, потеряв государственное финансирование, искали возможности заработков. На многих горно-обогатительных фабриках того времени, в геологических экспедициях стали больше экспериментировать с изготовлением сувенирной продукции, благо что и производственные площади, оснащенные камнерезными станками, имелись. Мастерские в Уфе и Сибае были созданы людьми из геологического мира, бывшими работниками «Башкиргеологии». «Артель», организованная Халидом (Анатолием) Нигматуллиным, и мастерская Дамира Девятова родились в конце 1980-х годов из «шлифовалок» (так геологи называют маленькие мастерские по изготовлению шлифов и аншлифов для изучения под микроскопом). Изначально мастерские делали подарочные изделия из камня: шкатулки, подсвечники, часы, были и камнерезные объемные работы [14].

Изготовление мозаик началось не сразу. Для этого должен был быть какой-то посыл. Этим импульсом стало сильное впечатление, охватившее Х. Нигматуллина (Уфа, «Артель») от созерцания монументального мозаичного панно из самоцветов Геннадия Павлишина «Поэма о Приморье», площадью в 12 кв.м., в вестибюле Дворца приемов г. Хабаровска. В 1992 году Халид сделал свою первую мозаику, потом вторую. Азарт экспериментаторства, как известно, заразителен. Д. Девятов (Сибай), вдохновленный успехом уфимского коллеги, захотел тоже попробовать, но не просто идти по обозначенному пути, а делать все как-то необычнее. В 1994 году в сибайской мастерской изготовили первую мозаику.

Уже на начальных этапах наметились отличия в технике подхода к изображению, в стилистике. Традиционный аппликативный подход создания флорентийской мозаики, принцип которого обозначил еще в XVI веке Джорджио Вазари [3], то есть когда образ целиком читается на некотором отдалении, совершенно устраивал организатора «Артели». Его устремление к деятельности широкой по размаху выразилось в преобразовании мастерской в учебно-производственное предприятие, где в дальнейшем будут проходить практику сотни студентов. Апофеоз в творчестве мастерской А. Нигматуллина, через масштабность и декоративность, прозвучал при создании в 2003-2004 гг. монументального панно (90 кв. м.) «Лейла» в уфимском театре «Нур». [13] (Рис. 10)



Рис. 10. Монументальное панно (90 кв. м) «Лейла» в уфимском театре «Нур», выполненное мастерами УПП «Артель» (Уфа) под руководством главного художника Любови Чебан в2003-2004 гг. (Фотоархив Л. Чебан)

Д. Девятов, напротив, стремился уловить некую тонкость, «флер», исходящий от камня, и с первых шагов уже стремился к выражению живописности в мозаиках. Это отчетливо видно при сравнении первых панно «Тукан», изготовленного в «Артели» (Уфа), и «Каллы» сибайской мастерской. (Рис. 11 и 12)



Рис.11. Крышка шкатулки «Тукан», 1992 г., первая флорентийская мозаика, выполненная в Уфе (мозаичист Андрей Журавлев, замысел и руководство Халида Нигматуллина, мастерская «Артель»)



Рис. 12. Панно «Каллы», 1994 г., первая флорентийская мозаика, выполненная в Сибае (мозаичист Александр Арефьев, замысел и руководство Дамира Девятова)

Стремление выразить живописность влияло и на подходы к изготовлению, которые практически уже превращались в ювелирную технику, но не имевшую никакого отношения к микромозаике, где плавный переход цвета мог быть достигнут за счет мелких деталей (пиксельный подход). В Сибае все переходы линий, красок стремились передать самим рисунком камня и тщательным подбором следующего участка, как продолжения, и только потом уже шло выпиливание детали, часто без строгой внешней границы. Картина как бы постепенно наращивалась, подобно процессу роста кристалла от затравки. Панно, выполненное подобным образом, невозможно повторить по шаблонам: точного повтора рисунка в яшме не встречается. Авторские разработки технологий подгонки деталей, когда стыки абсолютно глухие, обеспечивали невероятный «эффект монолитности» каменной поверхности, усиливающийся зеркальной полировкой. Используемые материалы и поставленные задачи при создании сибайских мозаик требуют от мастера напряжения творческих и физических сил, художественных способностей, чувства камня и, конечно, больше терпения. Мозаики не могли быть масштабными – монументальными: они носят камерный характер, относятся к станковой живописи. [18]

Что это за техника? Как ее можно охарактеризовать? Аналог в истории мы можем найти в собрании Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН (Москва) и в Эрмитаже (СПб). Это шкафчики – подарок Александра III своей супруге - из ценных пород дерева, выполненные в стиле эпохи Людовика XVI французским мастером Анри Дассоном [9] и петербургскими мастерами столярных дел А.В. Шутовым и золотых и бронзовых дел А.Я. Соколовым. Шкафчики должны были быть украшены панно из самоцветов «Тропический лес на белом фоне», «Тропический лес на синем фоне» по рисункам А. Дассона и панно «Арабески» по оригинальным рисункам Франсуа-Себастьяна Лериша, художника эпохи Людовика XVI. Мозаики предстояло выполнить камнерезам Императорской Петергофской фабрики. Время изготовления заняло 8 лет (1885-1893гг.). [20] (Рис. 13, 14 и 15)





Рис. 13. Шкаф-кабинет из красного дерева с мозаичным панно «Тропический лес на белом фоне». 1883-1884 г., Париж (шкаф). 1884 -1893 г., Россия (флорентийская мозаика). Размеры: 148,0 х 72,0 х 40 см. Из собрания Государственного Эрмитажа, Санкт-Петербург [10, с.149]

Рис. 14. Шкаф-кабинет, двухстворчатый из чинарового дерева (платан), работы петербургских мастеров А. В. Шутова и А. Я. Соколова, с мозаичным панно «Арабески». Из собрания Государственного Эрмитажа, Санкт-Петербург [10, с. 155]

Перечень цветных камней, используемых в мозаике, был опубликован А.Е. Ферсманом: бадахшанский и сибирский лазурит, празем, квинсит, кахолонг, орская, калканская, итальянская, ленточная, древовидная и сургучная яшма, самарский агат, окаменелое дерево, брекчия, крымские «голыши», лабрадор, тигровый глаз, главколит, уральский амазонит, итальянский мрамор. [19]



Рис. 15. Шкаф-кабинет, двухстворчатый, из дерева амбойны, работы петербургских мастеров А. В. Шутова и А. Я. Соколова, с мозаичным панно «Тропический лес на синем фоне». Из собрания Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана в Москве [20, с. 57]

Размеры панно в шкафчиках - 57х23 см (у двухстворчатых), приблизительно 60х50 см (у одностворчатого) и меньше. То есть вполне станковая живопись. Самое замечательное, что академик А.Е. Ферсман в своем эпохальном труде «Очерки по истории камня» подчеркнул особенность технологии изготовления этих мозаик: «Шкаф со вставленными в дверцы панно из цветных камней с тонким сочетанием флорентийской и русской мозаики… Имел огромный успех на выставке в Чикаго (1893г.)». [19, 128-129 стр.] (Рис. 16 и 17)



Рис. 16 и 17. Фрагменты флорентийских мозаик «Тропический лес на синем фоне» и «Тропический лес на белом фоне» украшающих одну из створок шкафа из амбойны и красного дерева [20, 10]

К сожалению, продолжения и развития этого опыта не последовало. В 1894 году погибает Александр III, а фабрика, получив большие заказы, стала работать над крупными монолитами, выполняя рельефную резьбу.

Техника «русской мозаики», родившаяся на Урале, позволяла за счет подбора по рисунку камня в его тонких спилах создать впечатление, что изделие (обычно огромная ваза) выполнено из монолитного камня: например, малахита, лазурита, родонита и т.д. «Сложность мозаичной работы определялась «подбористостью» камней, т.е. их естественным рисунком. (Авт. - Такой прием) …возможен только при наличии большого количества материала и связан со значительным отходом камня при подгонке и обрезке пластинок». [19, с.208-209,] Именно потребность в близких рисунках приводила к необходимости пилить «фанеру» из одного куска камня максимально тонкой пилой на тонкие пластины: характер рисунка в другом куске мог быть совсем иным.

Все сказанное выше относится к особенностям изготовления мозаичных панно в Сибае. И здесь как раз раскрывается то условие, при котором возможно достижение высочайшего художественного, декоративного и технического уровня. Это наличие самоцвета – одного ведущего в работе, сохраняющего постоянство технических и декоративных свойств (полировка, устойчивость полировки и цвета к воздействию влаги, воздуха, прямого света), но обладающего огромным разнообразием цветов и рисунка. Яшма, которой в округе в изобилии, сама своими замысловатыми рисунками приглашала художников-камнерезов к сотрудничеству. (Рис. 18, 19 и 20)



Рис. 18. Панно «Оглядываясь назад в прошлое» (по мотивам картины Уильяма Арендта «Looking back on the bygone»), флорентийская (сибайская) мозаика, яшма. Ольга Половнева, «Девятов и К» (Сибай, Башкортостан)





Рис. 19 и 20. Флорентийская мозаика «Маки. В окна баньки с мотрят маки» и «Филин» (из собрания Музея истории Мироздания), яшма. Мастерская Стаса Ускова (Сибай)

Уфимская школа, так же последовавшая живописному руслу, в принципе близка «сибайской школе флорентийской мозаики». Однако дефицит сырья (разнообразия) в мастерских ощущается и выражается в ином выборе иллюстраций для воплощения в каменном полотне. В основном это картины, выполненные крупными мазками (мастерская «Уралташ-арт», Уфа), или монохромные, или из мелких деталей типа микромозаики, но более крупные по площади заполнения. Так, мастерская «Артель» первая стала воплощать в камне картины современных художников – мастеров лаковой миниатюры Холуя [1]. (Рис21, 22, 23 и 24)

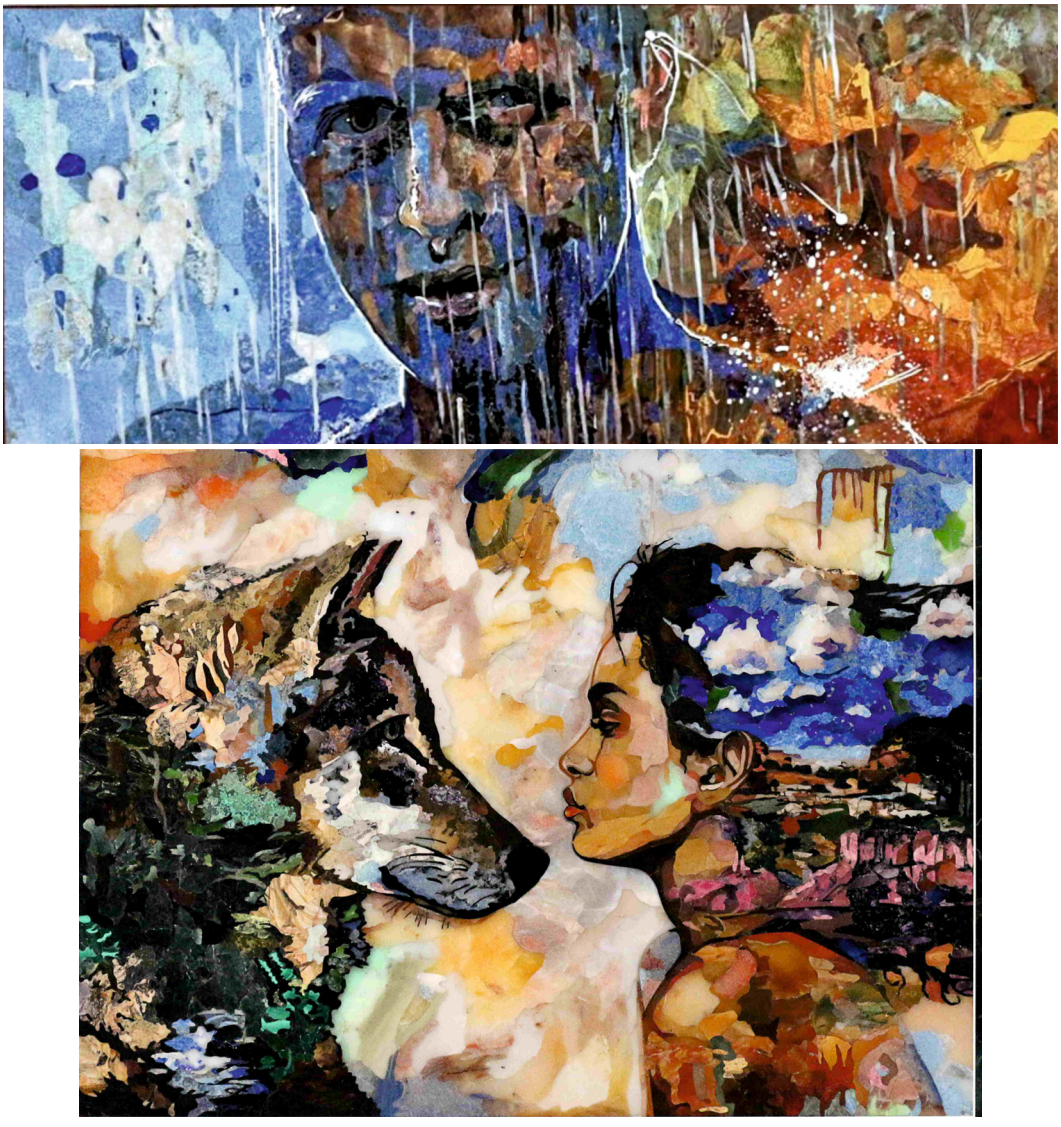


Рис. 21 и 22. Флорентийская мозаика «Бегущий по лезвию» («Blade Runner») и «Девушка и волк» (по мотивам картины Димитры Милан), яшма, кварц, содалит, виолан, дьюмортьерит, халцедон. (54х43х1 см). Мастерская «Уралташ-арт», Уфа (Фотоархив Любови Чебан)



Рис. 23. Флорентийская мозаика «Кюль-тегин», яшма, кремень. УПП НХП «Артель» (рук. Н. Н. Бадретдинов), Уфа, Сибай



Рис. 24. Панно «Сказка о потерянном времени» (поклон лаковой миниатюре Холуя), флорентийская мозаика, яшма. «Девятов и К» (Сибай, Башкортостан)

В отличие от условий изготовления царских подарков (шкафчиков), художникам-геологам Урала приходилось самостоятельно осваивать новое дело, создавать станки, экспериментировать с абразивными материалами, клеем и т.п. Сложность организации эффективной мастерской, создающей флорентийскую мозаику, можно понять по комментариям А.Е. Ферсмана: «Столешницы, главным образом мозаичные, являлись одним из главных изделий гранильных фабрик, особенно Петергофской. Кустари и даже крупные частные фирмы не могли заниматься их изготовлением». [19, с.236] На каждом этане создания башкирских мозаик требуются огромные усилия и мастерство: пополнение самоцветного материала, распиловка и сортировка фанеры, наличие которой должно быть в избытке; дешифрирование изображения как аэрофотоснимков, подбор камня и фрагмента в камне, выпиливание, подгонка и сборка, полировка готового панно.

Изготовление флорентийской мозаики в Сибае оказалось самым конкурентоспособным делом, но не легким. Для мастерской из провинциального геологического города «наработка» клиентуры была в разы сложнее, чем для столичных художников: арт-рынок не знал такого продукта, заказчиков не было. Выход был один –делать такие работы, которые самому мастеру доставляли удовольствие и удивление, а там, глядишь, удивятся и другие: мастер ориентировался на собственные вкус и предпочтения. Свой взор камнерезы обратили на живопись, причем пейзажную и жанровую живопись российских и западноевропейских мастеров, выполненных в реалистичной манере. [18] Пиетет к творчеству живописца и любовь к камню выражались в работах деликатным следованием кисти маэстро, качеством технического исполнения и стилем обрамления. Практически все работы эмоционально окрашены. Это обстоятельство как раз стало ключевым моментом, сформировавшим узнаваемый стиль художественных изделий сибайских мастерских. (Рис.25 и 26) Западноевропейские мозаики имеют чисто декоративный характер: орнаментальные темы с цветами, фруктами, птицами, лентами и т.д. Менее распространенные жанровые и пейзажные мозаики имеют достаточно условный, аппликативный характер.



Рис.25. Флорентийская мозаика по мотивам цифровой картины «Огненная лошадь» («Fire Horse»), яшма. Мастерская Стаса Ускова, Сибай



Рис.26. Флорентийская мозаика «Глухарь» (по картине Роберта Бейтмэна, Канада), яшма, виолан, родусит, лабрадор, смальт. Арт студия «Девятов и Ко», Сибай, 2021 г.

Достижение реалистичной манеры в работах сибайцев, излучающих эмоциональную энергию, не могло не привлечь внимание разного рода коллекционеров, что привело к появлению целых серий работ, например, «Индейцы», «Лошади», по картинам московского художника Андрея Шишкина и т.д., выполненных в разных мастерских. (Рис. 27)



Рис. 27. Флорентийская мозаика «Травник» (не законченная) по картине Андрея Шишкина (Москва), яшма, мрамор. Арт-студия «Девятов и Ко», Сибай (фото автора, экспедиция 2026 г.)

В заключении хочется привести слова Генерального комиссара русского отдела Колумбовой выставки (Чикаго, 1893 г.), директора Страсбургского художественного музея профессора А. Шриккера по поводу мозаик из шкафчиков Петергофской фабрики, проводя параллели с творчеством сибайских мастеров: «Эти три кабинетных мебели, со вставками из *pietra dura, представленные Императорской гранильной фабрикой в Петергофе, принадлежат к наиболее блестящим украшениям всей выставки во дворце мануфактур. Императорская мануфактура одна только в состоянии воспитывать и занимать мастеров, способных производить такие изделия искусства, которые стоят наряду с превосходными работами, удивляющими нас в Palazzo Pitti* или Ватикане. Чем ближе мы рассматриваем эту инкрустацию из камня посредством лупы, тем более возрастает наше изумление относительно того несказанного прилежания, с которым на пространстве какого-нибудь квадратного сантиметра произведены изящнейшие переходы цветов, посредством обделанного шлифовкой по прямым и кривым очертаниям натурального камня.» [10, С. 41]

Развитие сибайской школы флорентийской мозаики является достойным продолжением российской камнерезной школы, в которой сплетается опыт многих поколений зарубежных и отечественных художников по камню. В их работах звучит гимн богатству земных недр Урала, яшме – поясу славы России. Свобода в выборе сюжетов, тактичность работы как с авторским произведением, так и с камнем, транслирует дух зауральских степей, через которые проходило много народов, оставляя свой след в памятниках культуры, языке, традициях, менталитете. (Рис. 28 и 29)



Рис. 28. Фрагмент флорентийской мозаики «Боже, храни королеву» («God Save the Queen») по картине художника-сюрреалиста Михаила Хохлачёва (известного на Западе как Michael Cheval), лазурит, яшма, кахолонг и пр., ArtDePri, Сибай



Рис. 29. Флорентийская мозаика «Весна» (по картине Пьера Огюста Кота). 2010 г. Яшма, кахолонг. «Девятов и К», Сибай (Республика Башкортостан). Украдена в 2012 г.

Литература

1. Артель : Учебно-производственное предприятие народно-художественных промыслов / Каталог изделий. - Уфа, 2020. - 24 с.
2. Белицкая, Э.И. Художественная обработка цветного камня. - М.: Легкая промышленность, 1983. – 200 с.
3. Вазари Джорджо. Жизнеописание наиболее знаменитых живописцев, ваятелей и зодчих // Полное издание в одном томе. - М.: АЛЬФА-КНИГА, 2019 – 1278 с.
4. Владимир Зеленин Краски каменной палитры : Истрия флорентийской мозаики. – Издательские решения по лицензии Ridero, 2024 – 48 с.
5. Западноевропейская мозаика XIII-XIX веков в собрании Эрмитажа. – Л.,

«Советский художник»,1968, 112 с.

6. История города Сибай [электронный ресурс] URL: https://www.kupibilet.ru/gid/rossiia/sibai/istoriia

7. Камнерезное искусство современной России : каталог «Аукциона частных коллекций № 3». - М. : Аукционный дом «Александр», 2023. – 120с

8. Колисниченко С. В. Яшмовый пояс Южного Урала. Энциклопедия уральского камня. Минералы Южного Урала. Челябинск : Санарка, 2007. – 310 с.

9. Краснодеревщик Дассон Анри 1825-1896. [электронный ресурс] URL: https://galeriehassan.com/ru/художники/ краснодеревщик/дассон-анри

10. Мавродина Н.М. Искусство русских камнерезов XVIII–XIX веков. СПб. : Изд-во Гос. Эрмитажа, 2007. - 559 с.

11. Матюшин Г. Н. Яшмовый пояс Урала. - М., 1977. – 176 с.

12. Музей Флорентийской мозаики. Флоренция [электронный ресурс] URL: https://altravelstories.org/Regions/Europe/Italy/Florence/Pietre_Dure.html

13. Пахомова Ю. Башкирский Фаберже // Уфа. 2020. №7. Уфа : ИД «Уфа», 2020

14. Пахомова Ю., Кочергин А. В. Феномен башкирской школы флорентийской мозаики // Ювелирное обозрение. М., 2021. №2. – С. 24-31

15. Рукотворная связь времен Искусство ювелиров России XIX-XXI век. 2 часть. – Гохран РФ. М. 22

16. Сибай в Башкирии стал Всемирным ремесленным городом [электронный ресурс] URL: https://www.bashinform.ru/news/economy/2026-08-14/sibay-v-bashkirii-stal-vsemirnym-remeslennym-gorodom-4661403

17. Сибай признали Всемирным ремесленным городом [электронный ресурс] URL: https://haibvestnik.ru/news/novosti/2026-02-21/sibay-priznali-vsemirnym-remeslennym-gorodom-4588019 Новости 21 Февраля, 17:13

18. Тюльпакова О.Н. Драгоценное шитье из лоскутов яшмы : Интервью с Дамиром Девятовым (Сибай) / Журнал JEWEL&TRAVEL, № 2, 2011. М. – С. 52-55

19. Ферсман А. Е. Очерки по истории камня. М. : Из-во Академии наук СССР, 1961., Т.2. - 372 с.

20. Чистякова М.Б. Камнерезные изделия в коллекции минералогического музея им. А.Е. Ферсмана. М.,: Издательство «Майер», 2019. – 264 с

21. Шестой Всероссийский конкурс авторского ювелирного и камнерезного искусства в Калининграде «Кругосветное путешествие» 2023 : каталог выставки. 19.06 – 3.09.2023/ сост. и ред. Т.Ю. Макеева; Калининградский областной музей янтаря. – Калининград, 2024. – 296 с.

МУЗЕЙ И ЧАСТНЫЕ МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ КОЛЛЕКЦИИ. ВОЗМОЖНОСТИ ПРЕЗЕНТАЦИИ

Черненко В.В.[1,2] (*vicsgm07@gmail.com*)

[1] *ГГМ РАН,* [2] *РГГУ, г. Москва*

Аннотация: важным направлением выставочной деятельности является презентация в музее частных минералогических коллекций. «Выставка-презентация дара», зародившаяся в начале нового тысячелетия в ГГМ РАН, стала традиционной. Новой формой в практике музея стали научно-художественные выставки, созданные в сотрудничестве с компанией «Русские минералы».

Ключевые слова: *музей, минералогия, коллекционный минерал, выставка*

Формирование минералогического собрания Государственного геологического музея им. В.И. Вернадского РАН связано с именами известных коллекционеров прошлого и настоящего. Музей берет свое начало от «Минерального кабинета» Императорского Московского университета, учрежденного Высочайшим Указом 12 января 1755 г. В проекте об Учреждении Московского университета, подготовленном графом И.И. Шуваловым, было записано: «… Доктор и профессор натуральной истории должен на лекциях показывать разные роды минералов, трав и животных» [3].

14 марта 1755 г. в газете «Санктпетербургские ведомости» № 21 было опубликовано сообщение: «Минувшего февраля 17 дня [по старому стилю] от дворянина Никиты Акинфиевича Демидова (1724-1789) усерднейше подарена в Императорский Московский университет третья доля славного кабинета господина Генкеля, который состоит из наилучших минералов, многих курьозных вещей: окаменелых коралей и разных раковин…». Вскоре свои доли подарили университету и братья Прокофий (1710-1786) и Григорий (1715-1761). Бесценный дар — 6000 предметов, был доставлен в Москву в 1759 г. и был размещен в библиотеке университета [1]. История подаренного кабинета такова. Отец дарителей — Акинфий Никитич Демидов (1678-1745), в начале 1740-х гг. во время поездки по Саксонии купил во Фрайберге «минеральный кабинет», принадлежавший профессору Горной академии известному химику И.Ф. Генкелю (1679-1754), в лаборатории которого в 1739-1740 гг. изучал минералогию и горное дело М.В. Ломоносов (1711-1765). На Урале «минеральный кабинет» был значительно пополнен уральскими и сибирскими минералами и рудами.

1 декабря 1987 г. было опубликовано правительственное постановление «О 125-летии со дня рождения В.И. Вернадского». В него был включен специальный пункт об организации в здании на Моховой улице Государственного геологического музея имени В.И. Вернадского (ГГМ). Начался новый период в истории старейшего естественнонаучного музея Москвы. Знаменательным событием стало знакомство с музеем известного итальянского коллек-

ционера Примо Ровиса в 1997 г. Пораженный богатством минералогической части собрания он решил внести свой вклад в его расширение. В 2000 г. Примо Ровис провел в Милане большую выставку «Искусство Бога», на которой были представлены наиболее интересные образцы из его коллекции. Часть этих образцов коллекционер передал в дар нашему музею. 12 января 2002 г. состоялось открытие выставки ***«Творения Природы»*** *— выставки-презентации дара*, положившей начало новому выставочному формату, сохранившемуся в музее до сегодняшнего дня [4].

24 октября 2011 г. собрание музея пополнилось замечательной коллекцией минералов, окаменелостей и произведений камнерезного искусства, переданной в дар Сергеем Михайловичем Мироновым — руководителем фракции «Справедливая Россия». Образцы, собранные во время экспедиций, составляют существенную часть его коллекции, которая насчитывает более 1500 образцов. Минералогическая коллекция С.М. Миронова отражает его приверженность к красоте природных минералогических образований во всем их многообразии. Каждый образец в ней достоин пристального внимания. Этому во многом способствует и принципиальный подход автора — собирать образцы по возможности крупные, чтобы любоваться ими можно было без очков. Большая часть коллекции размещена в отдельном зале и органично вписалась в экспозицию музея [2].

Летом 2021 г. собрание музея пополнилось еще одной замечательной коллекцией минералов, насчитывающей около 2,5 тысяч предметов, собранной в разных уголках Советского Союза — Кавказ, Подмосковье, Чукотка, Камчатка, Киргизия, Таджикистан, Забайкалье, Узбекистан, Кольский, Урал почти за 25 лет экспедиционных работ, Михаилом Михайловичем Страшновым. Профессиональную деятельность полевого геолога он успешно совмещал с собирательством минералов, используя любую возможность поехать за коллекционными минералами. В 1989 г. его экспедиционная деятельность закончилась, и он занялся обработкой собранного материала для последующей передачи в музей. Выставка ***«Путь к познанию камня»***, открывшаяся 14 апреля 2022 г., знакомит лишь в небольшой частью его коллекции.

Организованные в разные годы «выставки-презентации дара» отличаются продолжительностью экспонирования, концептуальным и дизайнерским решением, но они образуют самостоятельное направление выставочной деятельности музея, которое сегодня активно развивается в музеях художественного профиля.

Главная особенность минералогических образцов — их красота при очень большом многообразии. Минералы в их естественном виде, поражающие разнообразием кристаллических форм и агрегатов и представляющие несомненный научный интерес, обладают особой художественной ценностью. Новым в практике музея стали научно-художественные выставки, созданные в сотрудничестве с компанией «Русские минералы», на протяжении многих лет профессионально занимающейся добычей, обработкой и продажей коллекци-

онных минералов. 18 декабря 2022 г. открылась выставка ***«Минерал. Два взгляда»***. На выставке были представлены уникальные коллекционные минералы и их художественные фотографии, созданные Владиславом Дятловым. Фотографии минералов, включенные в выставку, отличала одна особенность — непреходящая способность автора удивляться созданному Природой совершенству кристаллов и друз минералов, соединенная со стремлением донести это восторженное удивление до зрителя [5].

22 декабря 2025 г. состоялось презентация нового совместного проекта — выставки ***«Минерал и коллекционер. Единство непохожих»***. Впервые в России посетители музея получили уникальную возможность увидеть образцы коллекционных минералов мирового уровня из частных коллекций, не имеющих публичного доступа. В выставке приняли участие десять ведущих отечественных коллекционеров, для которых коллекционирование перешло в разряд жизненных интересов. Экспонирующиеся на выставке уникальные образцы, добыты на всемирно известных месторождениях России, Казахстана, Украины и Австралии, прославившихся превосходными образцами коллекционных минералов, хранящихся в крупнейших музеях и частных коллекциях мира.

Новые возможности для модернизации существующей экспозиции предоставляет включение тематических мини-выставок, подготовленных на основе частных коллекций. Таким проектом стала мини-выставка «Замечательные минералы Донбасса», появившаяся 1 июня 2026 г. в разделе «Мир минералов», представляющая коллекционные минералы региона из коллекции Михаила Маратовича Битмана.

Список литературы:

1. Бессуднова З.А. Геологические исследования в Музее естественной истории Московского университета. 1759 – 1930. М.: Наука, 2006 – С. 19.
2. Лейбов М.Б. Новые поступления в ГГМ им. Вернадского: коллекция С.М. Миронова//В мире минералов. Минералогический альманах, том 17, вып. 1, 2012 – С. 79-83.
3. Московский университет в воспоминаниях современников (1755 – 1917): Сборник //Сост. Ю.Н. Емельянов. – М.: Современник, 1989 – С. 32.
4. Черненко В.В. Из опыта создания выставок. // Наука и просвещение: к 250-летию Геологического музея РАН. М.: Наука, 2009 – С.79-80.
5. Черненко В.В. Выставка «Минерал. Два взгляда» // В мире минералов. Минералогический альманах, том 28, вып. 2, 2023 – С. 63-63.