

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ МУЗЕЙ ИМ. А.Е.ФЕРСМАНА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

УДК 549.1, 549.2, 553.6, 553.8, 553.2
№ госрегистрации 122012400313-9
Код темы FMGM-2019-0003

УТВЕРЖДАЮ

Директор Минмузея РАН

П.Ю. Плечов

«28» декабря 2021 г.



ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по программе ФНИ государственных академий наук на 2013–2020 годы пункт 125:

Фундаментальные проблемы развития литогенетических, магматических,
метаморфических и минералообразующих систем, а также пункт 130:

Рудообразующие процессы, их эволюция в истории Земли, металлогенетические эпохи
и провинции и их связь с развитием литосферы. Условия образования и
закономерности размещения полезных ископаемых

по теме:

РАЗНООБРАЗИЕ МИНЕРАЛОВ И ИХ ПАРАГЕНЕЗИСОВ: НОВЫЕ ДАННЫЕ,
РАЗВИТИЕ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ

(заключительный)

Руководитель темы
доктор геол.-мин. наук,
профессор РАН

28.12.21 П.Ю. Плечов
подпись, дата

Москва 2021

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ МУЗЕЙ ИМ. А.Е.ФЕРСМАНА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

УДК 549.1, 549.2, 553.6, 553.8, 553.2
№ госрегистрации 122012400313-9
Код темы FMGM-2019-0003

УТВЕРЖДАЮ

Директор Минмузея РАН

П.Ю. Плечов

«28» декабря 2021 г.



ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по программе ФНИ государственных академий наук на 2013–2020 годы пункт 125:

Фундаментальные проблемы развития литогенетических, магматических,
метаморфических и минералообразующих систем, а также пункт 130:

Рудообразующие процессы, их эволюция в истории Земли, металлогенические эпохи
и провинции и их связь с развитием литосферы. Условия образования и
закономерности размещения полезных ископаемых

по теме:

РАЗНООБРАЗИЕ МИНЕРАЛОВ И ИХ ПАРАГЕНЕЗИСОВ: НОВЫЕ ДАННЫЕ,
РАЗВИТИЕ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ

(промежуточный)

Руководитель темы
доктор геол.-мин. наук,
профессор РАН

28.12.21 П.Ю. Плечов
подпись, дата

Москва 2021

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы
д.г.-м.н., профессор РАН



28.12.21 П.Ю. Плечов (разделы 2–4)

подпись, дата

Исполнители темы

Зам. директора
к.г.-м.н.



28.12.21

А.А. Агаханов (разделы 1, 2, 5)

подпись, дата

Научн. рук. музея
д.г.-м.н., профессор

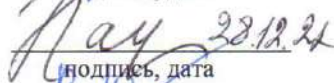


28.12.21

В.К. Гаранин (раздел 2.3)

подпись, дата

Зав. сектором ст. н.сотр.

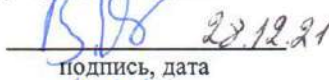


28.12.21

Л.А. Паутов (разделы 1, 2, 5)

подпись, дата

Ст. науч. сотр. к.г.-м.н.

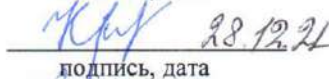


28.12.21

В.Ю. Карпенко (разделы 1, 2, 5)

подпись, дата

Вед. науч. сотр. д.г.-м.н.

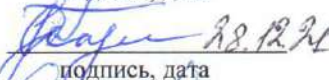


28.12.21

К.Д. Литасов (раздел 2)

подпись, дата

Вед. науч. сотр. д.г.-м.н.

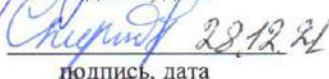


28.12.21

И.Н. Биндеман (разделы 3, 4)

подпись, дата

Вед. науч. сотр. д.г.-м.н.

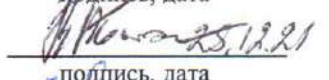


28.12.21

Э.М. Спиридонов (разделы 1–3)

подпись, дата

Вед. науч. сотр. к.г.-м.н.

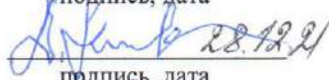


25.12.21

В.С. Каменецкий (разделы 3, 4)

подпись, дата

Инженер-исследователь

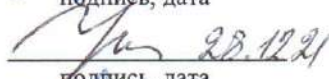


28.12.21

А.В. Касаткин (разделы 1, 2)

подпись, дата

Ст. науч. сотр. к.г.-м.н.

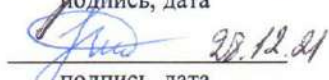


28.12.21

Ю.Д. Гриценко (разделы 1, 2)

подпись, дата

Ст. науч. сотр. к.г.-м.н.



28.12.21

Н.А. Некрылов (разделы 3, 4)

подпись, дата

РЕФЕРАТ

Отчет 93 с., 56 рисунков, 6 таблиц, 100 источников, 1 приложение
МИНЕРАЛЫ, ФИЗИКА МИНЕРАЛОВ, НОВЫЕ МИНЕРАЛЫ, ПОРОДООБРАЗУЮЩИЕ
МИНЕРАЛЫ, РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ,
МИКРОЗОНДОВЫЙ АНАЛИЗ, ПРИКЛАДНАЯ МИНЕРАЛОГИЯ, МИНЕРАЛОГИЯ
ТЕХНОГЕНЕЗА, ВКЛЮЧЕНИЯ В МИНЕРАЛАХ

Объектом исследования являются образцы различных месторождений мира из уникальных фондов Минмузея РАН, а также из собственных полевых сборов музея.

Цель работы – получение новых данных о свойствах, генезисе минералов и их парагенезисах, новых фундаментальных знаний о минералах, минерало- и рудообразовании, открытие и детальное изучение новых минералов; данных о закономерностях размещения минералогических объектов, полезных ископаемых, прогнозы по их поиску и рекомендации по возможному практическому применению новых и редких минералов, созданию новых материалов для высокотехнологичного производства, в ряде случаев – извлечению полезных компонентов; развитие локальных методов исследования минералов, укрепление лидирующих позиций России в минералогии.

В процессе работы проводились комплексные исследования, начиная с полевых описаний минералов и пород, приготовления препаратов и заканчивая прецизионным анализом с применением индивидуальных наборов постоянно совершенствуемых методик.

В результате работ за **2019–2021 год был открыт 61 новый минерал**, выявлены новые свойства уже известных минеральных видов. Получен значительный массив данных по составу, свойствам, структуре и ассоциациям изученных минералов, новым парагенезисам. Итогом исследований было пополнение фундаментального научного знания в первую очередь минералогии, кристаллографии и геохимии, вклад в понимание минералообразования и других связанных с ним геологических процессов.

Прикладные результаты: определение критериев поиска минерального, в том числе рудного, вещества, степени значимости месторождений; рекомендации по использованию минерального вещества, извлечению полезных компонентов, созданию новых материалов; пополнение международных баз данных по минералам, электронной базы данных MINSPEC v.3.3 по минералам, их свойствам и их генезису, банка эталонов для микрозондового анализа и картотеки эталонных дебаеграмм, общедоступных картотек исследований, месторождений и местонахождений минералов, созданных в Минмузее РАН.

По результатам работ за три года было опубликовано более 160 статей. Полученные данные НИР в виде устных докладов и тезисов были представлены на конференциях.

СОДЕРЖАНИЕ

Обозначения и сокращения	6
Введение	7
1 Новые минералы	10
2 Минералогия природных объектов	27
2.1 Новые данные по минералогии фумарол вулкана Толбачик (Камчатка, Россия)	27
2.2 Новые данные по минералогии псевдофумарольных возгонов подземных пожаров Фан-Ягнобского угольного месторождения (Центральный Таджикистан)	29
2.3 Новые данные по минералогии кимберлитов	34
2.3.1 Новые данные по минералогии алмаза из месторождений трубок Нюрбинская, Ботуобинская (Накынское кимберлитовое поле, Средне-Мархинский район, Якутия)	35
2.3.2 Сравнительный анализ алмазов трубок Нюрбинская, Айхал (Якутия) и Архангельская (Архангельская область) по данным ЭПР-спектроскопии	41
2.4 Новые данные по минералогии редкометальных гранитных пегматитов	47
2.5 Новые данные по минералогии щелочных массивов	49
2.6 Новые данные по минералогии рудных месторождений	50
2.6.1 Новые данные по минералогии Воронцовского золоторудного месторождения (Северный Урал)	50
2.6.2 Новые данные о россыпных минералах элементов платиновой группы	51
2.6.3 Новые данные о минералах месторождения Блява, Южный Урал, Россия	53
2.6.4 Новые данные о минералах марганцеворудного поля Калахари, ЮАР	57
2.6.5 Новые данные по минералогии других рудных объектов	61
2.7 Новые данные по цирконометрии магматических пород Большого Кавказа	61
2.8 Новые данные по минералогии метеоритов	64
3 Изучение вариаций химического состава и генезиса породообразующих минералов	68
4 Расплавные и флюидные включения в минералах	69
5 Совершенствование аналитических методик	70
Заключение	73
Список использованных источников	77
Приложение. Список публикаций по теме за 2021 год	88

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ААП – Архангельская алмазоносная провинция

БТТИ – Большое трещинное Толбачинское извержение

Влк. – вулкан

ГБАО – Горно-Бадахшанская автономная область

КР – комбинационное рассеяние света

МПГ – металлы платиновой группы

Тр. – трубка (кимберлитовая)

ЯАП – Якутская алмазоносная провинция

BSE – Back Scattered Electrons (обратно рассеянные, или отраженные, электроны), режим съемки на сканирующем электронном микроскопе

SEI – Secondary Electrons Image (изображение во вторичных электронах), получаемое на сканирующем электронном микроскопе

Наименования величин приведены в соответствии с Международной системой единиц СИ

ВВЕДЕНИЕ

Целью текущей научно-исследовательской работы явилось получение новых данных о свойствах и генезисе минералов и особенностях их парагенезисов в различных месторождениях и рудопроявлениях как России, так и других регионов мира, изучение минерального разнообразия, открытие и детальная характеристика новых минералов, определение условий образования минерального вещества и закономерностей размещения минералогических объектов, месторождений и проявлений полезных ископаемых, прогнозы по их поиску и рекомендации по возможному практическому использованию новых и редких минералов, созданию новых материалов для высокотехнологичного производства, в ряде случаев – по извлечению полезных компонентов. Объектами НИР были образцы из уникальных фондов Минмузея РАН из различных месторождений мира, а также материал собственных полевых сборов сотрудников музея в основном прошлых лет и в меньшей степени 2021 года. Исследования велись для получения фундаментальных научных знаний о минералах и их парагенезисах – расширения представлений о минеральном царстве. Также внимание уделялось изучению минералогии, генезиса уникальных месторождений, действующих или потенциальных, рудопроявлений, с прицелом на задачи поиска и разработки.

Основная часть исследований проведена на базе лаборатории Минмузея РАН. Это макроскопические описания образцов, определение вещественного состава образцов, размеров зерен, их морфологии под микроскопом; определение морфологии кристаллов на оптических гониометрах, измерение кристаллооптических характеристик минералов в иммерсии и в шлифах; оптическая минералогия рудных минералов, измерение микротвердости и ее анизотропии; определение плотности минералов в тяжелых жидкостях; съемка порошкограмм на рентгеновских дифрактометрах с их идентификацией; получение спектров минералов в ИК- УФ- и видимой области; микронзондовое определение состава минералов, исследования методами атомно-адсорбционной спектроскопии и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС), термобарометрии, катодо- и фотолюминесценции, электронного парамагнитного резонанса.

1 Изучение минерального разнообразия велось на материале объектов различного генетического типа. По изучению ряда из них накоплен большой международно признанный научный опыт, в том числе методологический, что стимулирует активное сотрудничество с российскими и зарубежными учеными и расширяет географию новых минералов, открытых исследователями Минмузея РАН и с их участием. В 2021 году было открыто и изучено 17 новых, ранее в природе не известных, минеральных видов. **За отчетный период 2019–2021 годов число открытых новых минералов составило 61** (по годам: 24 + 20 + 17). Это

главное достижение научно-исследовательской работы по теме. Почти все образцы открытых минераловполнили коллекцию музея.

2 Систематически изучался ряд уникальных минералогических объектов России и зарубежья.

2.1 Одним из наиболее ярких и плодотворных объектов исследования мирового значения был регион **активных фумарольных полей вулкана Толбачик на Камчатке** – уникальный источник как новых данных о современном минералообразовании, так и новых и редких минералов. Особенное внимание было уделено возгонам **фумаролы Арсенатной 2-го шлакового конуса северного прорыва БТТИ (Толбачинский дол).**

2.2 Продолжалось изучение **возгонов природных подземных пожаров на Фан-Ягнобском угольном месторождении (Ц. Таджикистан),** классической и уникальной естественной лаборатории, постоянно продуцирующей минеральное вещество.

2.3 Были продолжены работы по комплексному изучению **минералогии кимберлитовых месторождений Архангельской и Якутской алмазоносных провинций** и обобщению данных. Главными задачами в 2021 году было исследование алмазов действующих месторождений трубок Нюрбинская, Ботуобинская ЯАП (Накынское кимберлитовое поле) и сравнительный анализ алмазов трубок Нюрбинская, Айхал (ЯАП) и Архангельская (ААП) по данным ЭПР-спектроскопии.

2.4 Систематически изучалась **минералогия редкометальных гранитных пегматитов Восточного и Юго-Западного Памира (Таджикистан) и Туркестанского хребта (Киргизия).**

2.5 Продолжались **исследования минералогии щелочных массивов:** анализ и обобщение данных по редкоземельной минерализации **месторождения Мочалин Лог (Вишневые горы, Южный Урал)** с ее необычной лантановой специализацией, щелочного массива **Дарай-Пиёз (Алайский хр., Таджикистан)** с редкой цезиевой минерализацией, классических **Ковдорского и Ловозерского массивов** и щелочно-ультраосновного массива **Вуориярви (Кольский п-ов, Россия),** а также щелочно-ультраосновного массива **Одихинча (Красноярский край, Россия).**

2.6 В сфере изучения сотрудников музея находился целый ряд рудных объектов. В первую очередь **Воронцовское золоторудное месторождение (Северный Урал),** отличающееся уникальной таллиевой минерализацией и разнообразием минералов, объект мирового класса, данные по которому продолжали пополняться и систематизироваться.

Исследовались **минералы элементов платиновой группы из россыпей,** в том числе в 2021 году впервые – из **объектов Памира (Гишун и Сангвор, ГБАО, Таджикистан);**

изучалась методика проалки для выделения минералов платиновой группы из шлихов и протолочек.

В отчетном году также проводилось физико-химическое исследование алюинокопиапита с **месторождения Блява (Южный Урал, Россия)** с целью определения термодинамических констант, важных для моделирования процессов минералообразования.

Исследовалось термическое поведение этрингита с **марганцеворудного поля Калахари (ЮАР)**, дегидроксилизация которого, несмотря на полувековые исследования, не получила однозначной трактовки.

В 2019–2021 годах изучались минеральные образцы Главного Сарановского месторождения хромитов, Баженовского месторождения асбеста, золотоносных россыпей Южного Урала и платиноносной – Гальмознанского массива Корякского нагорья, Озерновского золоторудного месторождения (Камчатка), Дашкесанского месторождения (Азербайджан), месторождения гуано близ селения Чанабая (Чили), месторождения Лонгбан (Швеция) и др. объектов.

2.7 Продолжались и систематизировались результаты работы **в регионе Большого Кавказа по цирконометрии** магматических пород для установления возраста основных геологических событий и совершенствования самой методики.

2.8 Продолжено **изучение метеоритного вещества**, возобновленное в 2018 году после значительного перерыва.

3 В рамках систематических работ по изучению **вариаций состава порообразующих минералов** изучались минералы надгруппы эпидота из пород различных формаций; групп мелилита и монтichelлита, оливин скарнов и кальцифиров с перспективой использования полученных данных для выводов о процессах минерало- и порообразования.

4 Продолжены работы по актуальной постоянной теме изучения **расплавных и флюидных включений в порообразующих минералах**: в плагиоклазе, клино- и ортопироксене из андезитов влк. Карадаг (Крым), в оливине из базальтов Карымского вулканического центра и Камчатского мыса (Камчатка), в кварце из риолита влк. Базман (Иран) с целью установления условий формирования пород, в том числе рудоносных.

5 В процессе выполнения исследований минералов систематически развивались методы работы и **совершенствовались аналитические методики**.

1 Новые минералы

Одним из важнейших направлений Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана является **изучение минералогического многообразия**. За 2021 год с участием сотрудников Минералогического музея было открыто и утверждено Комиссией по новым минералам и названиям минералов Российского минералогического общества и Комиссией по новым минералам, номенклатуре и классификации (КНМНК – CNMNC) Международного минералогического общества (ММА – IMA) 17 новых минералов. В отчетном периоде 2019–2021 годов общее **число открытых минеральных видов – 61** [1–4], что больше, чем в любой другой научной организации мира. Каждый новый открытый минеральный вид пополняет фундаментальную науку, проливает свет на природные процессы, дает инструменты для поиска полезных ископаемых, создания новейших материалов, свидетельствует о высочайшем мировом уровне исследований.

В данном разделе приведены краткие сведения о **17 новых минералах**, открытых с участием сотрудников Музея и утвержденных комиссией по новым минералам Международной минералогической ассоциации (IMA CNMNC) в 2021 году или в конце 2020 года (если последние не попали в отчетные материалы [2, 4]). Это следующие минеральные виды: гидроксилбастнезит-(La), карлдитмарит, паульгротит, мильковоит, штойделит, обервольфахит, рябчиковит, кальциохатертит, эрссонит, сапожниковит, голдхиллит, бетцит, казнахтит, озерновскит, резницкиит, паратоберморит, гуржиит.

Название минерала приводится в английском и русском написании. После названия минерала дан официальный номер, присваиваемый Комиссией. Также приводится регистрационный номер для авторских образцов, переданных в коллекцию музея. В списке авторов курсивом *выделены сотрудники Минмузея РАН*.

Силикаты и алюмосиликаты:

Рябчиковит. Ryabchikovite IMA 2021-011. $\text{CuMgSi}_2\text{O}_6$.

Обнаружен среди возгонов фумаролы Арсенатная ($T \sim 400^\circ\text{C}$), 2-й шлаковый конус северного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения, Толбачинский дол, Камчатка. Рябчиковит образует тонкие светло-коричневые до красновато-коричневых эпитаКСические обрастания на короткопризматических кристаллах диопсида (рис. 1.1). Ассоциирующие минералы: диопсид, гематит, купрошпинель, фторфлогопит, ангидрит, йохиллерит, тилазит, сульфаты группы афтиталита, сингенит, гидроглауберит. Минерал принадлежит группе моноклинных пироксенов (Cu-Mg структурный аналог клиноэнстатита). Моноклинный, пр.гр. $P2_1/b$. Параметры элементарной ячейки: $a = 9.731(9) \text{ \AA}$, $b = 8.929(8) \text{ \AA}$, $c = 5.221(4) \text{ \AA}$, $\beta = 110.00(6)^\circ$, $V = 426.28 \text{ \AA}^3$, $Z = 2$. Назван в честь

выдающегося российского геохимика и петролога профессора, академика Российской академии наук Игоря Дмитриевича Рябчикова (1937–2017). Авторский материал хранится в Минералогическом музее им. А.Е. Ферсмана РАН, образец FMM_1_97512 (рег. № 5642/1).

Авторы: Щипалкина Н.В., Верещагин О.С., Пеков И.В., Балаковский Д.И., Кошлякова Н.Н., Шиловских В.В., Панкин Д.В., Бритвин С.Н., Сандалов Ф.Д., Сидоров Е.Г.

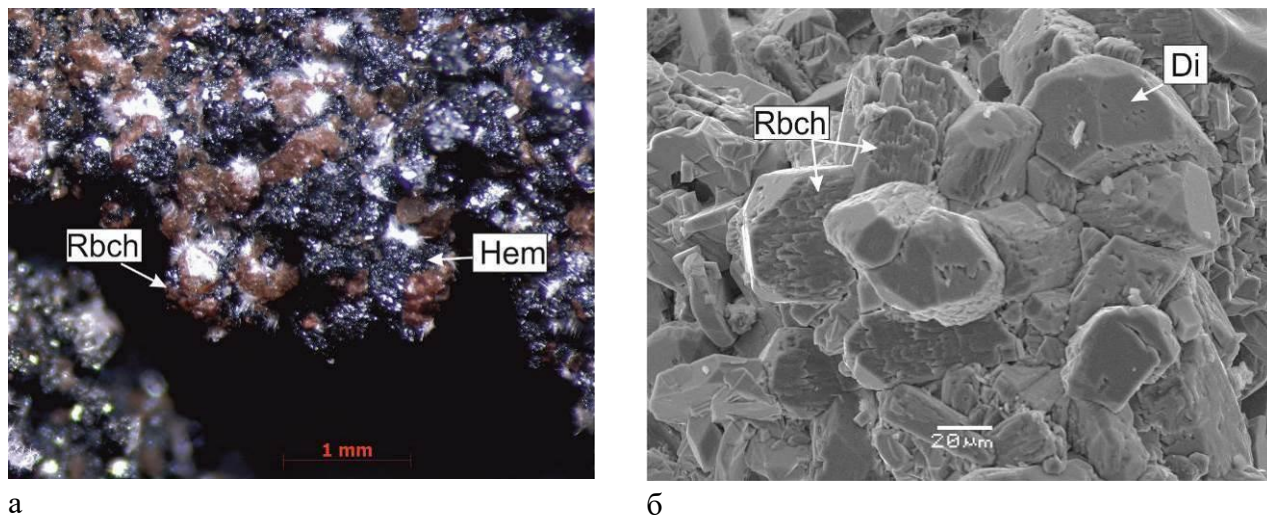


Рисунок 1.1 – Кристаллы диопсида, покрытые эпитаксическими корочками коричневатого рябчиковита (Rbch) с гематитом (Hem) и игольчатым вторичным белым гидроглауберитом (а); друза кристаллов диопсида (Di) с корочками рябчиковита, фото в режиме SEI (б)

Штойделит. Steudelite. IMA 21-007. $\text{Na}_3(\text{K}_{17}\text{Ca}_7)\text{Ca}_4(\text{Al}_{24}\text{Si}_{24}\text{O}_{96})(\text{SO}_3)_6\text{F}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ [5].

Обнаружен в сиенитовом ксенолите палеовулкана Sacrofano, район Latium, Италия. Минерал образует бесцветные, толстотаблитчатые или призматические кристаллы до 7 мм (рис. 1.2). Ассоциирующие минералы: санидин, диопсид, андрадит, биотит, лейцит, гаюин, сакрофанит, бячелаит, лиоттит и вторичные смектиты. Принадлежит группе канкринита. Гексагональный, пр.гр. $P6_2c$. Параметры элементарной ячейки: $a = 12.8953(1) \text{ \AA}$, $c = 21.2778(3) \text{ \AA}$, $V = 3064.22 \text{ \AA}^3$, $Z = 1$. Назван в честь выдающегося немецкого химика, специалиста по химии серы профессора Ральфа Штойделя, Ralf Steudel (1937–2021). Основу кристаллической структуры штойделита (рис. 1.3) составляет алюмокремнекислородный каркас афганитового типа с колонками канкринитовых ячеек и изолированными ячейками канкринитового и лиоттитового типа. Группы SO_3^{2-} и SO_4^{2-} принадлежат лиоттитовым ячейкам и локализованы в двух кристаллографических позициях. Авторский материал хранится в Минералогическом музее им. А.Е. Ферсмана РАН, образец FMM_1_97517 (рег. № 5665/1).

Авторы: Чуканов Н.В., Зубкова Н.В., Варламов Д.А., Пеков И.В., Балаковский Д.И., Бритвин С.Н., Ермолаева В.Н., Возчикова С.А., Пуцаровский Д.Ю.

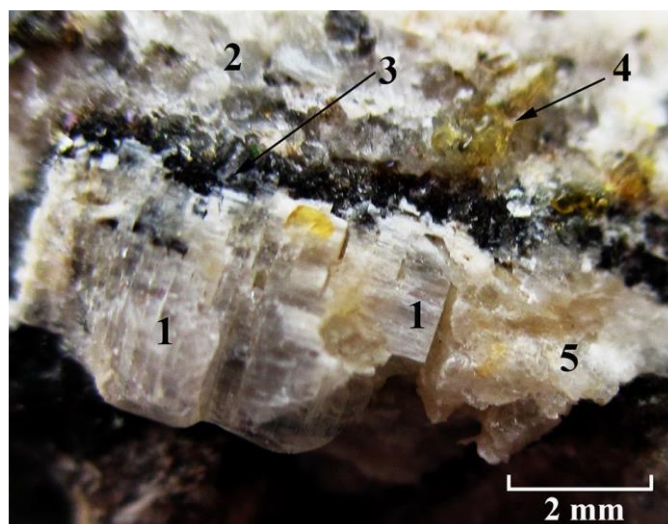


Рисунок 1.2 – Сколотые по спайности $\{001\}$ кристаллы штойделита (1) с санидином (2), биотитом (3), андрадитом (4), бьячелаитом (5)

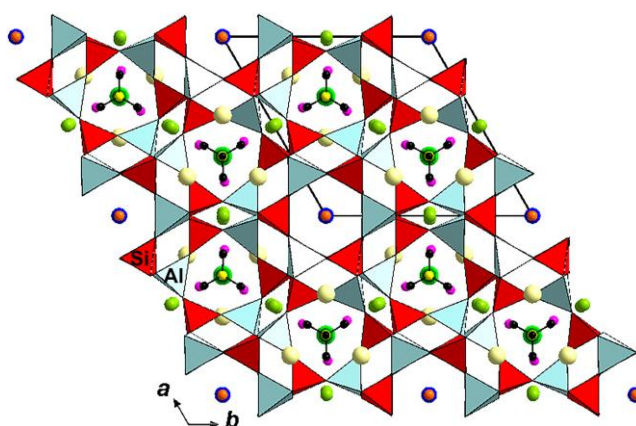


Рисунок 1.3 – Кристаллическая структура штойделита (проекция перпендикулярно оси c). S- и O-атомы сульфатных и сульфитных групп показаны как желтые и черные шарики соответственно. Са, Na –зеленые. Тетраэдры Si и Al – красные и бледно-голубые соответственно

Сапожниковит. Sapozhnikovite. IMA 21-030. $\text{Na}_8(\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24})(\text{HS})_2$.

Обнаружен в уртитоподобной породе на горе Карнасурт, Ловозерский массив, Кольский п-ов, Россия. Образует бесцветные или бледно-серые со стекляннным блеском изометричные ксеноморфные зерна размером обычно около 1 мм, редко до 5 мм (рис. 1.4). Формировался на поздних стадиях магматического процесса, ассоциирует с нефелином, эгирином, калиевым полевым шпатом, альбитом, кианоксалитом, натролитом, фторапатитом, фторкафитом, ломоносовитом и лопаритом-(Ce). Принадлежит группе содалита. Кубический, пр.гр. $P43n$, $a = 8.91462(7) \text{ \AA}$, $V = 708.45 \text{ \AA}^3$. Назван в честь выдающегося российского минералога и кристаллографа Анатолия Николаевича Сапожникова (1946 г.р.), сделавшего большой вклад в минералогию и кристаллографию минералов группы содалита–лазурита. Сапожниковит изоструктурен содалиту и близким соединениям, имеющим в основе структуры каркас с тремя чередующимися типами слоев Al- и Si-центрированных

тетраэдров *A*, *B* и *C* с последовательностью чередования $(ABC)_\infty$ (рис. 1.5). Слои образованы упорядоченными определенным образом шестичленными кольцами Si–Al–O-тетраэдров. Авторский материал хранится в Минералогическом музее им. А.Е. Ферсмана РАН, образец FMM_1_97521 (рег. № 5693/1).

Авторы: Чуканов Н.В., Зубкова Н.В., Пеков И.В., Шендрик Р.Ю., Варламов Д.А., Вигасина М.Ф., Белаковский Д.И., Бритвин С.Н., Япаскурт В.О., Пушаровский Д.Ю.

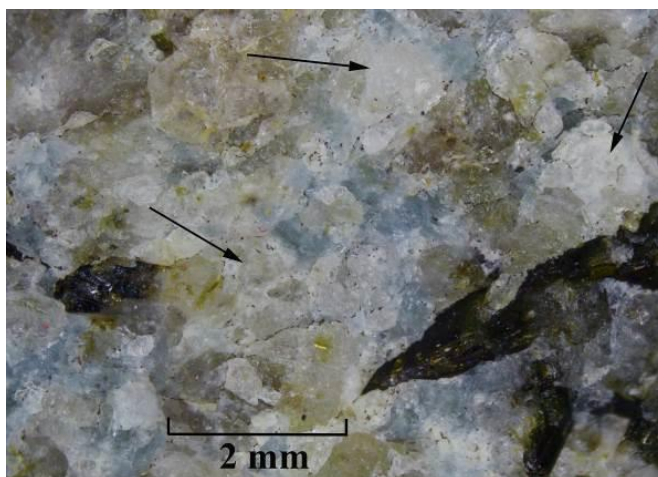


Рисунок 1.4 – Зерна сапожниковита (указаны стрелками) с бледно-зеленовато-серым нефелином, голубоватым кианоксалитом и черным эгирином

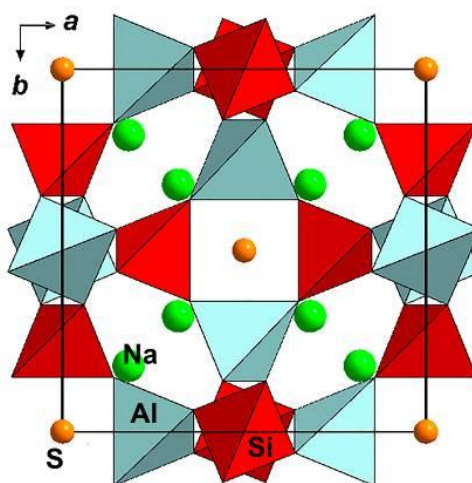


Рисунок 1.5 – Проекция кристаллической структуры сапожниковита (атомы водорода не обозначены)

Бетцит. *Betzite*. IMA 21-037. $\text{Na}_6\text{Ca}_2(\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24})\text{Cl}_4$.

Обнаружен в ксенолите в щелочном базальте палеовулкана Bellerberg между Майеном и поселением Коттенхайм, Лаахер-Зее (Laacher See), Восточный Эйфель, земля Рейнланд-Пфальц, Германия. Образует бесцветные со стеклянным блеском гексагональные призматические кристаллы размером до 2 x 0.5 мм с заметной спайностью по $\{100\}$ и отдельностью по $\{001\}$ (рис. 1.6). Является продуктом пирометаморфизма, ассоциирует с анортитом, флогопитом, диопсидом, гроссуляром, флюоритом, кальцитом,

тоберморитоподобными фазами. Гексагональный, пр.гр. $R\bar{6}_3$, параметры ячейки: $a = 12.8166(9) \text{ \AA}$, $c = 5.3562(3) \text{ \AA}$, $V = 761.96 \text{ \AA}^3$, $Z = 1$. Назван в честь немецкого минералога-любителя, коллекционера минералов Волькера Бетца, Volker Betz (1947 г.р.), автора многочисленных публикаций в популярных немецких минералогических журналах. Кристаллическая структура бетцита (рис. 1.7) представляет собой канкринитового типа каркас Si–Al–O-тетраэдров с двумя типами каналов вдоль [001]. Авторский материал хранится в Минералогическом музее им. А.Е. Ферсмана РАН, образец FMM_1_97677 (рег. № 5706/1).

Авторы: Чуканов Н.В., Зубкова Н.В., Казева О.Н., Варламов Д.А., Пеков И.В., Белаковский Д.И., Ternes V., Schüller W., Бритвин С.Н., Пущаровский Д.Ю.



Рисунок 1.6 – Кристаллы бетцита в ассоциации с анортитом, ширина поля зрения 1.4 мм

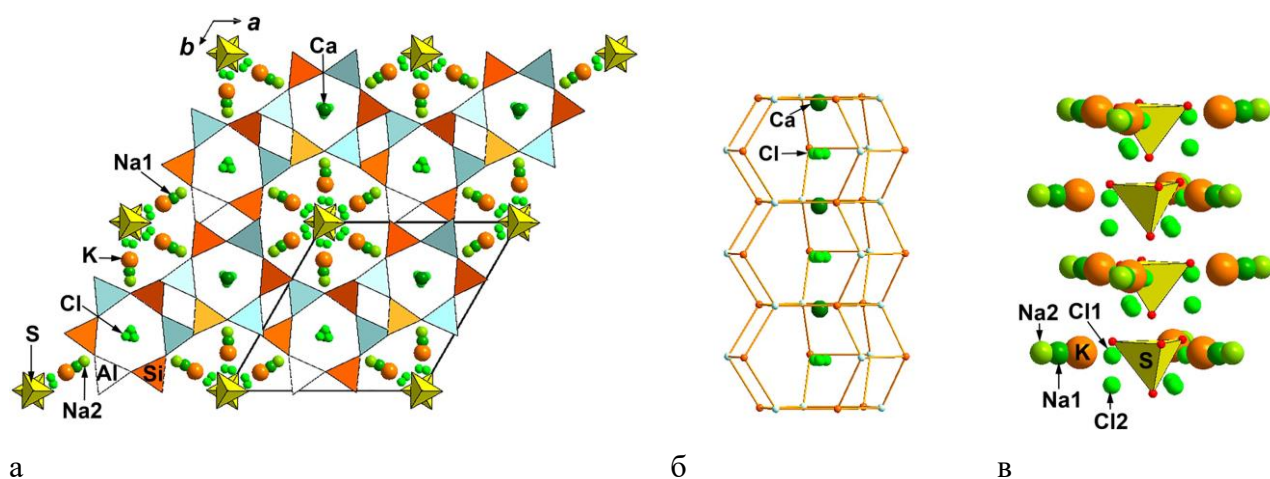


Рисунок 1.7 – Проекция кристаллической структуры бетцита перпендикулярно оси c (а); заполнение узких каналов в каркасе вдоль [001] (б), заполнение широких каналов каркаса (в)

Паратоберморит. Paratobermorite. IMA 2020-100. $\text{Ca}_4(\text{Al}_{0.5}\text{Si}_{0.5})_2\text{Si}_4\text{O}_{16}(\text{OH})(\text{H}_2\text{O})_2 \cdot (\text{Ca} \cdot 3\text{H}_2\text{O})$.

Обнаружен в карьере Баженовского м-ния асбеста, г. Асбест, Средний Урал, Россия, в трещинах и полостях гроссулярового родингита. Образует бесцветные, бледно-желтые, бледно-бежевые, иногда розоватые призматические до игольчатых кристаллы, вытянутые вдоль [010], размером до 8 мм × 1.5 мм × 1 мм, обычно собранные в ажурные агрегаты или радиальные пучки (рис. 1.8). Образовался в результате родингитизации габброидных даек, секущих серпентиниты, ассоциирует с гроссуляром, пренином, политипами пектолита, томсонитом-(Са) и кальцитом. Моноклинный, пр.гр. $P2_1/m$ (в стандартной установке), параметры ячейки: $a = 6.715(1) \text{ \AA}$, $b = 22.944(1) \text{ \AA}$, $c = 6.716(1) \text{ \AA}$, $\beta = 113.358(4)^\circ$, $V = 949.93 \text{ \AA}^3$, $Z = 2$. Название происходит от греческого *пара* – «близко» и названия минерала тоберморита $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{17} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Кристаллическая структура паратоберморита (рис. 1.9) отличается от наиболее близкой тоберморита взаимным расположением SiO_4 -тетраэдров и Са-полиэдров. Авторский материал хранится в Минералогическом музее им. А.Е. Ферсмана РАН, образцы FMM_1_97513 (рег. № 5643/1) и FMM_1_97585 (рег. № 5730/1).

Авторы: Пеков И.В., Зубкова Н.В., Чуканов Н.В., Merlino С., Япаскурт В.О., Белаковский Д.И., Лоскутов А.В., Новгородова Е.А., Возчикова С.А., Бритвин С.Н., Пушаровский Д.Ю.



а

б

Рисунок 1.8 – Радиальные пучки кристаллов паратоберморита (а), спутанные агрегаты кристаллов паратоберморита (б)

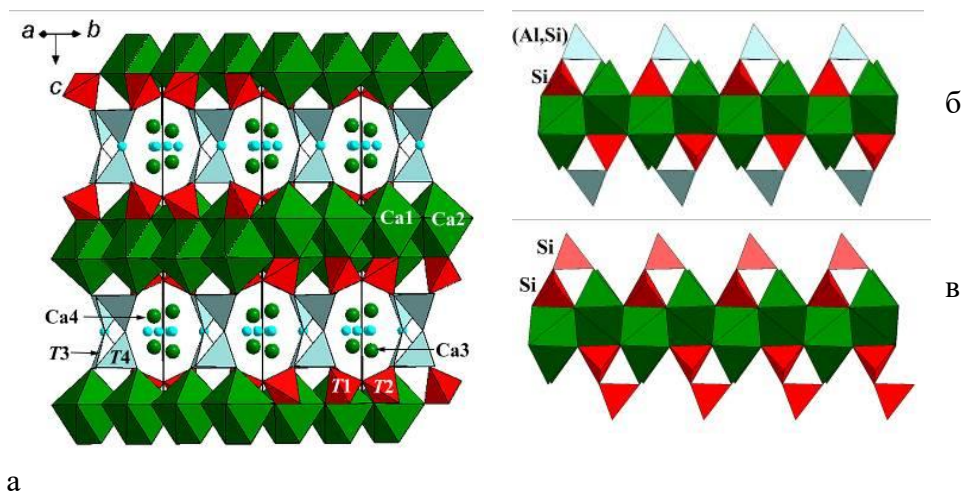


Рисунок 1.9 – Вид кристаллической структуры паратоберморита, голубые шарики – H_2O (а), Ca–T–O-модуль А-типа в паратоберморите (б), Ca–T–O-модуль В-типа в тоберморите (в)

Фосфаты, сульфаты, арсенаты:

Паульгротит. Paulgrothite. IMA 2021-004. $\text{Cu}_9\text{Fe}^{3+}\text{O}_4(\text{PO}_4)_4\text{Cl}_3$.

Фумарола Арсенатная, 2-й шлаковый конус северного прорыва БТТИ, Толбачинский дол, Камчатка. Образует желтые с зеленоватым оттенком очень мелкие кристаллы, прозрачные, со стекляннным блеском. Ромбический, пр.гр. $\text{Stc}2_1$, параметры эл. ячейки: $a = 5.90(1) \text{ \AA}$, $b = 15.66(4) \text{ \AA}$, $c = 17.33(4) \text{ \AA}$, $V = 1601.19 \text{ \AA}^3$. Назван в честь выдающегося немецкого минералога Пауля фон Грота (1843–1927). Паульгротит обладает новой уникальной кристаллической структурой. Авторский материал хранится в Минералогическом музее им. А.Е. Ферсмана РАН, рег. № 5595/1.

Авторы: Сийдра О.И., Назарчук Е.В., Паутов Л.А., Борисов А.С., Зайцев А.Н., Авдонтчева Е.Ю., Бочаров В.Н.

Карлдитмарит. Karlditmarite. IMA 2021-003. $\text{Cu}_9\text{O}_4(\text{PO}_4)_2(\text{SO}_4)_2$.

Фумарола Арсенатная, 2-й шлаковый конус северного прорыва БТТИ, Толбачинский дол, Камчатка. Триклинный, пр.гр. $P\bar{1}$, параметры ячейки: $a = 6.1256(7)$, $b = 7.9192(8)$, $c = 7.9866(8) \text{ \AA}$, $\alpha = 75.173(2)^\circ$, $\beta = 86.639(2)^\circ$, $\gamma = 88.660(2)^\circ$, $V = 373.87 \text{ \AA}^3$. Назван в честь российского геолога, исследователя Камчатки Карла Владимировича Дитмара, Вольдемара Фридриха Карла фон Дитмара (1822–1892). Карлдитмарит представляет новый структурный тип, ведется работа по структурному анализу. Авторский материал хранится в Минералогическом музее им. А.Е. Ферсмана РАН, рег. № 5589/1.

Авторы: Сийдра О.И., Назарчук Е.В., Паутов Л.А., Борисов А.С., Авдонтьева Е.Ю.

Мильковит. Milkovoite. IMA 2021-005. $\text{Cu}_4\text{O}(\text{PO}_4)(\text{AsO}_4)$.

Также из фумаролы Арсенатной, 2-й шлаковый конус северного прорыва БТТИ, Толбачинский дол, Камчатка. Ромбический, пр.гр. $Pnma$, параметры эл. ячейки: $a = 8.1865(7) \text{ \AA}$, $b = 6.3559(5) \text{ \AA}$, $c = 13.668(1) \text{ \AA}$, $V = 711.18 \text{ \AA}^3$. Является Р-As-аналогом козыревскита. Назван по географическому наименованию: Мильково – старейший поселок Камчатки (основан в 1733 году) и административный центр Мильковского района, перевалочный пункт для многих экспедиционных групп, а также аэропорт. Авторский материал хранится в Минералогическом музее им. А.Е. Ферсмана РАН, рег. № 5590/1 (рис. 1.10).

Авторы: Сийдра О.И., Назарчук Е.В., Паутов Л.А., Борисов А.С., Козин М.С.

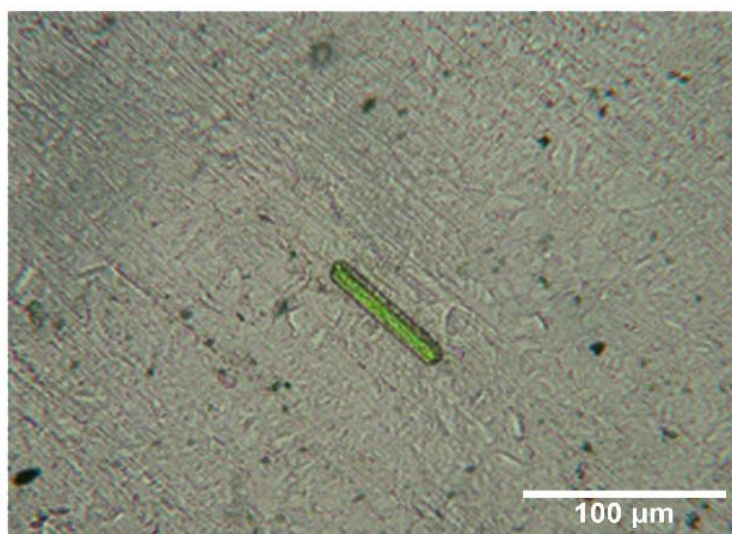


Рисунок 1.10 – Вид кристалла мильковоита в проходящем свете при одном николе

Эрссонит. Erssonite. IMA 2021-016. $\text{CaMg}_7\text{Fe}^{3+}_2(\text{OH})_{18}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ [6].

Месторождение Лонгбан (Långban), Вермланд, Швеция, обнаружен в полостях магнетитсодержащих доломитов. Образует агрегаты бесцветных пластинчатых шестиугольных кристаллов, уплощенных по (001), размером до 0.5 мм в поперечнике и толщиной до 10 микрон (рис. 1.11) с весьма совершенной слюдоподобной спайностью по {001}. Найден в низкотемпературной минеральной ассоциации, включающей, помимо доломита, кальцита, магнезиоферрита–магнетита, также флогопит, пироаурит, хризотил и норбергит. Тригональный, пр.гр. $P\bar{3}c1$, параметры эл. ячейки: $a = 9.3550(5) \text{ \AA}$, $c = 22.546(1) \text{ \AA}$, $V = 1708.8 \text{ \AA}^3$, $Z = 2$. Назван в честь шведского минералога-любителя доктора Андерса Эрссона, Dr. Anders Ersson (1971 г.р.), которым был собран материал для исследования. Кристаллическая структура эрссонита (рис. 1.12) изотипна вермландиту. Она содержит два типа чередующихся вдоль [001] слоев: положительно заряженный металл-гидроксидный слой $\{\text{Mg}_7\text{Fe}^{3+}_2(\text{OH})_{18}\}^{2+}$ и отрицательно заряженный слой $\{[\text{Ca}(\text{H}_2\text{O})_6][\text{SO}_4]_2(\text{H}_2\text{O})_6\}^{2-}$.

Авторский материал хранится в Минералогическом музее им. А.Е. Ферсмана РАН, образец FMM_1_97518 (рег. № 5669/1).

Авторы: Житова Е.С., Чуканов Н.В., Jonsson E., Пеков И.В., Белаковский Д.И., Вигасина М.Ф., Зубкова Н.В., Van K.V., Бритвин С.Н.



Рисунок 1.11 – Кристаллы эрссонита в ассоциации с желтым доломитом

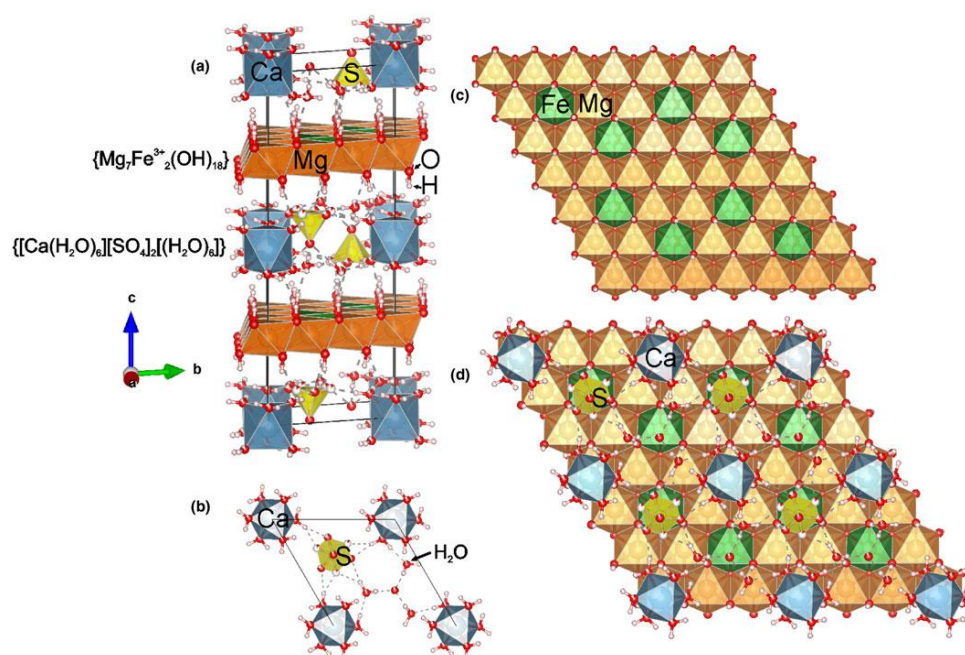


Рисунок 1.12 – Кристаллическая структура эрссонита в различных проекциях

Обервольфахит. Oberwolfachite. IMA 2021-010. $\text{SrFe}^{3+}_3(\text{AsO}_4)(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$ [7].

Рудник Клара, Обервольфах (Oberwolfach), Вольфах, Шварцвальд, Баден-Вюртемберг, Германия. Образует пластинчатые кристаллы желтого до коричневого цвета с алмазным блеском размером до 1 мм в поперечнике (рис. 1.13) и внешние зоны кристаллов обервольфахита–бёдантита размером до 3 мм. Ассоциирует с кварцем, гетитом, ярозитом, иллитом, гематитом, бёдантитом, баритом и др. Тригональный, пр.гр. $R\bar{3}m$, параметры эл. ячейки $a = 7.3270(3) \text{ \AA}$, $c = 17.0931(9) \text{ \AA}$, $V = 794.70(8) \text{ \AA}^3$, $Z = 3$. Назван по месту находки.

Относится к надгруппе алунита (рис. 1.14). Является Sr -доминантным аналогом бёдангита $BaFe^{3+}_3(AsO_4)(SO_4)(OH)_6$ и Fe^{3+} -доминантным аналогом кеммлицита $SrAl_3(AsO_4)(SO_4)(OH)_6$. Авторский материал хранится в Минералогическом музее им. А.Е. Ферсмана РАН, рег. № 5674/1.

Авторы: Чуканов Н.В., Зубкова Н.В., Möhn G., Варламов Д.А., Пеков И.В., Ксенофонтов Д.А., Агаханов А.А., Бритвин С.Н., Desor J., Ермалаева В.Н., Пушаровский Д.Ю.



Рисунок 1.13 – Агрегат кристаллов обервольфахита в ассоциации с гетитом, ширина поля зрения 7 мм

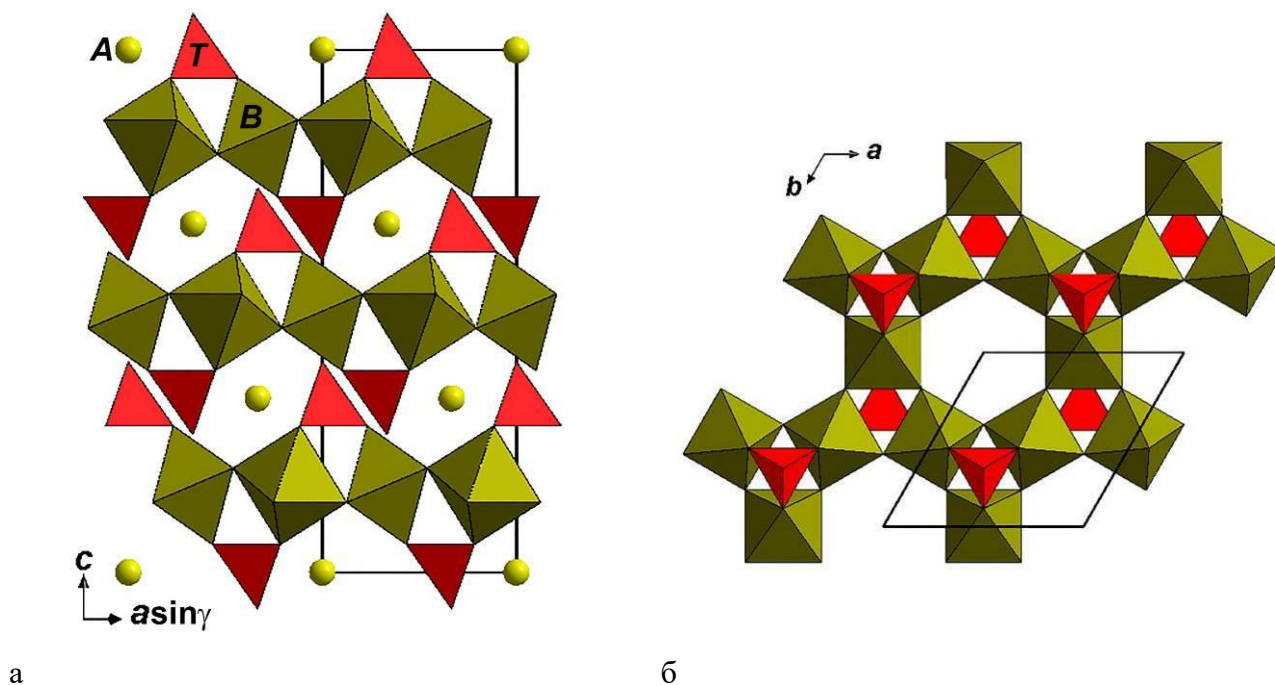


Рисунок 1.14 – Кристаллическая структура обервольфахита (а), гетерополиэдрический слой в структуре обервольфахита (б); выделена элементарная ячейка

Гуржиит. Gurzhiite. $Al(UO_2)(SO_4)_2F \cdot 10H_2O$.

Найден в подземном руднике Быкогорского уранового месторождения, Ставропольский край, Северный Кавказ, Россия, в гипергенных образованиях окисленных урановых руд в подземном руднике. Ассоциирующие минералы – хадемит, гидрокеноралстонит, натрозиппеит, шрекингерит и страссманнит. Триклинный, пр. гр. $P\bar{1}$, параметры эл. ячейки: $a = 7.193(2) \text{ \AA}$, $b = 11.760(2) \text{ \AA}$, $c = 11.792(2) \text{ \AA}$, $\alpha = 67.20(3)^\circ$, $\beta = 107.76(3)^\circ$, $\gamma = 89.99(3)^\circ$, $V = 867.7(4) \text{ \AA}^3$, $Z = 2$ (рис. 1.15). Назван в честь российского минералога и кристаллографа Владислава Владимировича Гуржия (1985 г.р.), внесшего большой вклад в минералогию и кристаллохимию урана. Он автор и соавтор 47 публикаций, посвященных кристаллохимии урансодержащих минералов и синтетических соединений. Химически гуржиит очень похож на страссманнит $\text{Al}(\text{UO}_2)(\text{SO}_4)_2\text{F} \cdot 16\text{H}_2\text{O}$, но минералы имеют разные физические и оптические свойства и сильно различаются по симметрии, пространственной группе и структуре (рис. 1.16). Авторский материал хранится в Минералогическом музее им. А.Е. Ферсмана РАН, рег. № 5756/1.

Авторы: *Kasatkin A.V., Plášil J., Chukanov N.V., Škoda R., Nestola F., Agakhanov A.A., Belakovskiy D.I.*



Рисунок 1.15 – Выделения гуржиита желтого цвета с белым хадемитом, ширина поля зрения 1 см

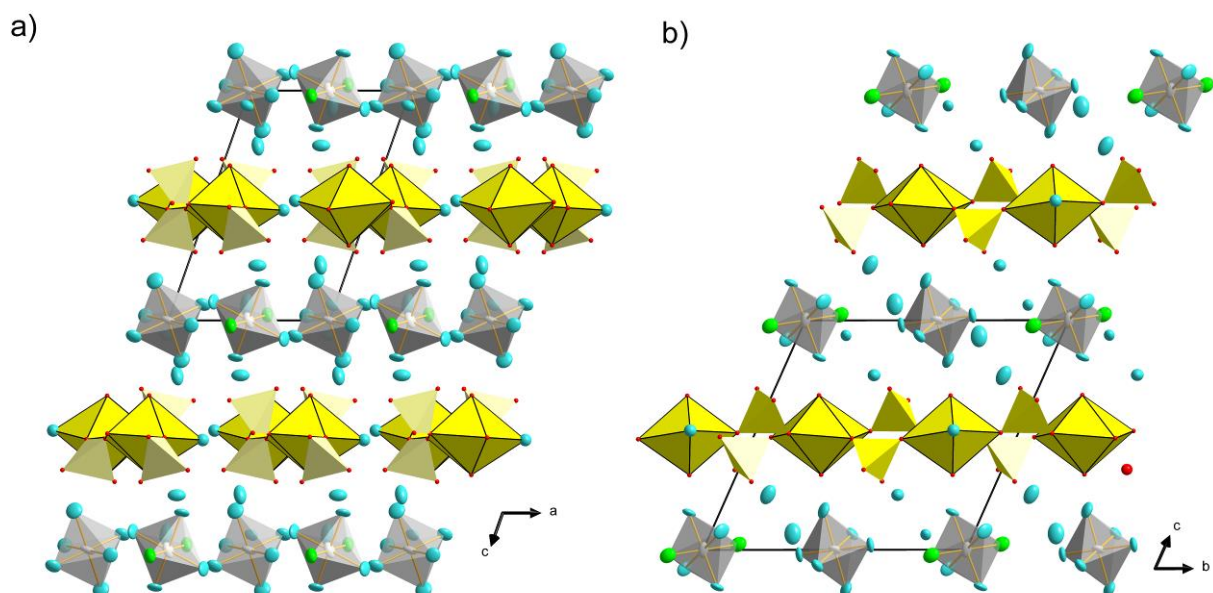


Рисунок 1.16 – Кристаллическая структура гуржиита в двух проекциях (а, б). UO_7 -многогранники желтые с черными ребрами, SO_4 -тетраэдры светло-желтые без подчеркнутых ребер, Al-октаэдры серые, молекулы H_2O голубые, атомы O красные, F – зеленые; границы элементарной ячейки обозначены черными сплошными линиями

Кальциохатертит. *Calciohatertite*. IMA 21-013. $NaNaCa(CaFe^{3+})(AsO_4)_3$.

Минерал из фумаролы Арсенатной, 2-й шлаковый конус северного прорыва БТТИ, Толбачинский дол, Камчатка (рис. 1.17). Моноклинный, пр. гр. $C2/c$, $a = 12.6092(8) \text{ \AA}$, $b = 13.2434(5) \text{ \AA}$, $c = 6.8096(3) \text{ \AA}$, $\alpha = 114.554(7)^\circ$, $V = 1034.30(11) \text{ \AA}^3$, $Z = 4$. Кальциохатертит входит в группу аллюодита и является Ca-аналогом с преобладанием Ca среди двухвалентных катионов в позиции M(2) хатеррита $NaNaCa(Cu^{2+}Fe^{3+})(AsO_4)_3$ и магниохатеррита $NaNaCa(MgFe^{3+})(AsO_4)_3$, рис. 1.18. Авторский материал хранится в Минералогическом музее им. А.Е. Ферсмана РАН, рег. № 5741/1.

Авторы: Кошлякова Н.Н., Пеков И.В., *Белаковский Д.И.*, Вигасина М.Ф., Зубкова Н.В., *Агаханов А.А.*, Бритвин С.Н., Сидоров Е.П., Пущаровский Д.Ю.

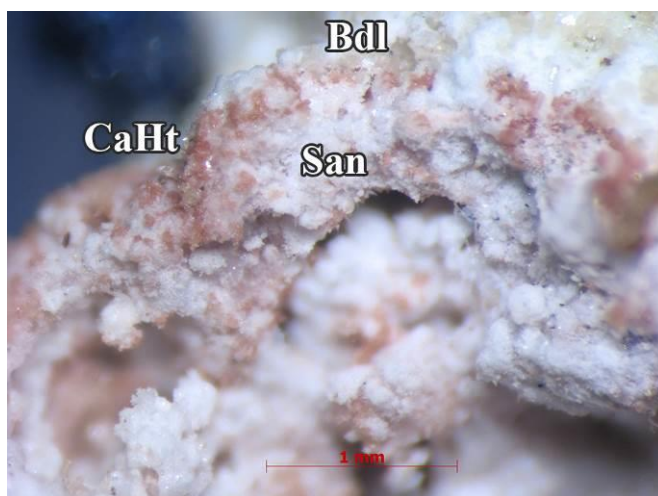


Рисунок 1.17 – Срастание розовато-коричневого кальциохатеррита (CaHt) с бледным желтовато-зеленоватым бадаловитом (Bdl) и белым санидином (San)

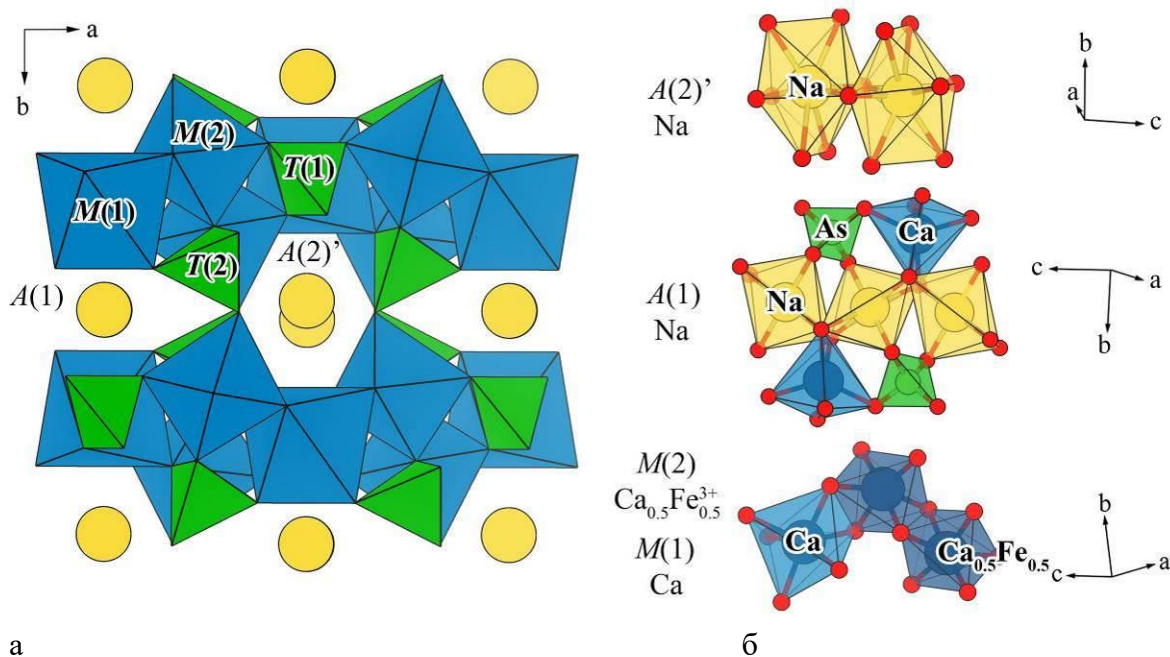


Рисунок 1.18 – Кристаллическая структура кальциохатеррита в проекции вдоль оси c (а) и мотивы AO_8 - и MO_6 -многогранников (б)

Голдхиллит. Goldhillite. IMA 21-034. $Cu_5Zn(AsO_4)_2(OH)_6 \cdot H_2O$.

Рудник Голд-Хилл (Gold Hill Mine), округ Туэле (Tooele County), Юта, США. Открыт в процессе изучения минерала филипсбургита на образце из систематической коллекции Минералогического музея им. А.Е. Фермана РАН FMM_1_88338. Этот образец теперь является **голотипом** голдхиллита. Часть исследований голдхиллита выполнена на образце 76142 из коллекции Музея естественной истории Лос-Анджелеса (Natural History Museum of Los Angeles County), Лос-Анджелес, Калифорния, США, – этот образец является сейчас **котипом** голдхиллита. Голдхиллит образует изумрудно-зеленые таблитчатые кристаллы, уплощенные по (001) до 1 мм, обычно искривленные и собранные в розетки до 1.5 мм в поперечнике (рис. 1.19). Голдхиллит – вторичный минерал, встречающийся в минерализованных трещинах породы, состоящей из кварца с гидроксидами железа в ассоциации с микситом, корнваллитом и конихальцитом. Голдхиллит с идеальной формулой $Cu_5Zn(AsO_4)_2(OH)_6 \cdot H_2O$ является крайним членом изоморфной серии голдхиллит–филипсбургит–кипушит. Минерал моноклинный, пр.гр. $P2_1/b$, параметры эл. ячейки: $a = 12.3573(5) \text{ \AA}$, $b = 9.2325(3) \text{ \AA}$, $c = 10.7163(4) \text{ \AA}$, $\beta = 97.346(4)^\circ$, $V = 1,212.57 \text{ \AA}^3$, $Z = 4$. Название дано по месту его находки. Кристаллическая структура голдхиллита (рис. 1.20) изотипна структурам филипсбургита и кипушита. В ней искаженные ян-теллеровские CuO_6 -октаэдры, соединенные по ребрам, образуют слои А-типа с открытыми шестиугольными пустотами, занятыми тетраэдрами As_2O_4 . Чередующиеся ZnO_4 - и AsO_4 -тетраэдры образуют 4- и 8-членные кольца, формируя второй тип слоев, В-тип. А-тип-слои соединены через

As₂O₄ тетраэдры, образуя двойные слои А, чередующиеся с одинарными В-слоями перпендикулярно оси *a*.

Авторы: Исмагилова Р.М., Kampf A.R., Житова Е.С., Золотарев А.А., Ciesielczuk J., Михайлова Ю.А., *Белаковский Д.И.*, Бочаров В.Н., Шиловских В.В., Власенко Н.С., Nash В.Р., Кривовичев С.В.

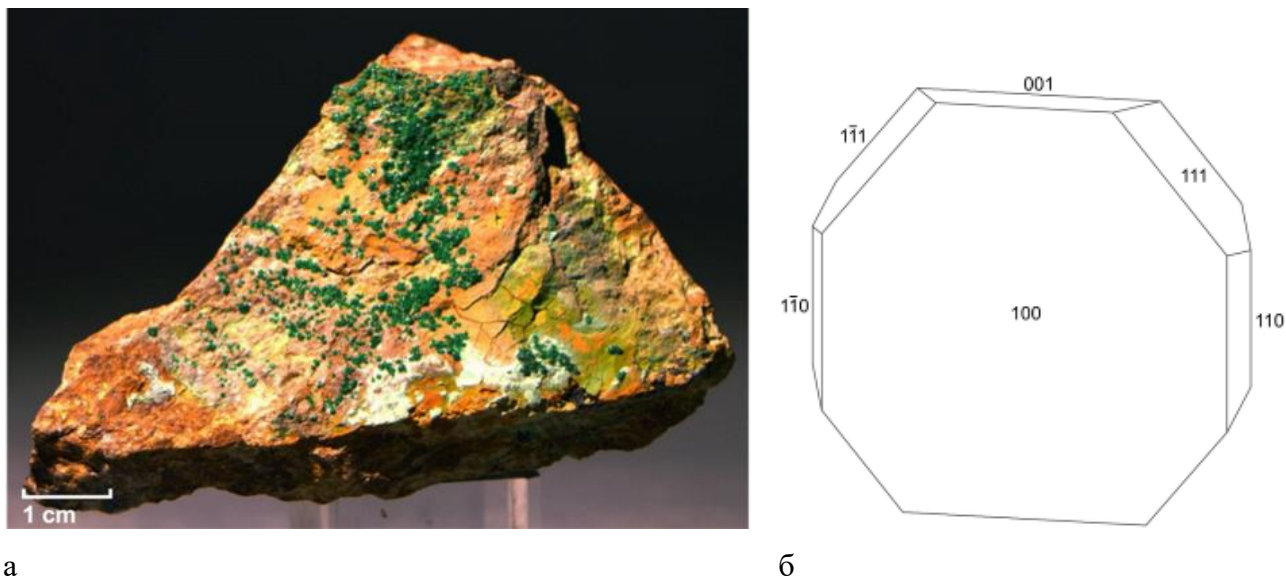


Рисунок 1.19 – Образец FMM_1_88338, голотип голдхиллита (а), чертеж кристалла голдхиллита (б)

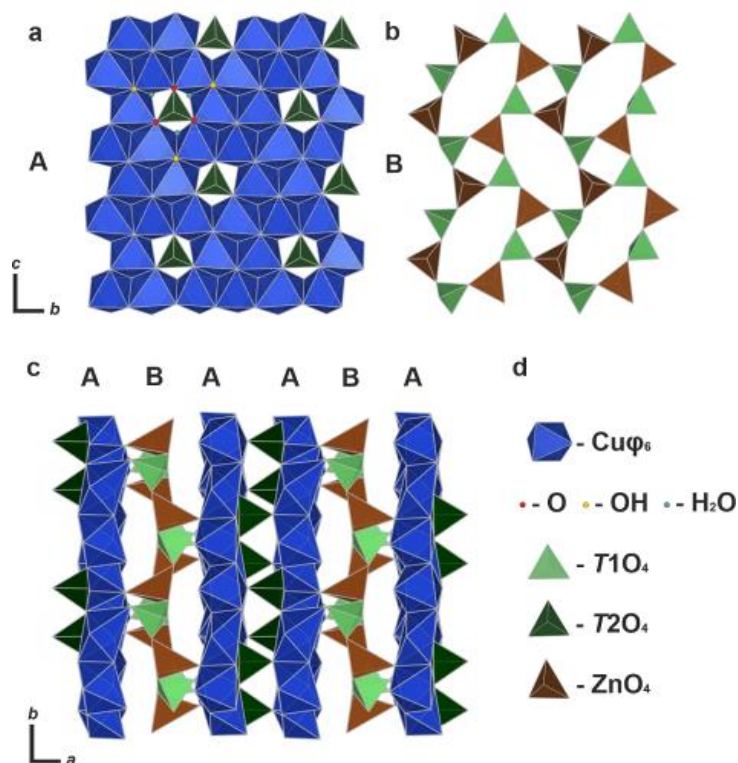


Рисунок 1.20 – Проекция кристаллической структуры голдхиллита

Карбонаты:

Гидроксилбастнезит-(La). Hydroxylbastnäsite-(La). IMA 21-001. La(CO₃)(OH).

Найден в щелочно-ультраосновном комплексе Вуориярви, Мурманская обл., Кольский п-ов, Россия, и одновременно на месторождении Мочалин Лог, Челябинская обл., Южный Урал. Гексагональный, пр.гр. $P\bar{6}$, параметры эл. ячейки: $a = 12.537(3) \text{ \AA}$, $c = 9.968(2) \text{ \AA}$, $V = 1356.83 \text{ \AA}^3$, $Z = 18$. Член группы бастнезита. Гидроксильный аналог бастнезита-(La) и лантановый аналог гидроксилбастнезита-(Ce) и гидроксилбастнезита-(Nd). Диморф козоита-(La). Авторский материал хранится в Минералогическом музее им. А.Е. Ферсмана РАН, рег. № 5644/1 (голотип) и 5660/1 (котип).

Авторы: Пеков И.В., Зубкова Н.В., Касаткин А.В., Кошлякова Н.Н., Чуканов Н.В., Ксенофонтов Д.А., Škoda R., Бритвин С.Н., Кириллов А.С., Зайцев А.Н., Кузнецов А.М., Пушаровский Д.Ю.

Казнахтит. Kaznakhtite. IMA 2021-056. $\text{Ni}_6\text{Co}^{3+}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_{16}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$.

Казнахтинский ультраосновной массив, Теректинский хребет, Усть-Коксинский р-н, Республика Алтай, Россия. Тригональный, $R\bar{3}$, параметры эл. ячейки: $a = 3.0514(3) \text{ \AA}$, $c = 23.179(2) \text{ \AA}$, $V = 186.90(4) \text{ \AA}^3$, $Z = 3/8$. Назван по месту находки. Новый член группы и надгруппы гидроталькита, Co^{3+} -аналог риверсита $\text{Ni}_6\text{Fe}^{3+}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_{16}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ и таковита $\text{Ni}_6\text{Al}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_{16}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Авторский материал хранится в Минералогическом музее им. А.Е. Ферсмана РАН, рег. № 5727/1.

Авторы: Касаткин А.В., Бритвин С.Н., Кржижановская М.Г., Чуканов Н.В., Škoda R., Göttlicher J., Белаковский Д.И., Пеков И.В., Левицкий В.В.

Минералы других классов:

Озерновскит. Ozernovskite. IMA 2021-059. $\text{Fe}^{3+}_4(\text{Te}^{4+}\text{O}_4)(\text{Te}^{4+}\text{O}_3) 7\text{H}_2\text{O}$.

Обнаружен на Озерновском месторождении, в 115 км севернее поселка Ключи, Камчатка, Россия. Встречен в зоне окисления, в пустотах и трещинах частично окисленных диккит-кварцевых жил, содержащих обогащенный селеном самородный теллур. Другие ассоциирующие минералы в основном являются теллуратами и селенитами: эммонсит, сонораит, поит, теллуromандариноит, мандариноит, теллурит, парателлурит и др. Озерновскит (рис. 1.21) образует пучки и радиальные агрегаты зеленых или желтовато-зеленых длиннопризматических (вытянуты по [001]) кристаллов размером до $0.01 \times 0.02 \times 1$ мм, уплощенных по (010), с сильным стекляннным блеском. Моноклинный, пр.гр. $C2/c$, параметры ячейки: $a = 25.923(3) \text{ \AA}$, $b = 10.419(1) \text{ \AA}$, $c = 7.902(1) \text{ \AA}$, $\gamma = 93.415(4)^\circ$, $V = 2130.5(5) \text{ \AA}^3$, $Z = 4$. Обладает уникальной кристаллической структурой с новым для минералов теллуратным анионом TeO_4^{4-} . Основа структуры (рис. 1.22) представляет собой

открытый каркас, образованный димерами соединенных ребрами октаэдров $\text{Fe}^{3+}\text{O}_5(\text{H}_2\text{O})$, сходными димерами Fe^{3+}O_6 -октаэдров, тригональными пирамидами Te^{4+}O_3 и квадратными основаниями пирамид Te^{4+}O_4 . Авторский материал хранится в Минералогическом музее им. А.Е. Ферсмана РАН, образец FMM_1_97681 (рег. № 5728/1).

Авторы: Пеков И.В., Бритвин С.Н., Плетнев П.А., Чуканов Н.В., *Белаковский Д.И.*, Япаскурт В.О.



Рисунок 1.21 – Кристаллы озерновскита

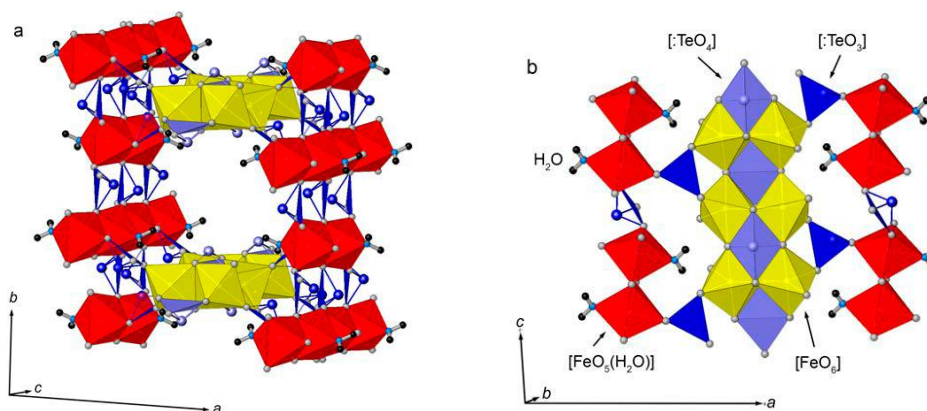


Рисунок 1.22 – Изображения кристаллической структуры озерновскита. Красным показаны димеры октаэдров $\text{Fe}^{3+}\text{O}_5(\text{H}_2\text{O})$, желтым – димеры Fe^{3+}O_6 -октаэдров

Резницкиит. Reznitskyite. IMA 21-067. $\text{CaMg}(\text{VO}_4)\text{F}$.

Фумарола Арсенатная, 2-й шлаковый конус северного прорыва БТТИ, Толбачинский дол, Камчатка. Новый член группы тиласита. Минерал не образует крупных выделений, бесцветный. Найден при электронно-зондовом изучении полированных шлифов (рис. 1.23) среди агрегатов других бесцветных минералов, в первую очередь ангидрита, а также свабита и собственно тилазита $\text{CaMg}(\text{AsO}_4)\text{F}$, представленного ванадийсодержащей разновидностью, которая формирует с резницкиитом изоморфный ряд. Моноклинный, пр.гр. $C2/c$, параметры

эл. ячейки: $a = 6.6912(7) \text{ \AA}$, $b = 8.9395(7) \text{ \AA}$, $c = 7.0587(8) \text{ \AA}$, $\beta = 113.08(1)^\circ$, $V = 388.43 \text{ \AA}^3$.

Назван в честь сотрудника Института земной коры СО РАН (Иркутск) Леонида Зиновьевича Резницкого (1938 г.р.), специалиста в области петрологии и минералогии метаморфических и метасоматических пород. Резницкиит – первый ванадат, относящийся к структурному типу титанита (рис. 1.24). Авторский материал хранится в Минералогическом музее им.

А.Е. Ферсмана РАН, рег. № 5734/1.

Авторы: Кошлякова Н.Н., Пеков И.В., Вигасина М.Ф., Зубкова Н.В., Агаханов А.А., Бритвин С.Н., Сидоров Е.П., Пушаровский Д.Ю.

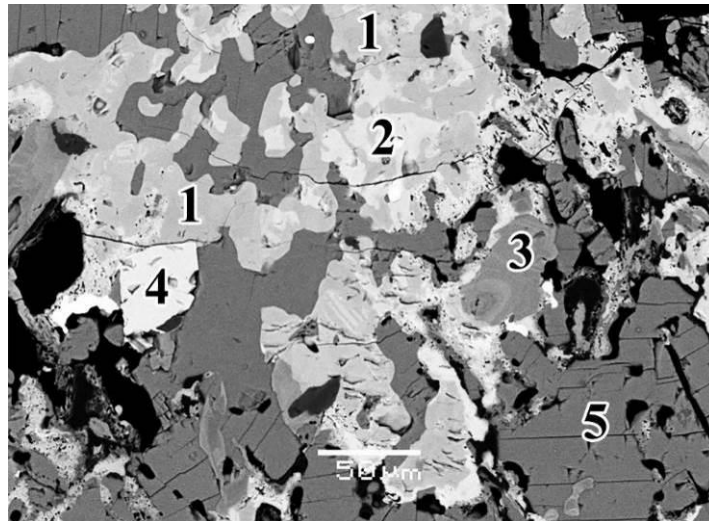


Рисунок 1.23 – Агрегат зональных кристаллов, содержащих зоны резницкиита (1) обогащенной ванадием разновидности тилазита (2). В тесной ассоциации с ними находятся радборит-(V) (3), магнезиоферрит (4) и ангидрит (5). Фото в режиме отраженных электронов

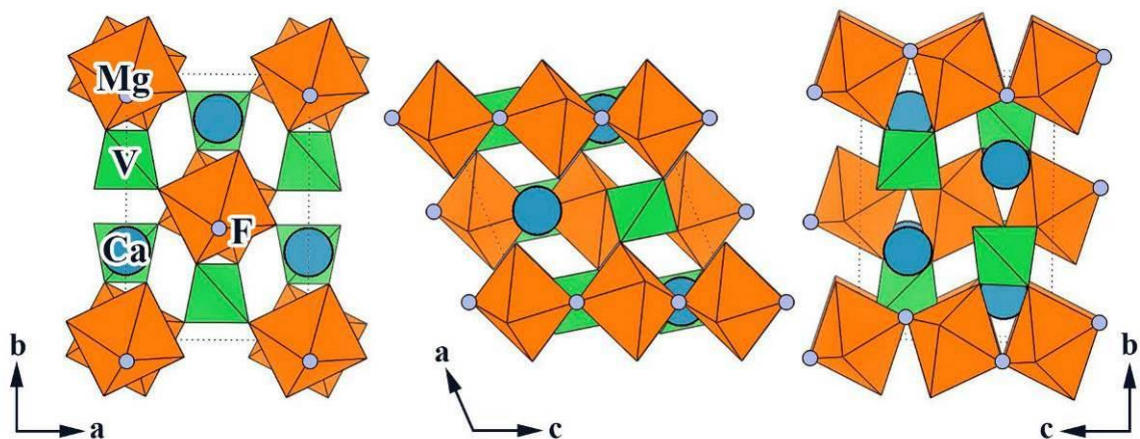


Рисунок 1.24 – Кристаллическая структура резницкиита в трех проекциях. Единичная ячейка показана пунктирной линией

2 Минералогия природных объектов

Сотрудники Музея проводили исследования минералогии природных объектов Архангельской обл. [8–10], Кольского региона [11–13], Предуралья [14], Урала [2, 3, 15–19 и др.], Сибири [20, 21 и др.], Алтая, Чукотки [22], Камчатки [23, 24–28 и др.], Крыма [29], Кавказа [30, 31 и др.], Закавказья [32], Таджикистана [1, 2, 33–37 и др.], Киргизии [45 и др.] и других регионов России и зарубежья.

2.1 Новые данные по минералогии фумарол вулкана Толбачик (Камчатка, Россия)

В результате продолжающегося систематического активного исследования и обобщения полученных данных существенно пополнены научные знания по минералогии фумарольных полей влк. Бол. Толбачик – минералогического объекта мирового значения. Они сформировались в результате Большого трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг. и активны до сих пор (рис. 2.1.1).



Рисунок 2.1.1 – Второй конус Большого Толбачика извержения 1975–1976 годов

В минералого-геохимическом и генетическом аспектах этот объект уникален как по масштабам концентрации в наземных эксгаляционных системах малораспространенных и редких элементов (Cu, Zn, Pb, As, V, Sn, Se, Au, Cs, Tl и др.), так и по многообразию и необычности ассоциаций химических элементов. На сегодня в отложениях этих фумарол достоверно установлено около 360 минеральных видов, 134 из которых впервые открыты здесь. Это абсолютный мировой рекорд для одного геологического объекта: в начале 2020 года Толбачик опередил прежнего «чемпиона» – гигантский Хибинский щелочной массив на Кольском полуострове, где открыто 127 минералов. 104 из 134 новых минеральных видов

открыты на Толбачике за последнее десятилетие, начиная с 2011, года при активном участии наших сотрудников. Такой динамики роста числа новых минералов не отмечено более ни на одном объекте в мире за всю историю минералогии.

Своеобразие минерализации обусловлено уникальным для природных объектов сочетанием физико-химических условий и механизмов формирования: высокие температуры (до 700–800 °С), атмосферное давление, очень высокая фугитивность кислорода, газовый транспорт большинства компонентов, прямое осаждение многих высокотемпературных минералов из вулканических газов, обладающих специфической геохимией, в том числе сильной обогащенностью щелочными и халькофильными («рудными») элементами, широкое проявление газового метасоматоза, а также «горячего гипергенеза». Своеобразие минералогии толбачинских фумарольных систем выражается в первую очередь в **необычности химического состава и кристаллохимических особенностей** не только новых, но и «старых» минералов. Так, здесь установлен 51 представитель химического класса арсенатов (включая 43 новых минерала, из которых 42 являются эндемиками фумарол Толбачика), и все они – безводородные: не содержат ни ОН-групп, ни молекул H₂O. Надо отметить, что из 390 известных в природе **арсенатов** только 77 являются безводородными, то есть на Толбачике сосредоточено две трети всего видового разнообразия таких минералов. Столь же своеобразны здесь **ванадаты и селениты**. На Толбачике **впервые** обнаружена и детально изучена нами богатая и разнообразная **силикатная минерализация фумарольного генезиса**, причем для большинства из более чем 30 этих минералов, в основном относящихся к «обычным» группам (оливин, гранат, пироксены, амфиболы, слюды, полевые шпаты, фельдшпатоиды), характерны значительные (до нескольких мас.%) изоморфные примеси «рудных» элементов: As, Cu, Zn, Sn, Mo, W. Здесь **впервые** в природе обнаружены оксиды группы шпинели с высокими содержаниями меди, вплоть до Cu-доминантных минеральных видов [24, 27]. Крайне разнообразна и специфична здесь медная минерализация и в целом: 96 собственных минералов Cu²⁺ (72 из которых открыты в фумаролах Толбачика), относящиеся к 80 структурным типам. Здесь найдены разновидности и других «обычных» минералов, аномально обогащенные нехарактерными для них в других обстановках примесями, например форстерита (с As, P), гематита, рутила (с Sn), касситерита (с Ti, Sb), санидина, кальсилита, лейцита (с As), гаюина (с Mo, W), фторапатита (с V). Фумарольные поля Толбачика (рис. 2.1.2) – самый яркий в мире пример наземных эксгальационных минералообразующих систем окислительного типа, геохимико-минералогический и генетический эталонный объект. Уникален он и в музейно-минералогическом плане вследствие удивительного разнообразия минералов и большого числа редких, а также внешней аттрактивности многих образцов.



Рисунок 2.1.2 – Вершина второго конуса, район проведения полевых работ

В 2019–2020 годах из фумарольных образований Толбачика изучены с участием наших сотрудников и утверждены в Комиссии по новым минералам, номенклатуре и классификации Международной минералогической ассоциации IMA семь новых минеральных видов [1, 2]. В 2021 году из фумарольных образований Толбачика изучены и утверждены IMA CNMNC еще шесть новых минеральных видов: карлдитмарит, паульгротит, мильковоит, рябчиковит, кальциохатертит и резничкиит. Описания их приведены в разделе 1. Таким образом, **за отчетный период** открыто и исследовано **13 новых минералов** уникальных фумарол Толбачика.

2.2 Новые данные по минералогии псевдофумарольных возгонов подземных пожаров Фан-Ягнобского угольного месторождения (Центральный Таджикистан)

Представления о минералогии возгонов, механизмах минералообразования из газовой фазы были существенно пополнены также результатами нашего продолжающегося систематического изучения минерализации псевдофумарол природного подземного пожара в контурах одного из крупнейших в Центральной Азии месторождений коксующегося каменного угля – Фан-Ягнобского (~ 100 км к северу от г. Душанбе) [35, 36 и др.]. Из многочисленных очагов пожаров предметом особого внимания служили выходы газовых струй на правом борту р. Ягноб близ бывшего кишлака Рават, в верховьях урочища Кухи-Малик, с температурой от 40 до 590 °С (рис. 2.2.1). В отчетный период в продуктах возгонов были открыты два новых минерала – хасановит $KNa(MoO_2)(SO_4)_2$ и ермаковит $(NH_4)(As_2O_3)_2Br$ [2], впервые как для Фан-Ягнобского месторождения, так и вообще для возгонов природных угольных пожаров, описаны самородный теллур, пауфлерит $\beta-VO(SO_4)$,

бонацит As_4S_4 [1], киноварь HgS и тиманнит $HgSe$ [2]. В 2021 году обнаружены еще три, по всей вероятности, новые фазы, доизучены бонацит и алакранит As_8S_9 .



Рисунок 2.2.1 – Выходы сублиматов с мышьяковой минерализацией на угольном пожаре в урочище Кухи-Малик, общий вид

Предположительно новые минералы из возгонов угольных пожаров

Исследования позволили выявить в образцах возгонов три минерала, имеющие характеристические свойства, которых отличают их от всех известных минеральных видов. Они находятся на разных стадиях изучения как потенциально новые.

Обнаружен предположительно новый **сульфат сурьмы**. Минерал образует хорошо оформленные призматические кристаллы до 100 мкм по удлинению (рис. 2.2.2). Минерал бесцветный, прозрачный с сильным алмазным блеском. Угасание прямое, удлинение положительное. Судя по составу и рентгеновской порошкограмме, минерал является аналогом синтетического сульфата $Sb_6O_7(SO_4)_2$.

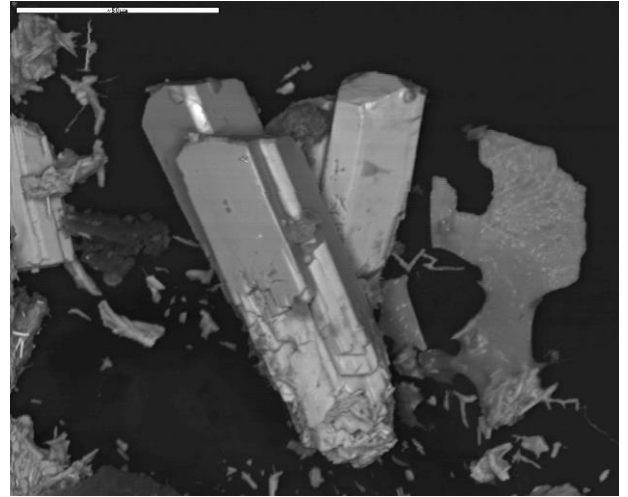


Рисунок 2.2.2 – Призматические кристаллы сульфата сурьмы. Изображение в режиме BSE, масштабная линейка – 50 мкм

Обнаружен и находится в стадии изучения предположительно новый минерал – сульфат олова (рис. 2.2.3, 2.2.4).

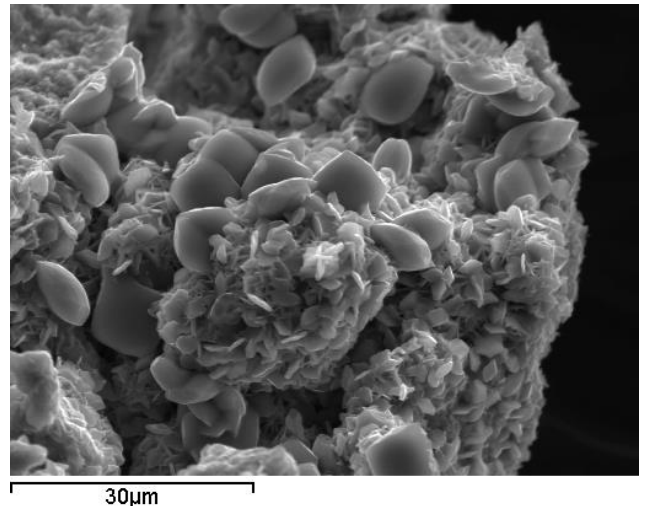
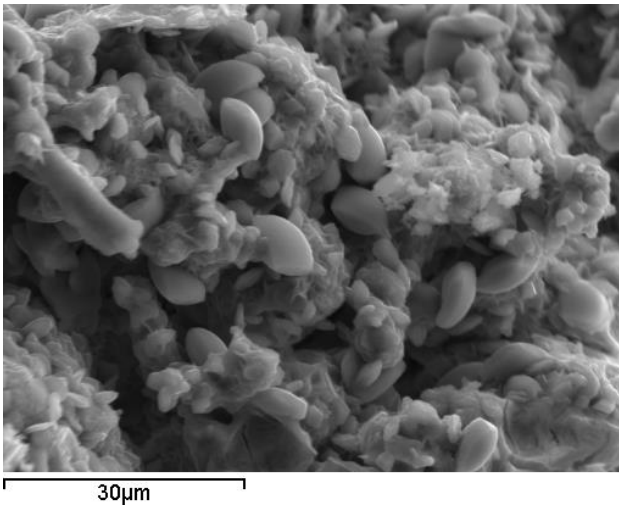


Рисунок 2.2.3 – Предположительно новый минерал – сульфат олова, щетки кристаллов. Изображение в режиме BSE

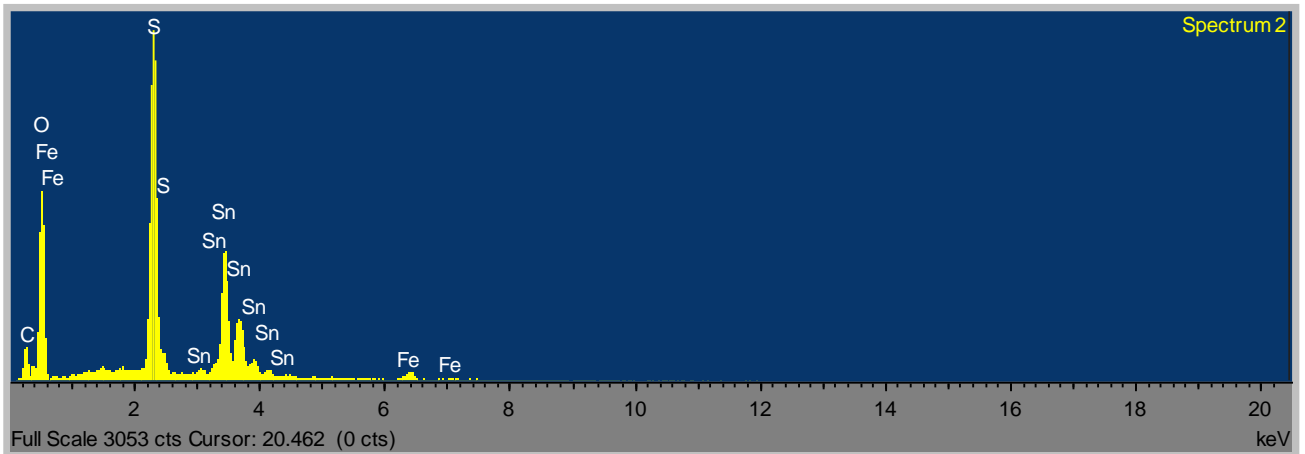


Рисунок 2.2.4 – Энергодисперсионный спектр сульфата олова

Для предположительно нового минерала – **сульфата-молибдата калия и аммония** (рис. 2.2.5) получены основные данные и сформирована заявка для подачи в Комиссию по новым минералам ММА.

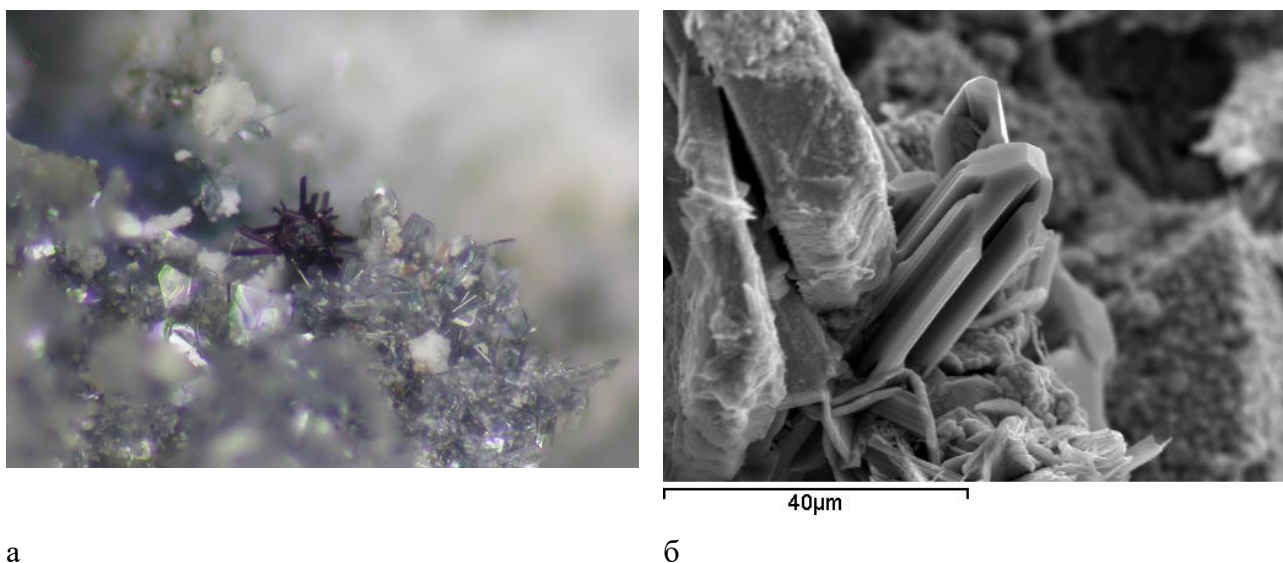
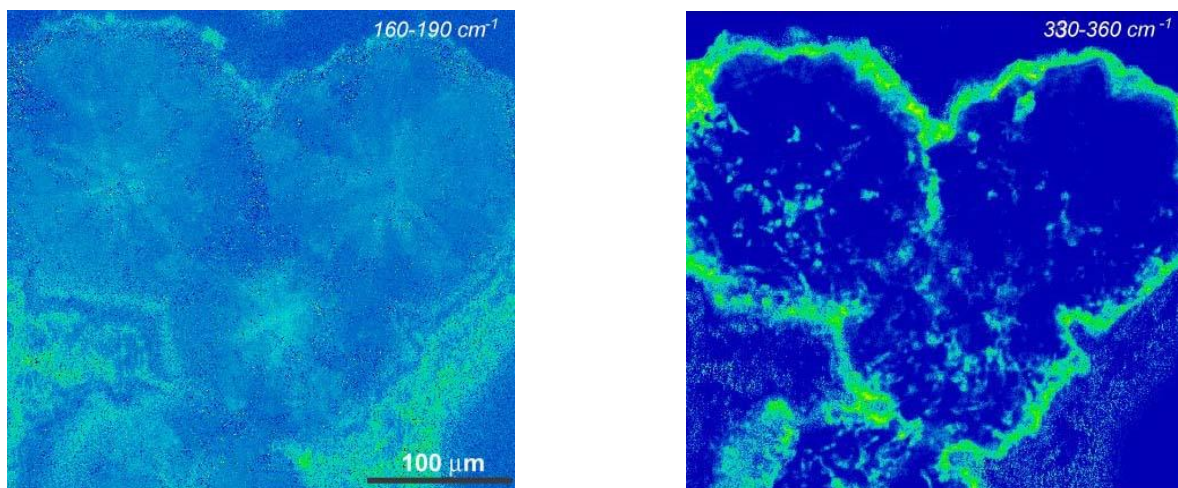


Рисунок 2.2.5 – Предположительно новый минерал – сульфат-молибдат калия и аммония: а – сросток кристаллов темно-фиолетового цвета на щетке молибдита, ширина поля зрения 2 мм; б – столбчатый кристалл с элементами скелетного роста, фото в режиме BSE

Новые данные для ермаковита и минералов ряда бонацитит – алакранит

В 2021 году дополнительно исследован **ермаковит** $(\text{NH}_4)(\text{As}_2\text{O}_3)_2\text{Br}$, открытый нами на угольном пожаре в урочище Кухи-Малик [37]. Проведено рамановское картирование образца (рис. 2.2.6). Это позволило выявить распределение рентгеноаморфной фазы в кристаллах ермаковита, мешавшей корректному выполнению химического анализа, а также внутреннюю анатомию кристаллов. Полученные материалы войдут в готовящуюся публикацию по новому минералу.



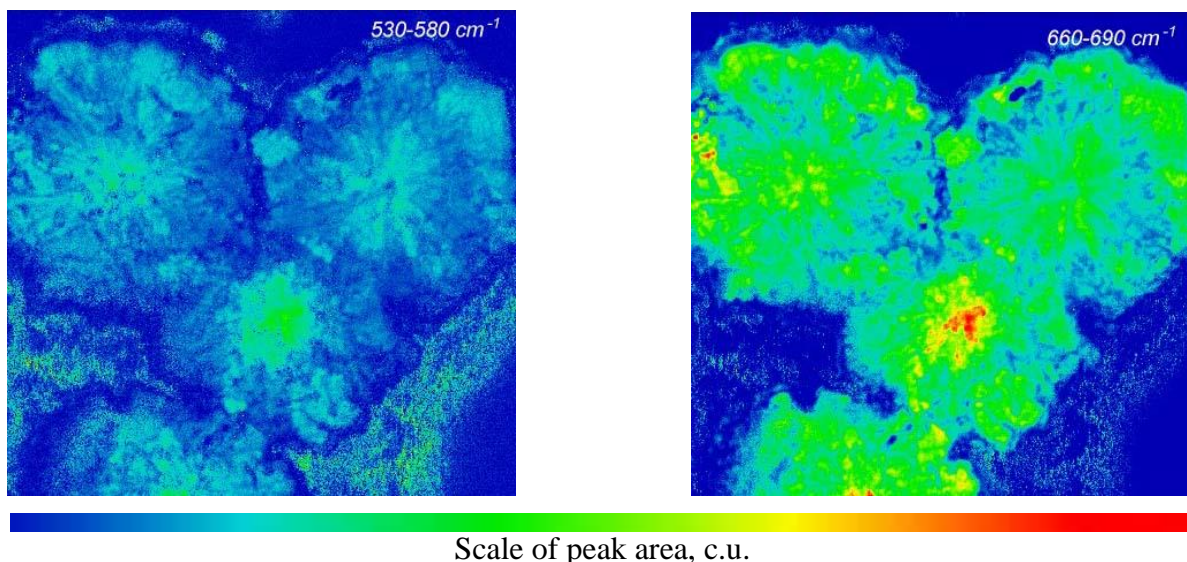


Рисунок 2.2.6 – Карты интенсивности полос рамановского смещения в указанных диапазонах. Цветовая шкала внизу показывает условную зависимость площади пика от цвета (площадь пиков возрастает от синего к красному цвету) (возбуждение лазером 532 нм, 10 мВт)

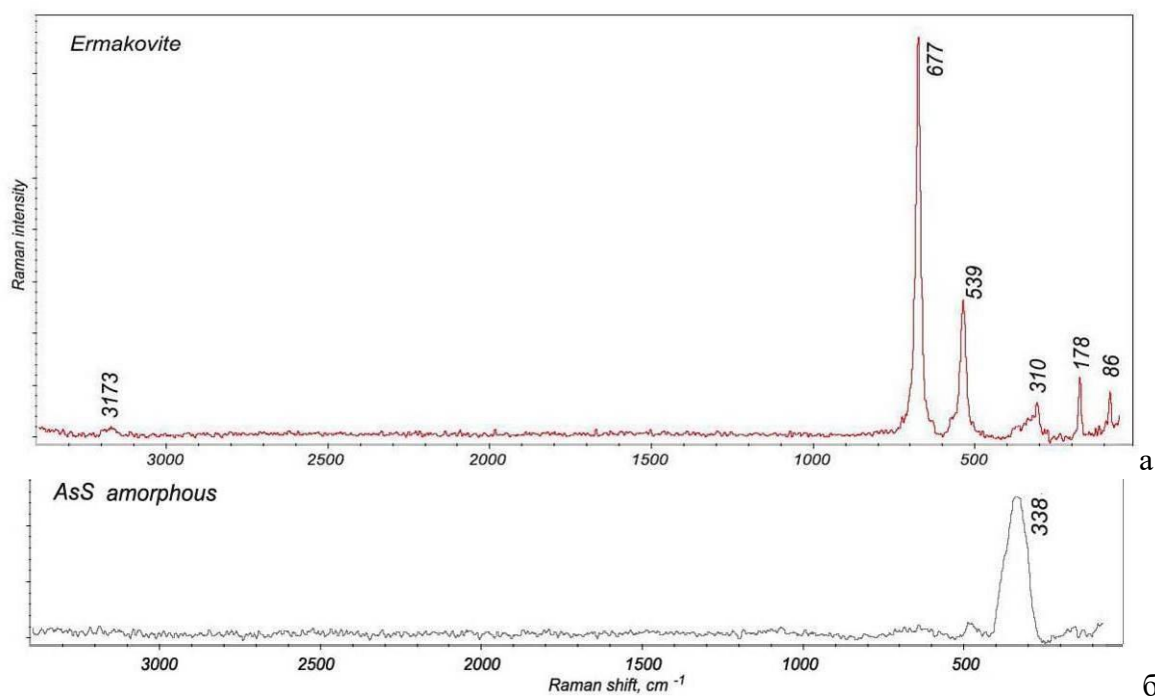


Рисунок 2.2.7 – Рамановские спектры: ермаковита (а), аморфной фазы AsS (б)

В ассоциации с реальгаром, бонанциитом установлена фаза из ряда бонанциит As_4S_4 (пр.гр. $C2/c$) – алакранит As_8S_9 (пр.гр. $P2/c$), оказавшаяся наиболее близкой по порошкограмме к алакраниту. Минерал образует псевдоморфозы по ромбовидным кристаллам бонанциита и по призматическим кристаллам реальгара (рис. 2.2.8). Диагностика алакранита выполнена по порошкограмме и полуколичественному анализу состава.



а



б

Рисунок 2.2.8 – Псевдоморфозы алакранита: по ромбовидным кристаллам бонацциита (а) и по призматическим кристаллам рутила (б)

Полученные результаты привносят новые данные о распространенной в природе, но недостаточно изученной системе As – S [38–40].

Новые данные будут опубликованы в статье «Находка бонацциита и алакранита в возгонах природного подземного угольного пожара в урочище Кухи-Малик, Таджикистан» (авторы В.Ю. Карпенко, Л.А. Паутов, М.А. Мираков, О.Й. Сийдра, С. Махмадшариф, М. Шодибеков), подготовленная для публикации в «Новых данных о минералах» (в печати).

2.3 Новые данные по минералогии кимберлитов

Работа проведена в рамках систематизации минералогических особенностей алмаза и минералов-спутников для создания методики прогнозирования качества и минералогических характеристик алмазного сырья, а также потенциальной алмазоносности кимберлитов. На объектах ААП была проверена гипотеза о связи алмазоносности с особенностями химического и минерального состава кимберлитов. Ранее для объектов ЯАП была показана обратная корреляция содержания титана в кимберлитах (низко-, умеренно-, высокотитанистые) с алмазоносностью [41]. Для объектов ААП в сравнении с объектами ЯАП было проанализировано также содержание азота в алмазах в сочетании с их морфологическими особенностями, качеством алмазного сырья и «титанистостью» кимберлитов [1].

В результате детального изучения кристаллов алмаза кубического габитуса, типоморфных для месторождения им. М.В. Ломоносова ААП, показано, что они могут быть разделены на три морфогенетические группы. Установлено также, что тр. Архангельская и им. Карпинского-1 ААП существенно различаются набором микровключений [2], что в позволяет определить источник алмазного вещества.

В тр. Интернациональная ЯАП (Мирнинское кимберлитовое поле, Западная Якутия) существенно пополнены данные по минералогии кимберлитовой породы открытием и исследованием трех новых минералов. Мирныйит $\text{SrZr}^{4+}(\text{Ti}^{4+}_{12}\text{Cr}^{3+}_6)\text{Mg}_2\text{O}_{38}$ и ботуобинскит $\text{SrFe}^{2+}(\text{Ti}^{4+}_{12}\text{Cr}^{3+}_6)\text{Mg}_2[\text{O}_{36}(\text{OH})_2]$, оба из группы кричтонита, открыты во включениях в Cr-содержащий пироп, попугаеваит $\text{Ca}_3[\text{B}_5\text{O}_6(\text{OH})_6]\text{FCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ – на контакте кимберлита и эвапоритовой породы [2].

В 2021 году изучена минералогия алмаза двух трубок кимберлитов типа II Накынского кимберлитового поля (ЯАП) в сравнении с алмазом из тр. Архангельской (ААП) кимберлита того же типа, а также на подборке якутских и архангельских алмазов из низкотитанистых кимберлитов оценена возможность разделения образцов по принадлежности к разным трубкам методом ЭПР-спектроскопии.

2.3.1 Новые данные по минералогии алмаза из месторождений трубок Нюрбинская, Ботуобинская (Накынное кимберлитовое поле, Средне-Мархинский район, Якутия)

Накынное кимберлитовое поле расположено в пределах Средне-Мархинского алмазоносного района, изучены алмазы из трубок Нюрбинская и Ботуобинская. Это уникальные трубки-месторождения по петрохимическим и геохимическим особенностям пород, количеству, соотношению и составу минералов тяжелой фракции, значительному количеству, качеству и другим особенностям алмазов.

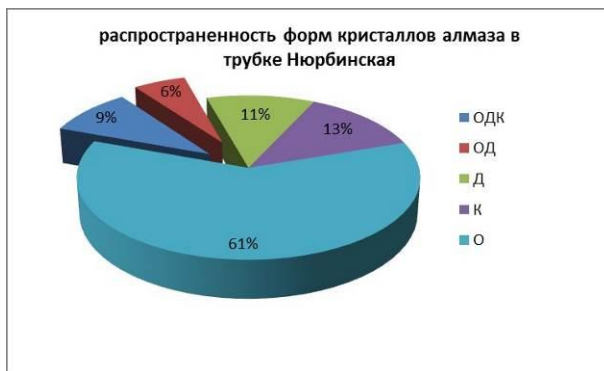
Одними из последних найденных в Якутии месторождений алмаза являются месторождения Накынского поля – тр. Нюрбинская и Ботуобинская. На сегодня в этом поле идет разработка месторождения алмазов Нюрбинская, осваивается на начальном этапе тр. Ботуобинская и идет подготовка к освоению тела Майское.

Особо отметим, что все эти тела относятся к кимберлитам типа II, т.е. в них малый вес тяжелой фракции при преобладании в ней хромитов и пироба, практически нет пикроильменита. И петрохимически, и минералогически эти тела отличаются от подобных тел Мир, Удачная и др., относящихся к кимберлитам типа I, для которых высок выход тяжелой фракции при широком распространении в ней пикроильменита и практически полное отсутствие хромитов. Конечно, при этом и алмаз должен обладать некоторыми индивидуальными характеристиками, которые мы и исследовали.

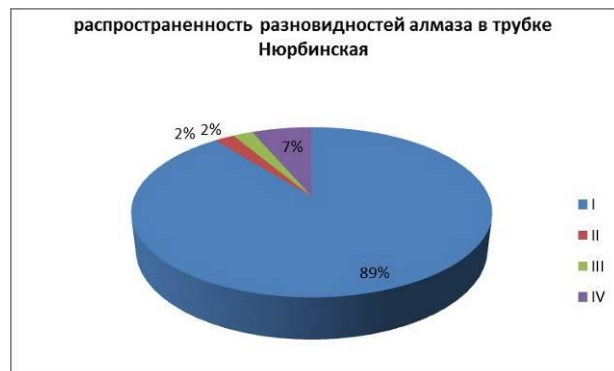
Минералогическая характеристика алмазов. Кристалломорфология. По содержанию алмазов различных габитусных форм тр. Нюрбинская и Ботуобинская относятся к месторождениям с заметным преобладанием кристаллов октаэдрической (61%), реже

комбинационной (11%) форм (рис. 2.3.1.1–3). Наблюдается общая тенденция к увеличению доли плоскогранных кристаллов в крупных размерно-весовых группах. Наиболее часто встречаются *октаэдры* со ступенчато-пластинчатым и полицентрическим характером развития граней алмаза. Немного меньше октаэдров с округлыми ребрами – 5.0% и остросеберных октаэдров 6.4%. Среди плоскогранных алмазов из тр. Ботуобинская отмечается высокое (6–14%) содержание высококачественных ювелирных камней: высокопрозрачных плоскогранных остросеберных октаэдров без малейшего нацвета. Распространены в трубках кристаллы *псевдоромбододекаэдрического* и *псевдокубического габитуса*, образованные при сочетании полицентрического и антискелетного механизмов роста граней (от 24 до 10% при увеличении размера кристаллов до 2 г в тр. Нюрбинская и до 2.8% в тр. Ботуобинская) при очень низких содержаниях типичных округлых алмазов (0.5% и 2.5% соответственно). В партии алмазов 2013–2014 гг. имеются кристаллы *кубического габитуса*, относящиеся ко *II, III разновидностям*, в сумме они занимают второе место по распространенности – 13% (рис. 2.3.1.2). Наличие алмазов *IV разновидности* является *одной из типоморфных особенностей алмаза трубок Накынского поля*. Представлены алмазы в оболочках полупрозрачными и непрозрачными индивидами октаэдрического, кубического, тетрагексаэдрического и комбинационного габитуса. По характеру окраски выделяются два ряда: кристаллы с оболочкой молочно-белого до серого цвета и кристаллы с желтой до желто-зеленой и зеленой оболочкой, составляющие в сумме до 10%, причем они встречаются во всех классах крупности. На алмазах *IV разновидности* часто развиты каналы травления и множественные треугольные фигуры травления. Отметим, что среди алмазов *IV разновидности* доминируют кристаллы с незначительной по толщине прозрачной или просвечивающей оболочкой, хотя встречаются и плотные агрегаты комбинационной или кубической формы с толстой непрозрачной рубашкой.

Окраска. В основном образцы прозрачны. Большую часть занимают бесцветные кристаллы – 46% (рис. 2.3.1.3). Кристаллы, имеющие оттенок, распространены меньше, составляют 35%. Большинство из них несут желтый и коричневый оттенок, но встречаются образцы и с розовым оттенком. Цветные кристаллы занимают третье место по распространенности в трубке (14%) и представлены в основном коричневыми и желтыми разновидностями (рис. 2.3.1.4). Степень сохранности кристаллов алмаза в тр. Нюрбинская ниже, чем в Архангельской, количество целых кристаллов составляет 50% (рис. 2.3.1.5).

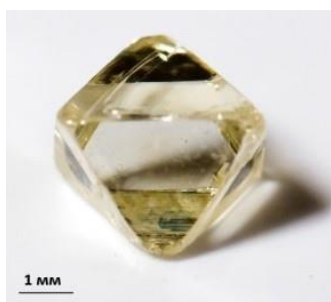


а

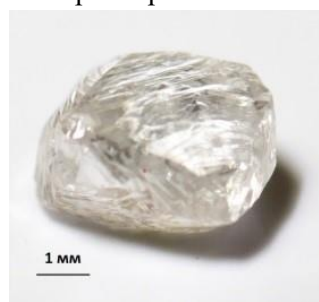


б

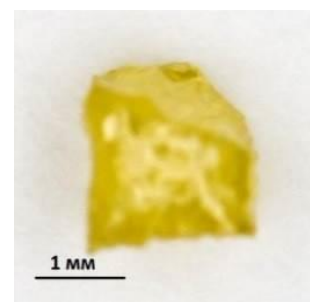
Рисунок 2.3.1.1 – Соотношение различных габитусных форм кристаллов (а) и разновидностей (б) в тр. Нюрбинская



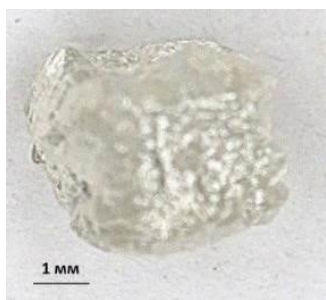
а



б



в



г

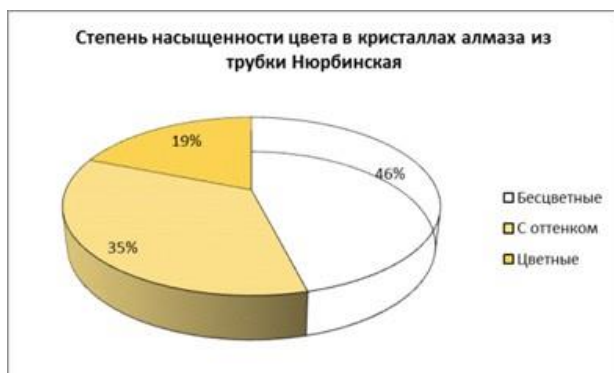


д

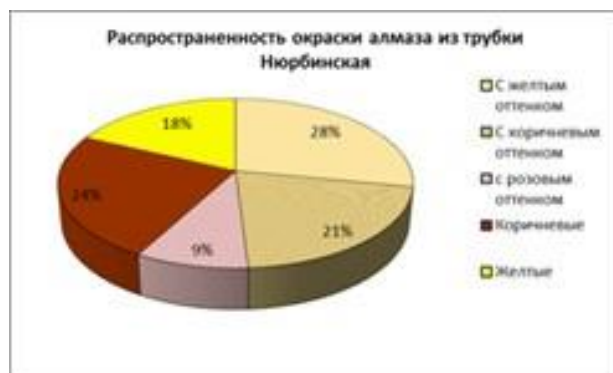


е

Рисунок 2.3.1.2 – Типичные алмазы из тр. Нюрбинская различной формы: а – гладкогранный октаэдр I разновидности с желтым оттенком с незначительным сколом у вершины; б – бесцветный додекаэдр со снопидной штриховкой, разновидность I; в – куб желтого цвета с ячеистой скульптурой на гранях и с протоматическим сколом, разновидность II; г – бесцветный куб, разновидность III; д – додекаэдр в желто-зеленой оболочке с глубокими каналами травления, разновидность IV; е – комбинационный кристалл октаэдр–ромбододекаэдр в зеленовато-серой оболочке, разновидность IV



а

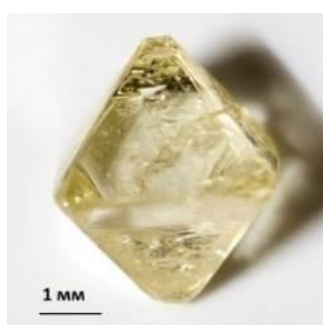


б

Рисунок 2.3.1.3 – Диаграммы распространения кристаллов в тр. Нюрбинская по окраске: а – насыщенность окраски, б – цвет алмаза



а



б



в



г



д



е

Рисунок 2.3.1.4 – Алмазы октаэдрического габитуса из тр. Нюрбинская с различной окраской: а – бесцветный, б – с желтым оттенком, в – с коричневым оттенком, г – с розовым оттенком, д – цвет дымчато-коричневый, е – цвет желтый



Рисунок 2.3.1.5 – Степень сохранности кристаллов алмаза из тр. Нюрбинская. Со сколом – сохранено более 1/3 части от объема кристалла, осколок – менее 1/3 части

Минеральные включения в алмазах из тр. Нюрбинская. Первое место по распространенности (40%) среди включений в алмазах из тр. Нюрбинская занимают эпигенетические черные включения сульфидов, расположенные в дисковидных трещинах. В таких включениях в центре прослеживается бесцветное округлое зерно (оливин). Сильно распространены неправильные пластинчатые включения (30%) – графит (рис. 2.3.6), часто развивающийся по внутренним трещинам алмаза. Встречаются объемные оформленные кристаллические черные включения хромита (20%). Значительно реже (5%) – бесцветные включения изометричной формы – оливин, а также включения граната красного и красно-коричневого цвета (5%). Следует отметить, что в тр. Нюрбинская наблюдается большое количество кристаллов с включениями типа «алмаз в алмазе» (рис. 2.3.1.6).

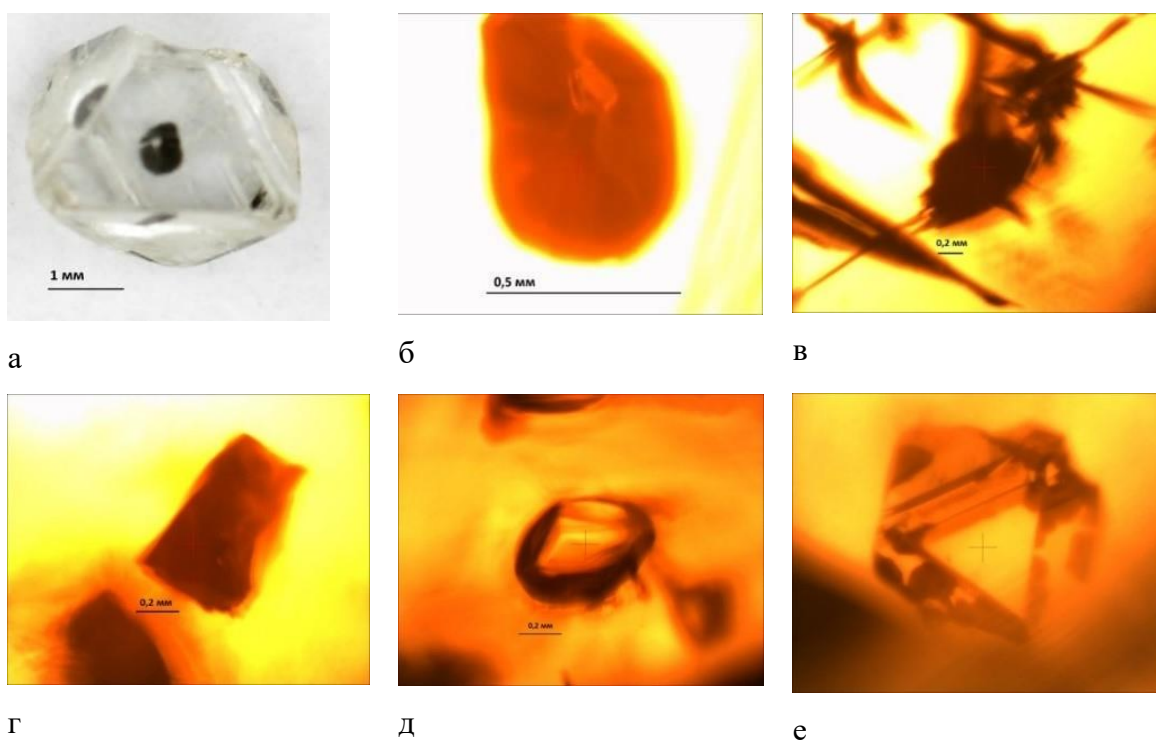


Рисунок 2.3.1.6 – Разнообразие минеральных включений в алмазах тр. Нюрбинская: а – ассоциация оливин – сульфид (обр. 805-38-4), б – дисковидное черное включение с бесцветным включением в центре (обр. 805-38-4), в – пластинчатые включения графита неправильной формы, г – хромит (обр. 804-10-1), д – оливин (обр. 809-16-2), е – алмаз в алмазе с графитизацией на гранях (обр.804-12-5)

Сравнительная характеристика морфологии кристаллов алмаза из трубок Нюрбинская, Ботубинская и Архангельская. Интересно сравнить морфологию кристаллов алмаза из трубок Нюрбинская и Ботубинская с морфологией алмазов из тр. Архангельская Архангельского региона. Все эти тела относятся к кимберлитам типа II. Алмазы из тр. Нюрбинская и Архангельская характеризуются преобладанием I разновидности. В тр. Архангельская распространены кристаллы додекаэдрического габитуса, в то время как Нюрбинская характеризуется преобладанием плоскогранных октаэдров. Возможно, подъем кимберлитовой магмы в тр. Архангельская был более длительным и кристаллы подвергались

сильному травлению. Стремительный подъем кимберлитовой магмы тр. Нюрбинская способствовал сохранению октаэдрического габитуса кристаллов [42].

Кристаллы из тр. Нюрбинская и Архангельская характеризуются преобладанием полицентрического развития граней, что свидетельствует о пересыщении среды кристаллизации углеводородами, а также о формировании алмазов в термодинамических условиях эклогитового парагенезиса [43]. Наличие цветных алмазов, алмазов в оболочках IV разновидности, а также губического габитуса свидетельствует о дискретном алмазообразовании в трубках и большом термическом градиенте, способствующем формированию дефектной структуры и захвату большого количества примесей кубическими секторами роста [42].

Дефектно-примесный состав. Фотолюминесценция. Большинство кристаллов из тр. Нюрбинская (90%) имеют свечение в ультрафиолетовом диапазоне с равномерным распределением, но встречаются и с зональным. Отмечено преобладание голубого цвета люминесценции (рис. 2.3.1.7а, б) связанного с N3-дефектом, в меньших количествах встречены кристаллы с желто-зеленым свечением (рис. 2.3.7в), связанным с S2-дефектом.

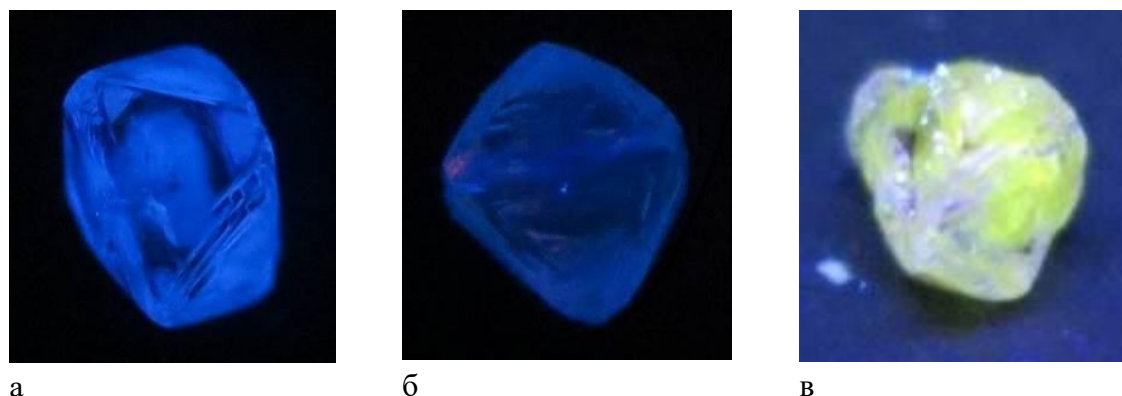


Рисунок 2.3.1.7 – Свечение кристаллов в УФ-лучах: а – кристалл алмаза октаэдрического габитуса с зональным голубым свечением, общий вид; б – кристалл алмаза октаэдрического габитуса со слабым синим свечением, в – кристалл алмаза додекаэдрического габитуса с зональным желто-зеленым свечением

Преобладание желто-зеленого цвета люминесценции в кристаллах алмаза из тр. Архангельская, вызванного S2-дефектом [44], свидетельствует о наличии в кристаллах пластической деформации. Это связано с тем, что архангельские алмазы характеризуются повышенной напряженностью кристаллической решетки. Преобладание равномерного голубого свечения алмазов из тр. Нюрбинская, связанного с дефектом N3, свидетельствует о росте кристаллов в спокойных, стабильных условиях и отсутствии внутреннего напряжения кристаллической решетки.

2.3.2 Сравнительный анализ алмазов трубок Нюрбинская, Айхал (Якутия) и Архангельская (Архангельская область) по данным ЭПР-спектроскопии

При минералогическом и спектроскопическом исследовании алмазов из трубок Нюрбинская, Айхал и Архангельская было установлено, что многие из образцов попадают в одну морфогенетическую группу, поэтому необходимо привлечение дополнительных методов для решения задачи идентификации источника алмаза. Методом ЭПР были изучены азотные примесные центры в алмазах трубок Нюрбинская, Айхал (Якутия, кимберлиты типа II) и Архангельская (Архангельский регион, кимберлиты типа II). Проведено выявление для азотных центров в алмазах этих трубок возможных различий в типах, их концентрациях и соотношениях. Цель работы – оценка возможности разделения образцов по принадлежности к разным трубкам *методом ЭПР-спектроскопии*.

Наиболее часто используемая на сегодняшний день классификация алмазов разработана на основании анализа количества и типов дефектов кристаллической структуры, выявляемых методами *ИК-спектроскопии*. Эта классификация достаточно полно отражает вхождение примеси азота в кристаллическую структуру алмаза в виде основных (по концентрации) форм – А-, В- и С-дефектов. Однако с точки зрения ЭПР-спектроскопии ИК-классификация рассматривает типы азотных центров в алмазе несколько обобщенно, и часто встречающиеся, пусть и в меньших концентрациях, центры типа P2, N2, W7 и W21, не отражающиеся на ИК-спектрах, выпадают из рассмотрения.

Спектры ЭПР снимались на спектрометре Varian E-115 в X-диапазоне (~ 9,4 ГГц) при амплитуде модуляции 0.1 мТл, частоте модуляции 100 кГц и мощности СВЧ-излучения 0.2–5 мВт. Для определения концентраций парамагнитных центров в кристаллической структуре алмаза использовался метод сравнения интегральных интенсивностей соответствующих центров на спектрах ЭПР с интенсивностями спектра эталонного образца. В качестве эталонного в данном случае был выбран кристалл алмаза А-199 из тр. Архангельская. Исследования, выполненные в СПГГИ на фурье-спектрометре VERTEX-70 с микроскопом Nurexion1000, Bruker, показали, что образец А-199 не содержит А- и В- азотных центров, но зато обладает высокой концентрацией С-центров (P1 по ЭПР-систематике). Концентрация С (P1)-центров в образце А-199, расчет которой был выполнен в СПГГИ на основе методики Г.К. Хачатрян, составила 275 ppm. Результаты измерений для исследованных образцов алмаза трубок Нюрбинская, Айхал и Архангельская представлены в таблицах 2.3.2.1–3.

Таблица 2.3.2.1 – Парамагнитные центры и их концентрации в исследованных кристаллах алмазов тр. Нюрбинская

Кристалл	Типы центров и их концентрации, ppm				
	P1	P2	W7	W21	N2
804-6-1	0.136	2.058	-	0.004	-
804-6-2	0.057	2.821	-	0.004	-
804-9-3	-	-	-	-	0.011
804-11	0.314	-	-	-	-
804-12-2	-	0.003	-	-	-
804-12-3	-	0.208	--	-	0.004
804-12-4	-	0.044	-	-	0.003
804-13-2	0.016	0.227	-	-	-
804-13-4	0.018	0.283	-	-	-
804-13-6	0.015	0.195	-	-	-
804-14	0.051	1.009	-	-	-
804-22	0.056	2.683	0.022	-	-
805-1-1	0.015	0.248	-	-	-
805-2-1	0.027	0.292	-	-	-
805-5-1	0.039	1.999	-	0.003	-
805-6-1	0.060	4.027	-	0.006	-
805-7-1	0.047	2.734	-	0.004	-
805-7-2	0.035	1.988	-	0.003	-
805-8-1	0.084	5.566	--	0.008	-
805-9-1	0.098	9.325	-	0.010	-
805-9-2	0.110	6.378	-	0.010	-
805-24-1	-	-	0.007	-	0.205
805-26-1	0.060	-	-	-	0.016
805-31-1	5.376	-	-	-	-
805-38-1	0.031	0.626	-	-	-
805-38-2	0.023	0.409	-	-	-
805-38-3	0.035	0.676	-	-	-
805-38-4	0.184	-	-	-	-
805-39-1	-	-	2.105	-	-
805-45-1	2.088	-	-	-	-
805-46-1	0.023	0.206	-	-	0.002
805-46-2	0.036	0.199	-	-	0.030
805-46-3	-	0.034	-	-	0.006
805-47-1	0.015	-	-	-	0.086
805-47-2	-	0.079	-	-	0.008
805-61-2	17.436	-	-	-	-
805-72-1	7.490	-	-	-	-
805-72-2	6.232	-	-	-	-

Для кристаллов алмаза из трубок Архангельская и Нюрбинская было отмечено возрастание интенсивности проявления парамагнитных центров P1 с увеличением насыщенности желтого цвета (рис. 2.3.2.1).

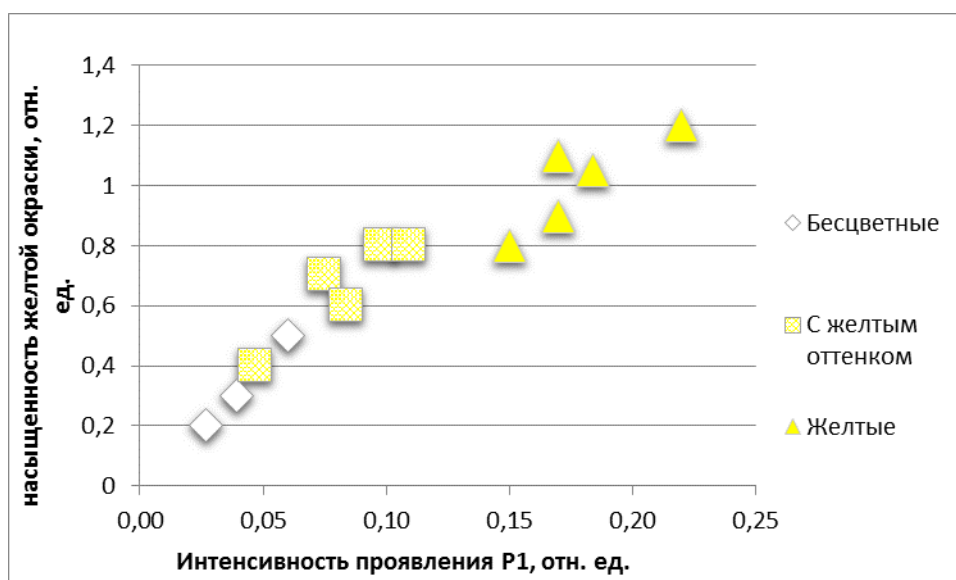


Рисунок 2.3.2.1 – Зависимость степени проявления парамагнитных центров P1 от степени насыщенности желтого цвета в кристаллах алмаза из тр. Архангельская и Нюрбинская

Таблица 2.3.2.2 – Парамагнитные центры и их концентрации в исследованных кристаллах алмазов тр. Айхал

Кристалл	Типы центров и их концентрации, ppm			
	P1	P2	W7	N2
782-1	-	-	-	0.005
782-2	-	-	-	0.005
782-11	-	4.983	-	-
782-13	0.013	1.190	0.014	-
782-14	0.016	1.583	-	-
782-15	-	-	0.009	0.662
782-18-1	-	-	-	0.121
782-18-2	-	-	-	0.035
782-18-3	-	-	-	0.176
782-22	0.203	-	-	-
782-28-1	0.003	1.362	-	-
782-28-2	0.032	5.478	0.017	-
782-28-3	-	-	-	0.342
782-28-4	-	-	0.001	0.131
782-29	-	-	-	0.428
786-4	0.064	1.434	-	-
786-5-1	-	4.355	-	-
786-5-2	-	3.560	-	-
786-13-1	-	2.760	-	-
786-24	-	-	-	0.240
813-11-1	63.001	-	-	-
813-12-1	31.377	-	-	-

Таблица 2.3.2.3 – Парамагнитные центры и их концентрации в исследованных кристаллах алмазов тр. Архангельская

Кристалл	Типы центров и их концентрации, ppm			
	P1	P2	W7	N2
1786-3-1	0.034	-	-	-
1786-4-1	-	-	-	0.111
1786-10-2	0.004	0.296	-	-
1786-10-4	-	0.043	-	-
1786-14-1	6.709	-	-	-
1786-14-2	0.339	1.100	-	-
1786-24-2	5.796	-	-	-
1786-24-4	-	0.032	-	-
1786-26-3	-	0.071	-	0.003
1786-29-1	-	0.009	-	-
1786-31-3	-	3.183	-	-
1786-35-1	-	0.141	-	-
1786-45-5	0.003	0.116	0.007	-
1786-47-1	5.020	-	-	-
1786-47-2	-	0.438	0.025	-
1786-47-4	-	-	-	0.051

В исследованных кристаллах трубок Нюрбинская, Айхал и Архангельская были обнаружены центры P1, P2, N2, W7, W21. При анализе полученных экспериментальных данных выявлены следующие закономерности:

1. Среди исследованных образцов алмаза выявлены кристаллы с относительно высокой концентрацией центров P1. Важным отличительным признаком таких образцов было полное отсутствие других типов азотных центров. Ввиду того, что никакой информации о характерных соотношениях центров разных типов извлечь из спектров этих кристаллов не представлялось возможным, а высокие концентрации P1-центров вносили сильный дисбаланс в расчеты, эти образцы не учитывались при дальнейшем анализе.
2. В алмазах тр. Архангельская наиболее часто обнаруживаемым типом центров является P2, он же обладает наиболее высокими концентрациями. Устойчивых ассоциаций центров различного типа (при исследовании данной выборки) не обнаружено.
3. В алмазах тр. Айхал наиболее часто встречающийся центр – N2, хотя максимальные концентрации (среди образцов с несколькими типами центров) приходятся на центр P2.
4. В алмазах тр. Нюрбинская наиболее часто встречающийся центр – P1, хотя максимальные концентрации (среди образцов с несколькими типами центров) приходятся на центр P2.
5. Характерным для части выборки (9 из 33 – более 27%) алмазов тр. Нюрбинская является присутствие центра W21, не обнаруженного в образцах тр. Айхал и Архангельская. Несмотря на низкие концентрации, центр легко диагностируется и образует устойчивую ассоциацию P1 – P2 – W21.

6. Были рассчитаны средние установленные концентрации азотных центров по выборкам образцов алмаза из тр. Нюрбинская, Айхал и Архангельская (исключая алмазы с центрами P1 высоких концентраций из п.1). Результаты расчетов представлены в таблице 2.3.2.4.

Таблица 2.3.2.4 – Средние установленные концентрации азотных центров по выборкам образцов алмазов из трубок Нюрбинская, Айхал и Архангельская

Трубка	P1	P2	W7	W21	N2	Общее
Нюрбинская, средние концентрации (из обнаруженных)	0.06	1.70	0.71	0.01	0.04	2.52
Айхал, средние концентрации (из обнаруженных)	0.06	2.97	0.01	–	0.21	3.25
Архангельск, средние концентрации (из обнаруженных)	0.08	0.54	0.02	–	0.06	0.69

Согласно полученным данным, общие концентрации азотных центров в алмазах тр. Айхал выше, чем в алмазах тр. Нюрбинская, и значительно выше, чем в алмазах тр. Архангельская. Это соотношение определяется концентрациями центров P2, которые резко превалируют над остальными во всех образцах (кроме исключенных из рассмотрения образцов с центрами P1 высоких концентраций из п. 1). Образцы алмазов из тр. Нюрбинская отличает повышенная сравнительно с образцами других трубок средняя концентрация центров W7, а также наличие центров W21. Образцы алмазов из тр. Айхал отличает повышенная сравнительно с образцами других трубок средняя концентрация центров N2.

Были рассчитаны средние распространенности азотных центров по выборкам образцов алмаза из тр. Нюрбинская, Айхал и Архангельская. Их величины определялись как произведения средних установленных концентраций на процент встречаемости центра. Результаты расчетов средних распространенностей представлены в табл. 2.3.2.5, а их соотношения – на рис. 2.3.2.2–4.

Таблица 2.3.2.5 – Средние распространенности азотных центров по выборкам образцов алмазов из тр. Нюрбинская, Айхал и Архангельская

Трубка		P1	P2	W7	W21	N2
Нюрбинская, распространенности	средние	0.050	1.343	0.065	0.002	0.011
Айхал, распространенности	средние	0.015	1.214	0.002	-	0.098
Архангельская, распространенности	средние	0.024	0.339	0.002	-	0.010

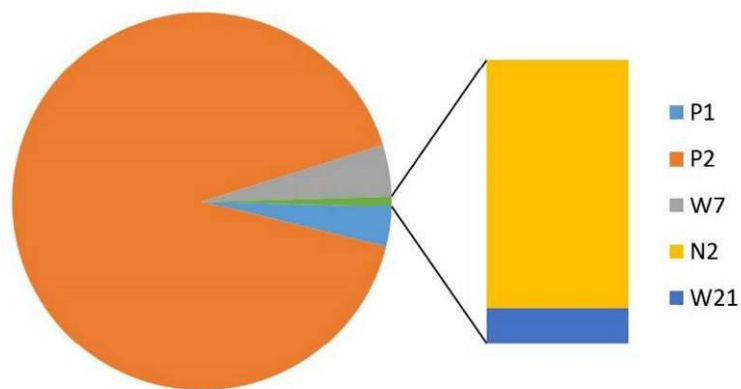


Рисунок 2.3.2.2 – Соотношения средних распространенностей азотных центров по выборке образцов алмазов из тр. Нюрбинская

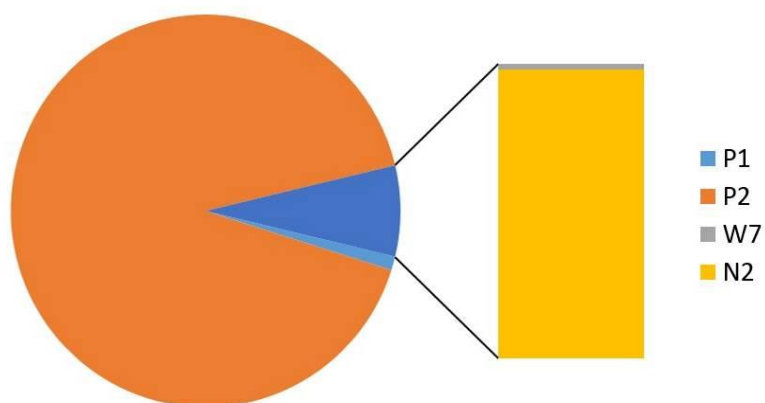


Рисунок 2.3.2.3 – Соотношения средних распространенностей азотных центров по выборке образцов алмазов из тр. Айхал

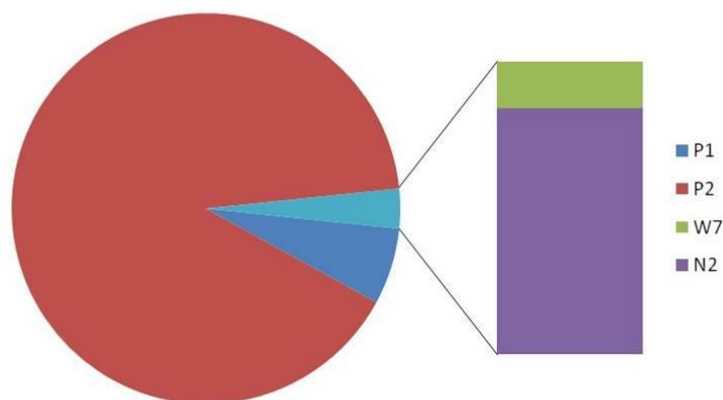


Рисунок 2.3.2.4 – Соотношения средних распространенностей азотных центров по выборке образцов алмазов из тр. Архангельская

Проведенное сравнительное исследование парамагнитных центров в алмазах I разновидности с сопоставимыми концентрациями азотно-вакансионных дефектов, выявляемых методом ИК-спектроскопии, показывает **принципиальную возможность различить по набору дефектов алмазы из разных тел кимберлитов низкотитанистого типа.**

2.4 Новые данные по минералогии редкометалльных гранитных пегматитов

В продолжение систематического изучения минералогии редкометалльных пегматитов получены новые данные по ряду объектов. В *пегматитах Карасу-Каравишинского месторождения* (Туркестанский хр., Киргизия) доизучен ранее открытый нами новый минерал акоповаит $\text{Li}_2\text{Al}_4(\text{OH})_{12}(\text{CO}_3)(\text{H}_2\text{O})_3$ [45].

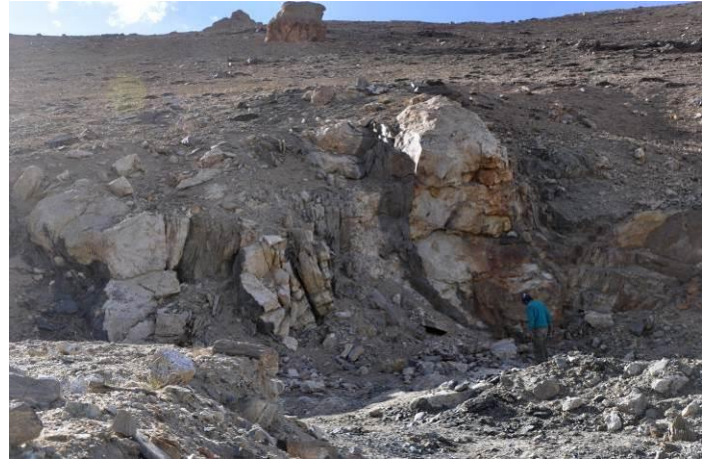
Получены новые данные по минералогии *редкометалльных гранитных пегматитов Намангутского пегматитового поля* (крайний ЮЗ Памир, Ишкаимский р-н Горно-Бадахшанской АО, Таджикистан) [2, 4]: изучен характерный акцессорный циркон с повышенным содержанием урана и тория.

В *миароловом гранитном пегматите Лесхозовский*, правый борт реки Шахдары (приток реки Гунт) в среднем течении (ЮЗ Памир, Рошткалинский р-н ГБАО, Таджикистан) открыт и изучен новый минерал **шахдараит-(Y)** ScYNb_2O_8 [46]. В 2021 году обнаружена **цезиевая минерализация**, представленная Cs-вольфрамом и Cs-слюдой, близкой к нанпингиту. Минералы находятся в стадии изучения.

Продолжены исследования минералогии *миароловых пегматитов Восточного Памира* (ГБАО, Таджикистан). *Пегматитов Рангкульского пегматитового поля*: жил Мика и Малыш, где детально изучен **висмутоколумбит** BiNbO_4 из миароловых полостей (второе описание в мире). Продолжены работы по изучению минералогии *Кукуртского пегматитового поля*: пегматитов Дорожный (рис. 2.4.1), Амазонитовый, Топазовый. Поле расположено в 45 км к востоку от районного центра, п. Мургаб. В геологическом плане пегматитовое поле находится в пределах Музкол-Рангкульского антиклинория, в ядре которого обнажается выступ докембрийского фундамента. Миароловые пегматиты пространственно и генетически связаны с лейкократовыми двуслюдяными гранитами альпийского возраста шатпутского интрузивного комплекса [47, 48]. Пегматитовые тела залегают в экзоконтакте массива шатпутских гранитов среди пород сарыджилгинской свиты (PR₃?), представленных гнейсами, кристаллическими сланцами, кварцитами, песчаниками, мраморами, метаморфизованными в условиях амфиболитовой и эпидот-амфиболитовой фаций. Проведено изучение зональности **бадахшанита-(Y)** $\text{Y}_2\text{Mn}_4\text{Al}(\text{Si}_2\text{B}_7\text{BeO}_{24})$, открытого нами в пегматите Дорожный, для последнего характерна с редкометалльная, в том числе редкая **скандиевая минерализация** [1, 34]. Одним из объектов исследования в 2021 году был кристаллический борсодержащий **гадолинит-(Y)** (рис. 2.4.2) из пегматита Дорожный. В настоящее время опубликована работа о деформациях структуры минералов группы гадолинита с различным соотношением Be/V при нагревании [49].



а



б

Рисунок 2.4.1 – Кукуртский пегматитовый узел: а – вид на долину реки Кукурт; б – пегматит Дорожный, правый борт р. Кукурт



Рисунок 2.4.2 – Кристалл гадолинита-(Y) в микроклине с кварцем, пегматит Дорожный. Ширина поля зрения 15 см

Впервые на Кукурте в 2021 году обнаружен **браннерит** UTi_2O_6 . Представлен крупным плохообразованным кристаллом (рис. 2.4.3). Минерал метамиктный. После прокаливания дает четкую порошкограмму смеси браннерита с оксидами урана. Изучение минерала продолжается.



Рисунок 2.4.3 – Кристалл браннерита размером 4 x 3 x 2 см. Кукурт, ГБАО, Таджикистан

При изучении образцов из редкометалльных пегматитов Пакистана (Пешавар) открыт и исследован новый редкоземельный бериллосиликат **хинганит-(Nd)** $\text{Nd}_2\text{Be}_2\text{Si}_2\text{O}_8(\text{OH})_2$ [50].

2.5 Новые данные по минералогии щелочных массивов

Редкоземельная минерализация месторождения Мочалин Лог (Вишневые горы, Южный Урал, Россия)

Продолжена систематическая работа по редкоземельной минерализация Мочалина Лога и обобщению полученных результатов [1–4, 18, 51]. Это редкоземельное проявление возникло в результате фенитизации гранито-гнейсового и пегматитового субстрата в экзоконтакте щелочной интрузии Потаниных гор в северной части *Ильмено-Вишневогорского щелочного комплекса*. Редкоземельная минерализация найдена в полиминеральных нодулях. Минералы очень часто образуют тонкие срастания и во многих случаях характеризуются значительной внутрифазовой неоднородностью, в частности широкими вариациями соотношений лантаноидов. Изучения интересного и сложного объекта продолжается более 160 лет. Современные аналитические возможности позволили гораздо детальнее изучить сложную минерализацию, что привело к открытию ряда новых минералов и существенному расширению общего списка минералов объекта. Редкоземельная минерализация Мочалина Лога насчитывает 51 минеральный вид, девять из которых открыты в этом объекте начиная с 2018 года с участием сотрудников Минмузея [1–

4, 51], в том числе шесть за отчетный период. Описаны в [1, 2], а открытый в 2021 году **гидроксилбастнезит-(La)** – в разделе 1.

Новые данные по минералогии других щелочных массивов

На территории других стран СНГ сотрудниками музея изучаются щелочные массивы Киргизии (Джелисуиский, Ходжаачканский, Матчинский) и Таджикистана (Дарай-Пиёзский). В результате систематического минералогического исследования уникального *щелочного массива Дарай-Пиёз* (Алайский хр., Таджикистан) с редкой цезиевой минерализацией открыты и изучены **два новых цезиевых минерала**: крейтерит $\text{CsLi}_2\text{Fe}^{3+}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{F},\text{OH})_2$ [52] и фторапофиллит-(Cs) $\text{CsCa}_4\text{Si}_8\text{O}_{20}\text{F}\cdot 8\text{H}_2\text{O}$ [33] и новый редкоземельный минерал дуткевичит-(Ce) $\text{NaZnBa}_2\text{Ce}_2\text{Ti}_2\text{Si}_8\text{O}_{26}\text{F}\cdot \text{H}_2\text{O}$ [53].

В рамках систематического исследования минералогии *Ковдорского щелочно-ультраосновного массива* (Кольский полуостров, Россия) проведено физико-химическое изучение природных водных ортофосфатов магния – **бобьерита** $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2\cdot 8\text{H}_2\text{O}$ и **ковдорскита** $\text{Mg}_2(\text{PO}_4)\text{OH}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ методами порошковой рентгенографии, инфракрасной спектроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния и термического анализа [12].

Получены новые данные для ранее открытого в метасоматитовых скарнах Ковдора нового редкоземельного минерала из группы везувиана **манаевита-(Ce)** $\text{Ca}_{11}(\text{Ce},\text{Ca},\text{H}_2\text{O})_8\text{Mg}(\text{Mg},\text{Al})_4(\text{Mg},\text{Fe}^{3+},\text{Ti})_8[\text{Si}_2\text{O}_7]_4 [(\text{SiO}_4)_8(\text{H}_4\text{O}_4)_2](\text{OH})_9$ – первого редкоземельного члена группы и также первого в группе с замещением ортосиликатной группы на H_4O_4 , как в гидрогранатах [13]. Таким образом, наряду с минералогией Ковдорского массива дополнена кристаллохимия группы везувиана.

Новые данные получены по минералогии рекордного по количеству находок новых и редких минералов и качеству образцов *Ловозерского щелочного массива* (Кольский п-ов, Россия). На г. Карнасурт найдены и описаны и новый член группы содалита **сапожниковит** $\text{Na}_8(\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24})(\text{HS})_2$ (охарактеризован в разделе 1) и новый член группы эвдиалита **сергеванит** $\text{Na}_{15}(\text{Ca}_3\text{Mn}_3)(\text{Na}_2\text{Fe})\text{Zr}_3\text{Si}_{26}\text{O}_{72}(\text{OH})_3\cdot \text{H}_2\text{O}$ [54]. Открытый в *щелочно-ультраосновном массиве Одихинча* (Красноярский край, Россия) новый минерал **одихинчаит** $\text{Na}_{10}\text{Sr}_3\text{Ca}_6\text{Mn}_3\text{Zr}_3\text{NbSi}_{25}\text{O}_{73}(\text{OH})_3(\text{CO}_3)\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ [20] также пополнил группу эвдиалита, насчитывающую сейчас 30 членов.

2.6 Новые данные по минералогии рудных месторождений

2.6.1 Новые данные по минералогии Воронцовского золоторудного месторождения (Северный Урал)

Систематически изучено и детально охарактеризовано минеральное разнообразие руд *Воронцовского золоторудного месторождения* (Свердловская область, Северный Урал,

Россия), включающих редкую таллиевую минерализацию [1–4, 17, 55–63]. Воронцовское месторождение локализовано среди порфиритов и туфов андезитового состава, туффитов и известняков раннедевонского возраста, местами скарнированных под воздействием Ауэрбаховского массива. По разнообразию и своеобразию Tl–Hg–Mn–As–Sb–S-минерализации Воронцовское золоторудное месторождение является уникальным не только в России, но и в мире. Всего на месторождении установлено 209 минералов, включая девять новых минеральных видов, открытых с участием наших сотрудников. За отчетный период опубликованы данные по пяти из них – сульфосолям, четыре из которых являются минералами таллия: гладковскиит $MnTlAs_3S_6$ [61], люборжакит Mn_2AsSbS_5 [17], походяшинит $Cu_2Tl_3Sb_5As_2S_{13}$ [62], гунгерит $TlAs_5Sb_4S_{13}$ [63] и ауэрбахит $MnTl_2As_2S_5$ [55].

Помимо этого, 89 минералов впервые описаны для Воронцовского месторождения, из них 40 – впервые найдены на территории Российской Федерации. Систематическое исследование руд этого объекта позволило установить в них девять наиболее устойчивых минеральных ассоциаций, семь из которых приурочены к карбонатным рудным брекчиям. В них диагностировано более 70 редких сульфидов, теллуридов и сульфосолей, 30 из которых содержат Tl (рассеянный элемент!), 12 – Hg и девять – Mn в качестве видообразующих элементов. В серии из четырех опубликованных статей по геологии и минералогии Воронцовского золоторудного месторождения [57–60] рассмотрены история изучения месторождения, его геологическое положение и строение, типы руд, методы исследований, а также подробно описаны девять наиболее устойчивых рудных минеральных ассоциаций, дан максимально полный на сегодня минеральный кадастр этого объекта и охарактеризованы по классам минералы.

2.6.2 Новые данные о россыпных минералах элементов платиновой группы

На Южном Урале (Челябинская обл.) были обнаружены в россыпях и изучены два новых минерала – селениды металлов платиновой группы: зайковит Rh_3Se_4 [64] в Казанской золотоносной россыпи Гогинской россыпной зоны и селенолаурит $RuSe_2$ [65] в Ингульской золотоносной россыпи Непряхинской россыпной зоны. На Гальмоэнанском массиве (Корякское нагорье, Камчатка), в россыпи Ледяной ручей, – интерметаллид куфарит $PtPb$ [66]. Эти открытия дополнили минералогию МПГ и селена.

Сведения о МПГ из объектов Памира в опубликованной литературе практически отсутствуют. В 2021 году нами изучены сперрилит, Ir-содержащий сперрилит, холлингвортит, ирарсит, теллурид палладия из проявления Гишун, ГБАО, Таджикистан (рис. 2.6.2.1), минералы системы Os–Ir–Ru, лаурит из россыпи Сангвор, Дарваз, ГБАО. Работы с минералами МПГ объектов продолжаются.

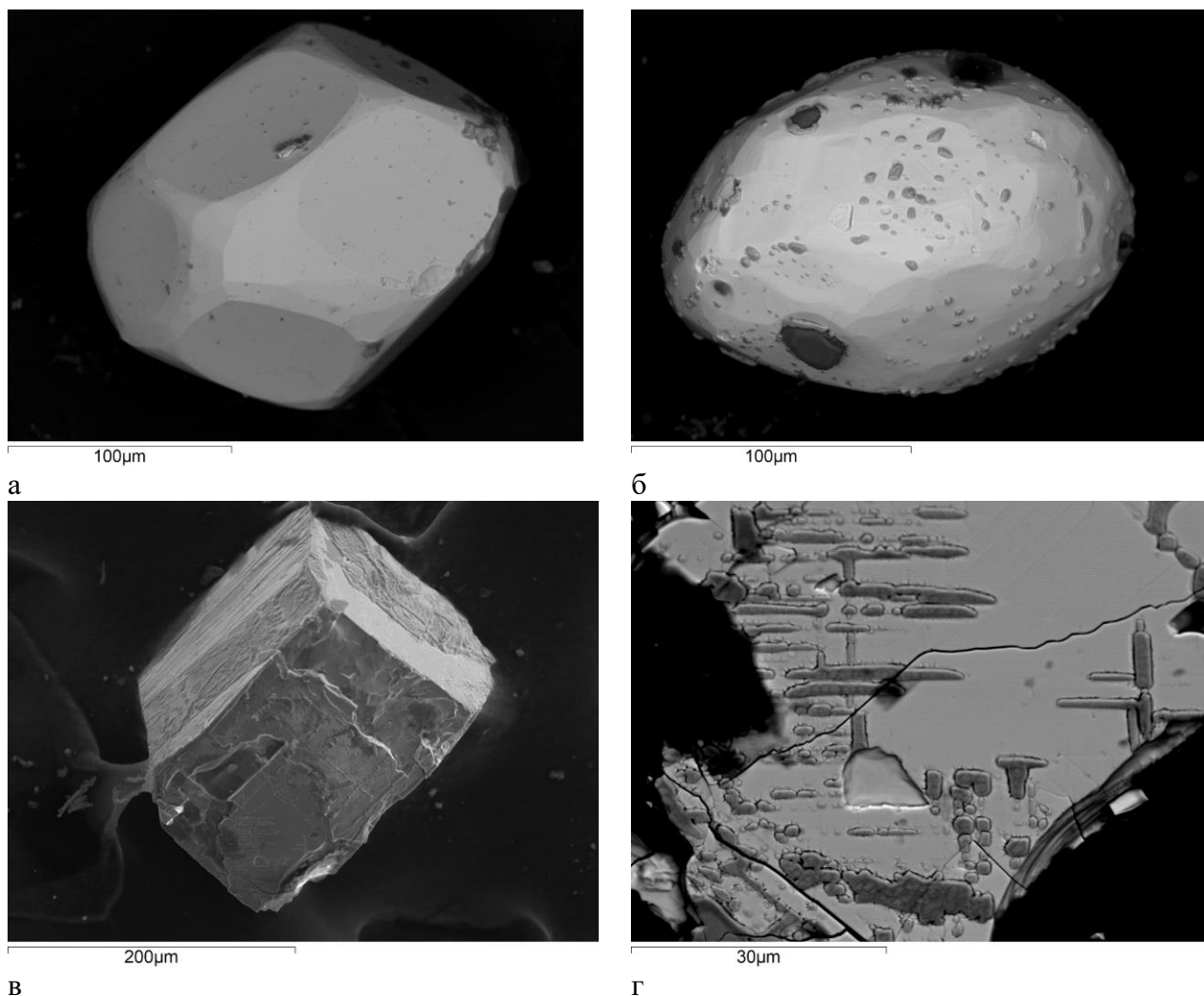


Рисунок 2.6.2.1 – Минералы элементов платиновой группы, Гишун, ГБАО: а – кристалл сперрилита; б – мелкие кристаллы холлингвортита на кристалле сперрилита, крупные темные вrostки – хромшпинелиды; в – кристалл сперрилита с минералами ряда холлингвортит–ирарсит, нарастающими на поверхность кристалла; г –эпитаксические вrostки холлингвортита в сперрилите

Специальное исследование было посвящено *методике выделения минералов МПГ* из тяжелой фракции. Такое выделение минералов из шлихов и протолочек весьма трудоемко. Может применяться прием прокалики шлихов для перевода пирита в магнитные продукты с последующей магнитной сепарацией и отделения их таким образом от немагнитных МПГ. С целью проверки возможного изменения фазового состава минералов МПГ при прокаливании шлихов были проведены опыты по прокаливанию при температурах 420 и 600 °С [67]. Для опытов по прокаливанию сперрилита использовались обломки (фракция –0.5 – +0.1 мм) крупного зерна сперрилита с рудника Октябрьский Норильского рудного поля. В результате этих опытов была показана возможность деарсенизации сперрилита при условиях, близких к прокаливанию шлихов с целью сепарации (рис. 2.6.2.2).

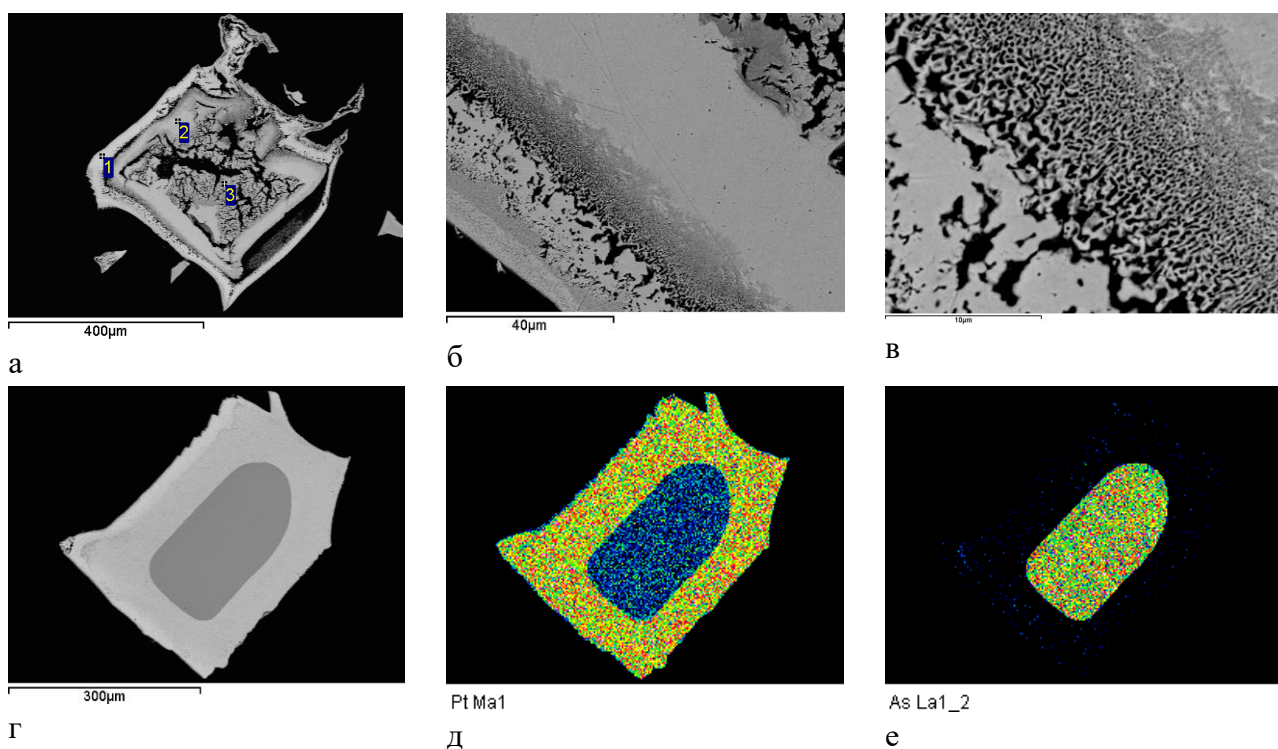


Рисунок 2.6.2.2 – Продукты прокаливания сперрилита: при температуре 600 °С (а–в), при температуре 420 °С (г–е); а–г – темно-серое – сперрилит, светло-серое – платина, фото в режиме BSE; д, е – рентгеновские карты распределения указанных элементов

2.6.3 Новые данные о минералах месторождения Блява, Южный Урал, Россия

Изучен образец **алюминокопиапита** из медно-цинкового месторождения Блява (Южный Урал, Россия) из фондов Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН (образец FMM_1_67687), представляющий собой мономинеральный плотный мелкозернистый агрегат кремового цвета. Проведено физико-химическое исследование алюминокопиапита методами порошковой рентгенографии, инфракрасной и мёссбауэровской спектроскопии, термического анализа. На высокотемпературном теплопроводящем микрокалориметре Тиана–Кальве «Сетарам» (Франция) методом высокотемпературной расплавной калориметрии растворения определена *энтальпия его образования из элементов* $\Delta_f H_{el}^0(298.15 \text{ K}) = -11826 \pm 58 \text{ кДж/моль}$. Также были оценены величины *стандартных энтропий и энергий Гиббса* образования изученного алюминокопиапита и других минералов копиапитовой группы.

Минералы группы копиапита имеют общую формулу $MFe_4^{3+}[SO_4]_6(OH)_2 \cdot 20H_2O$, где $M = Fe^{2+}, 2/3Fe^{3+}, 2/3Al^{3+}, Mg, Ca, Zn, Cu$. В составе данной группы присутствуют ферри-, ферро-, магнизо-, купро-, алюмо- и цинкокопиапит (ИМА, 2021). Минералы этой группы, среди которых алюминокопиапит генетически преобладает, имеют широкое географическое распространение. Минералы группы копиапита образуются в гипергенных условиях в районах современной вулканической деятельности; при химическом выветривании

железосодержащих минералов, особенно сульфидов на колчеданных месторождениях [68], окисление которых обычно и приводит к образованию безводных и водных сульфатов, гидроксисульфатов и других соединений. Добыча и переработка сульфидных руд дают значительное количество отвалов, в которых также происходит накопление продуктов окисления сульфидов. В дальнейшем образовавшиеся сульфаты вымываются, создавая кислотные стоки, загрязняющие окружающую среду. Экологические риски, связанные с кислотным дренажом на сульфидсодержащих рудных месторождениях, оценены в работах [69 и др.] с помощью компьютерного моделирования равновесного состояния многокомпонентных систем. Моделирование процессов минералообразования при различных температурах и давлениях является в настоящее время практически основным способом изучения истории развития планет Солнечной системы. Так, например, в работе [70] было проведено моделирование минеральных равновесий в соответствии с геохимической моделью поверхности Марса. При этом использованы оценочные значения термодинамических величин (энтальпии и энергии Гиббса образования) для многих железосодержащих соединений и минералов, в том числе копияпита [71].

Спектр инфракрасного поглощения изученного образца (рис. 2.6.3.1а) близок к спектру алюинокопияпита (№ S28) из рудника Алькапарроса (Калама, Чили), приведенному в справочном издании [72]. В высокочастотной части спектра ($2700\text{--}3600\text{ см}^{-1}$) наблюдается широкая интенсивная полоса поглощения (с максимумами около 3125 и 3400 см^{-1}), приписываемая валентным колебаниям ОН-групп, ассоциированных в молекулы воды. На высокочастотном крыле этой полосы регистрируется узкая полоса малой интенсивности при 3529 см^{-1} , которая согласно [73] может быть отнесена к валентным колебаниям гидроксильных групп из октаэдрического окружения катионов железа. Деформационные колебания молекул воды представлены узкой интенсивной полосой поглощения (максимум при 1638 см^{-1}) с плечом при 1687 см^{-1} . В области структурных колебаний регистрируется интенсивная раздвоенная полоса, соответствующая антисимметричным валентным колебаниям (1185 , 1148 , 1113 см^{-1}) и симметричным валентным колебаниям (995 см^{-1}) сульфат-иона.

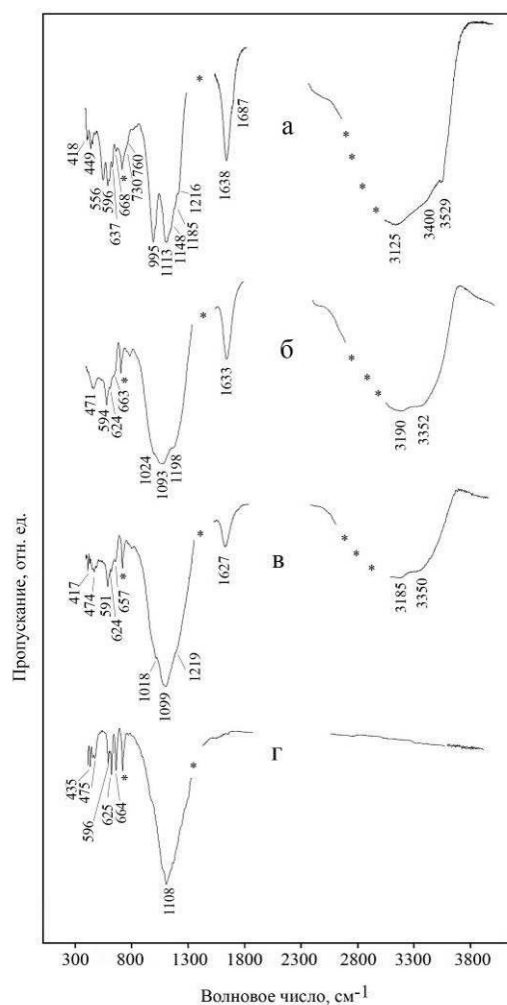


Рисунок 2.6.3.1 – Спектры ИК-поглощения изученного алюмокопаяпита (а) и продуктов его нагревания до $T = 400$ К (б), $T = 500$ К (в) и $T = 750$ К (г)

Общий вид *термогравиметрических кривых* (ТГ и ДТГ) (рис. 2.6.3.2) характерен для всех минералов группы копияпита [74, 75]. Образец начинает терять массу с существенной скоростью при температуре около 340 К, полное разложение заканчивается при 1090 К. Авторы вышеупомянутых работ относят потерю массы в интервале от 340 до 600 К к дегидратации минерала (удаление воды в молекулярной форме), в интервале от 600 до 660 К – к дегидроксизации (удаление конституционной воды в виде гидроксильных групп); в интервале 800–1090 К – к десульфатизации копияпита. Нами было проведено ИК-спектроскопическое исследование продуктов поэтапного обезвоживания изучаемого алюмокопияпита. В спектре поглощения образца, нагретого до $T = 400$ К с потерей массы $\sim 8.7\%$ (рис. 2.6.3.1б), отмечается: 1) заметное уменьшение интенсивности полосы поглощения валентных колебаний ОН-групп, входящих в молекулы воды ($3100\text{--}3400\text{ см}^{-1}$) в структуре минерала, и полосы поглощения, соответствующей конституционной воде в виде гидроксильных групп (около 3524 см^{-1}); 2) уменьшение количества воды в минерале также приводит к снижению интенсивностей полос, соответствующих либрационным колебаниям

молекул воды и ОН-групп (около 672, 624, 558 см^{-1}); 3) в области валентных колебаний сульфат-аниона (1200–990 см^{-1}) наблюдается практически полное исчезновение полосы, относящейся к симметричным валентным колебаниям тетраэдра $[\text{SO}_4]^{2-}$ (около 997 см^{-1}), что указывает на изменение структуры минерала. При этом образец кремового цвета приобретает коричневато-рыжий оттенок, свидетельствующий об образовании триоксида железа, что подтверждает начало процесса дегидроксилизации алюмокопиапита. Спектры ИК-поглощения образцов, нагретых до 500 К (этап 400–500 К с потерей 8.6% массы) и 600 К (этап 500–600 К с потерей 8.7% массы) аналогичны друг другу и обнаруживают дальнейшее уменьшение количества воды и продолжающееся изменение кристаллической структуры вещества (спектр минерала после нагрева до 500 К приведен на рис. 2.6.3.1в). Спектр образца, нагретого до 750 К (рис. 2.6.3.1 г), подтверждает полное обезвоживание минерала и наличие в безводном продукте сульфатов железа и алюминия и триоксида железа, на что указывает красно-коричневый цвет продукта прокаливания. Общее количество выделившейся при нагревании воды получилось равным 30.6%. Содержание триоксида серы (40.0%) согласуется с данными микронзондового анализа.

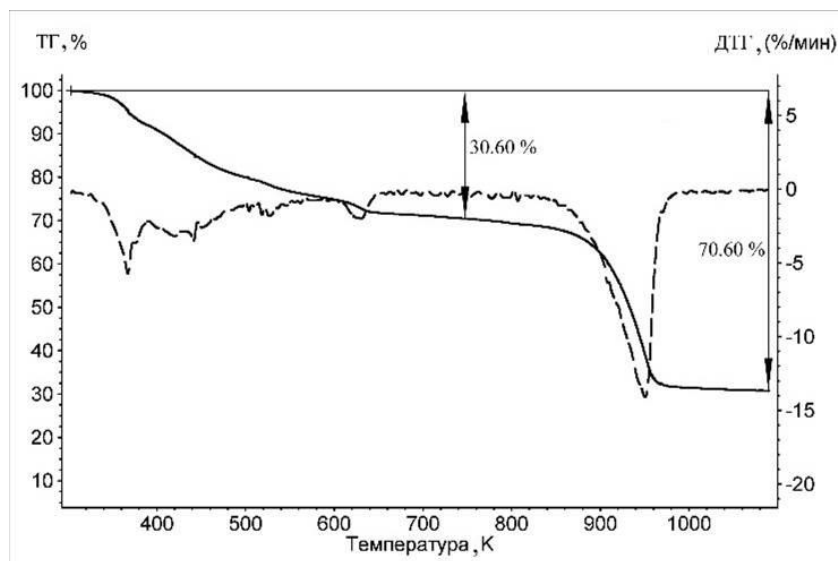


Рисунок 2.6.3.2 – ТГ- и ДТГ-кривые нагревания изученного алюмокопиапита

Абсорбционный мёссбауэровский спектр изученного образца (рис. 2.6.3.3) согласуется с данными для копиапитов [76] и представляет собой суперпозицию двух уширенных линий поглощения, близких по интенсивности и ширине. Центр тяжести спектра находится около 0.43 $\text{мм}\cdot\text{с}^{-1}$. Вершина каждой линии имеет два выраженных максимума, что указывает на присутствие в структуре минерала нескольких позиций железа. Спектр был разложен на два симметричных лоренцевских квадрупольных дублета с одинаковыми изомерными сдвигами ($IS_{1,2} = 0.43(1) \text{ мм}\cdot\text{с}^{-1}$, $QS_1 = 0.41(1) \text{ мм}\cdot\text{с}^{-1}$, $QS_2 = 0.84(1) \text{ мм}\cdot\text{с}^{-1}$, $FWHM_{1,2} = 0,34(1) \text{ мм}\cdot\text{с}^{-1}$), площадями и ширинами линий. Полученные параметры обоих дублетов соответствуют

трехвалентному железу в высокоспиновом состоянии. В спектре отсутствует значимое поглощение при скоростях более $0.8 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$, что указывает на отсутствие в образце двухвалентного железа. В соответствии с представлением о структуре копиапита [77] трехвалентное железо занимает две октаэдрические структурно неэквивалентные позиции, чередующиеся в бесконечных цепях $[\text{Fe}_4^{3+}(\text{H}_2\text{O})_8(\text{OH})_2(\text{SO}_4)_6]$, при этом позиции полностью заселены железом. Согласно данным химического анализа позиции островного катиона М заняты главным образом алюминием.

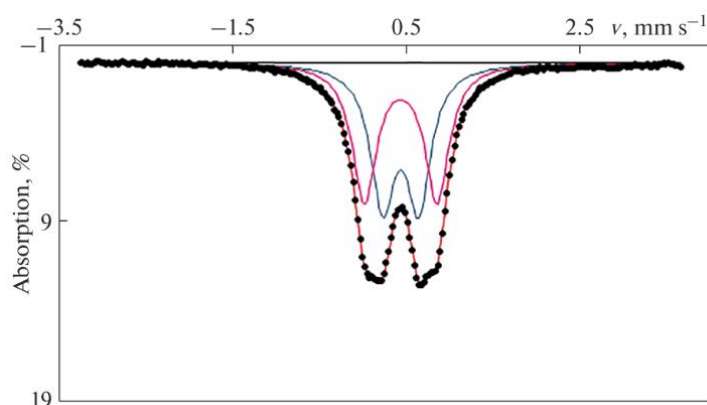


Рисунок 2.6.3.3 – Мёссбауэровский спектр изученного алюинокопиапита

Исходя из данных химического и термического анализов, мёссбауэровской спектроскопии, химическая формула изученного минерала, рассчитанная на 14 зарядов, имеет вид: $(\text{Al}_{0.60}\text{Fe}_{0.07}^{3+})\text{Fe}_{4.00}^{3+}[\text{SO}_4]_{6.03}(\text{OH})_{1.95} \cdot 19.54\text{H}_2\text{O}$.

На микрокалориметре Кальве было проведено семь определений величины $[H^0(973 \text{ К}) - H^0(298.15 \text{ К}) + \Delta_{\text{раств.}} H^0(973 \text{ К})]$ для изучаемого алюинокопиапита, среднее из экспериментальных значений составило: $1263.2 \pm 32.1 \text{ Дж/г} = 1525.8 \pm 38.8 \text{ кДж/моль}$ ($M = 1207.93 \text{ г/моль}$), погрешность рассчитывалась с вероятностью 95%.

На основании полученных экспериментальных данных по растворению природного образца алюинокопиапита были оценены энтальпии образования всех членов копиапитовой группы:

купрокопиапита $\text{Cu}_{1.00}\text{Fe}_{4.00}^{3+}[\text{SO}_4]_{6.00}(\text{OH})_{2.00} \cdot 20\text{H}_2\text{O}$, феррикопиапита $\text{Fe}_{0.67}^{3+}\text{Fe}_{4.00}^{3+}[\text{SO}_4]_{6.00}(\text{OH})_{2.00} \cdot 20\text{H}_2\text{O}$, цинкокопиатита $\text{Zn}_{1.00}\text{Fe}_{4.00}^{3+}[\text{SO}_4]_{6.00}(\text{OH})_{2.00} \cdot 20\text{H}_2\text{O}$, собственно копиапита (феррокопиапита) $\text{Fe}_{1.00}^{2+}\text{Fe}_{4.00}^{3+}[\text{SO}_4]_{6.00}(\text{OH})_{2.00} \cdot 20\text{H}_2\text{O}$, алюинокопиапита $\text{Al}_{0.67}\text{Fe}_{4.00}^{3+}[\text{SO}_4]_{6.00}(\text{OH})_{2.00} \cdot 20\text{H}_2\text{O}$ и магникопиапита $\text{Mg}_{1.00}\text{Fe}_{4.00}^{3+}[\text{SO}_4]_{6.00}(\text{OH})_{2.00} \cdot 20\text{H}_2\text{O}$. Результаты калориметрических измерений были пересчитаны на молекулярные массы копиапитов теоретических составов.

2.6.4 Новые данные о минералах марганцеворудного поля Калахари, ЮАР

Проведено изучение природного гидросульфалюмината кальция $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ – эттрингита с марганцеворудного поля Калахари (Куруман,

рудник НЧванинг, Северный Кейп, ЮАР). Для исследований был выбран крупный призматический зональный кристалл этtringита размером 2 x 0.5 мм. Внешняя зона кристалла светло-желтого цвета размером около 0.7 мм образована железосодержащим этtringитом, центральная часть образца сложена прозрачным бесцветным этtringитом. Изученный образец этtringита имеет следующий состав (мас.%): CaO 26.39, Fe₂O₃ 0.04, Al₂O₃ 8.38, Mn₂O₃ 0.03, SiO₂ 0.13, SO₃ 19.22, H₂O 45.82 (микронзондовый анализ выполнен в лаборатории локальных методов исследования вещества кафедры петрологии МГУ им. М.В. Ломоносова с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-6480LV (JeolLtd., Japan) с W-термоэмиссионным катодом с энергодисперсионным спектрометром X-Max-50 (OxfordInstrumentsLtd., GB) при ускоряющем напряжении 20 кВ, силе тока 10.05 ± 0.05 нА. Количество воды получено по данным термогравиметрии. Химическая формула, рассчитанная на 18 зарядов, имеет вид Ca_{5.9}Al_{2.1}(SO₄)₃(OH)_{12.1}·25.7H₂O.

Термическое поведение этtringита изучено с помощью дифференциального сканирующего калориметра NETZSCH DSC 204 F1 (Германия) в потоке азота (40 мл·мин⁻¹) со скоростью нагревания 10 К/мин.

Особенности процесса термического преобразования этtringита, несмотря на многочисленные исследования, до сих пор не имеют однозначной интерпретации. Большинство авторов склоняются к тому, что дегидроксилизация этtringита происходит на последнем этапе его разложения. По модели, предложенной Н. Скоблинской и К. Красильниковым [78] на основании работы [79], вода в структуре этtringита занимает три различные позиции. Вода в молекулярной форме находится в каналах между колонками, образованными координационными полиэдрами алюминия и кальция, при этом расстояния Ca–O составляют 5.06 и 7.47 Å. Кроме этого, молекулы воды располагаются и в самих координационных полиэдрах кальция, расположенных в колонках (расстояния Ca–O 2.60–2.75 Å и 2.36–2.56 Å). Наконец в форме гидроксильных групп вода располагается как в полиэдрах кальция, так и в полиэдрах алюминия (расстояния Ca–O 2.35–2.52 Å и Al–O 1.82–2.0 Å) в колонках. Процесс дегидратации начинается с удаления связанной только водородными связями воды из каналов, на следующем этапе удаляется «дальняя вода» из кальциевых полиэдров, а затем «ближняя вода» из Ca-полиэдров уже совместно с конституционной водой в форме гидроксильных групп. Однако в работе [80] при изучении методом нейтронографии структурных изменений в процессе термического разложения дейтерированного этtringита показано, что удаление молекулярной и гидроксильной воды происходит совместно во всем температурном интервале.

Процесс поэтапного термического преобразования этtringита был изучен нами с применением ИК-спектроскопии к продуктам нагревания исследуемого образца до 373, 393, 473, 603, 673 и 1273 К (рис. 2.6.4.1).

Трансформация спектров ИК-поглощения этtringита при нагревании отражает процесс выделения воды и соответствующую перестройку структуры.

- В спектре образца, нагретого до $T = 373$ К (рис. 2.6.4.1б), наблюдается уменьшение общего количества воды (примерно на 6 молекул воды в соответствии с результатами термического анализа) при сохранении кристаллической структуры вещества. В высокочастотной спектральной области зарегистрирована широкая полоса поглощения с двумя максимумами при 3427 см^{-1} (широкая полоса, соответствующая валентным колебаниям воды в молекулярной форме) и 3631 см^{-1} (узкая полоса, относящаяся к валентным колебаниям гидроксильных групп).

- В спектрах образца, нагретого до $T = 393$ К (рис. 2.6.4.1в) и до 473 К (рис. 2.6.4.1г), в диапазоне $400\text{--}1200\text{ см}^{-1}$ регистрируется изменение частот всех полос поглощения и исчезновение полосы поглощения при $850\text{--}851\text{ см}^{-1}$, приписываемой деформационным колебаниям комплекса $[\text{Al}(\text{OH})_6]^{3-}$ [81]. Кроме того, происходит дальнейшее уменьшение количества воды (согласно данным термического анализа, удаляется около 16 и 24 молекул воды соответственно). Полоса поглощения валентных колебаний воды меняет свою форму, и ее максимум существенно сдвигается в высокочастотную область, что согласно модели Н. Скоблинской и К. Красильникова [78] связано с перестройкой Са-центрированных полиэдров в Са-центрированные пирамиды с молекулой воды в вершине и четырьмя ОН-группами в их основании. Эти изменения свидетельствуют о перестройке кристаллической структуры этtringита при потере в среднем 20 молекул воды, и, в соответствии с [78, 82], его переходе в аморфизованную (рентгеноаморфную) фазу – «метаэтtringит»;

В спектрах образцов, нагретых до $T = 603$ К (рис. 2.6.4.1д) и до 673 К (рис. 2.6.4.1е), отмечается усложнение спектра поглощения в области $400\text{--}1200\text{ см}^{-1}$, свидетельствующее о начале образования новых фаз, и дальнейшее уменьшение общего количества воды. Причем на спектре образца, нагретого до $T = 673$ К (рис. 2.6.4.1е), фиксируется уже присутствие образовавшегося ангидрита (полосы при 595, 611, 675, 1146 см^{-1}), отчетливо видно наличие как остаточной воды в молекулярной форме (3568 см^{-1}), так и гидроксильных групп (3601 и 3643 см^{-1});

Спектр образца, нагретого до 1273 К (рис. 2.6.4.1ж), отчетливо демонстрирует полное обезвоживание вещества и присутствие в продуктах прокаливании трех фаз: ангидрита CaSO_4 (593, 611, 675, 1118, 1152 см^{-1} [72, спектр S25]), корунда $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (590, 648 см^{-1} [72,

спектр O106]) и нераскристаллизованной фазы, характеризующейся широкой полосой поглощения с максимумом при 849 см^{-1} .

Основываясь на результатах [80] и используя данные, полученные в процессе нашей работы, мы вычленили процесс дегидроксилизации из общего процесса выделения воды из этtringита и произвели расчеты. При $T = 373\text{ К}$ остаются заполненными 90% из 12 позиций, занятых гидроксильными группами в структуре этtringита, а при 393 К заполненными остаются уже только $\sim 65\%$ позиций, что в значительной степени и влечет за собой изменение кристаллической структуры этtringита. Полученные нами экспериментальные спектроскопические данные демонстрируют, что остаточная вода и гидроксильные группы присутствуют в продуктах прокаливания вплоть до 673 К (рис. 2.6.4.1е).

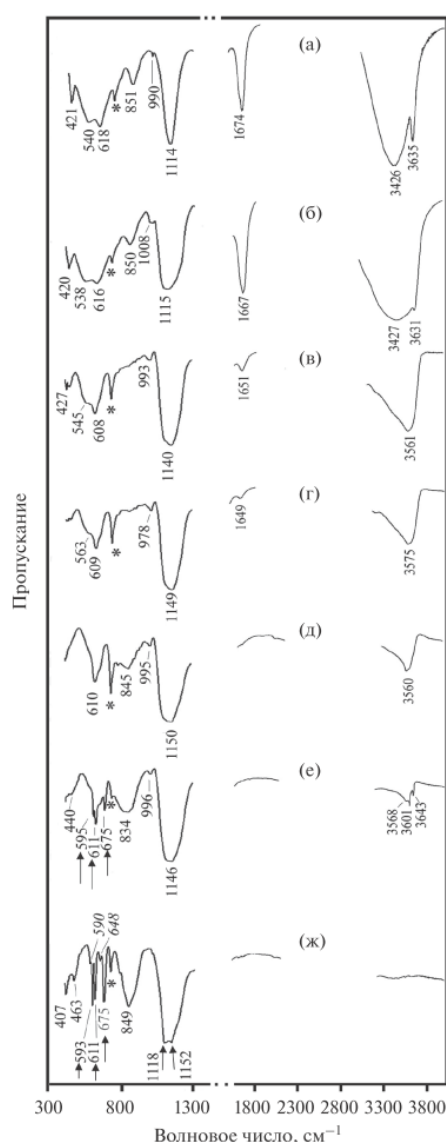


Рисунок 2.6.4.1 – Спектры ИК-поглощения этtringита: а – изученный образец, б – после нагревания до $T = 373\text{ К}$, в – после нагревания до $T = 393\text{ К}$, г – после нагревания до $T = 473\text{ К}$, д – после нагревания до $T = 603\text{ К}$, е – после нагревания до $T = 673\text{ К}$, ж – после нагревания до $T = 1273\text{ К}$; стрелками отмечены полосы поглощения ангидрита CaSO_4 , курсивом – корунда $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$

2.6.5 Новые данные по минералогии других рудных объектов

Получены новые данные по минералогии *Дашкесанского скарнового месторождения* (Закавказье, Азербайджан) в процессе изучения титансодержащего граната гроссуляр-андрадитового ряда, относящегося к первичным пороодообразующим минералам скарнов, как геохронометра. Сделанная оценка U–Pb-возраста граната свидетельствует о скарнообразовании на рубеже юрского и мелового этапов эндогенной активности региона [1, 32].

При изучении минералогии *Сарановского месторождения хромитов* (Горнозаводский район, Пермский край, Средний Урал), известного с 30-х годов XIX века, были открыты и исследованы два минерала: сарановскит $\text{SrCaFe}^{2+}_2(\text{Cr}_4\text{Ti}_2)\text{Ti}_{12}\text{O}_{38}$ [16] и шуйскит-(Cr) $\text{Ca}_2\text{CrCr}_2[\text{SiO}_4][\text{Si}_2\text{O}_6(\text{OH})](\text{OH})_2\text{KNa}_3(\text{SO}_4)_2$ [15]. Минеральный вид, ранее называвшийся шуйскитом, теперь переименован в шуйскит-(Mg).

На действующем *Озерновском золоторудном месторождении* (115 км севернее поселка Ключи, Камчатка, Россия) обнаружен и изучен новый минерал теллура **озерновскит** $\text{Fe}^{3+}_4(\text{Te}^{4+}\text{O}_4)(\text{Te}^{4+}\text{O}_3) 7\text{H}_2\text{O}$ нового структурного типа, описанный в разделе 1.

В карьере *Баженовского месторождения асбеста* (Средний Урал, Россия) открыт и описан новый минерал **паратоберморит** $\text{Ca}_4(\text{Al}_{0.5}\text{Si}_{0.5})_2\text{Si}_4\text{O}_{16}(\text{OH})(\text{H}_2\text{O})_2 \cdot (\text{Ca} \ 3\text{H}_2\text{O})$ (раздел 1).

На *урановом проявлении Зор-Ярчи-Чак* (правый берег р. Ак-Байтал-Южный, В. Памир, Таджикистан) детально описан обнаруженный нами редкий и недостаточно изученный минерал кокониноит $\text{Fe}_2\text{Al}_2(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_2 \cdot 20\text{H}_2\text{O}$ [83], пополняющий данные по минералогии урана.

Два новых минерала открыты на уникальном *месторождении гуано* горы Пабельон де Пика в Северном Чили: боярит $\text{Cu}_3(\text{N}_3\text{C}_2\text{H}_2)_3(\text{OH})\text{Cl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [84] и аммонитинслейит $\text{NH}_4\text{Al}_2(\text{PO}_4)_2(\text{OH}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [85].

Дополнен список минералов знаменитого своей разнообразной минералогией *месторождения железо-марганцевых руд Лонгбан (Långban)*, Верmland, Швеция, где открыт и изучен новый минерал эрссонит $\text{CaMg}_7\text{Fe}^{3+}_2(\text{OH})_{18}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$. Описан в разделе 1.

2.7 Новые данные по цирконометрии магматических пород Большого Кавказа

Продолжены исследования химической и изотопной зональности акцессорного циркона из кристаллических пород Северного Кавказа. Использование методов электронной микроскопии и ионного зондирования позволяет уверенно *датировать отдельные зоны кристаллов циркона и выявлять их генетическую принадлежность*. Показано, что оптически гомогенные зерна циркона могут содержать древние реликтовые ядра, которые часто

являются причиной дискордантности изотопных датировок [86]. Исследование зональных кристаллов циркона в катодолюминесценции позволяет избежать таких грубых ошибок и датировать только характеристические зоны кристаллов, связанные с этапом финальной перекристаллизации минерала в эндогенных геологических процессах (рис. 2.7.1).

Исследована зональность и получен абсолютный возраст для серии кристаллов циркона размером ~ 100 мкм из мигматитов Адырсу (Кабардино-Балкария), которые характеризуют стадию регионального метаморфизма амфиболитовой фации в зоне Главного хребта Большого Кавказа. U–Pb-изотопные датировки кристаллов дают широкий возрастной спектр 315–1040 млн лет, частично унаследованный от кластогенных зерен циркона исходных метапелитов. Возраст *регенерационных кайм* кристаллов циркона 315 ± 10 млн лет отвечает процессам перекристаллизации и дорастания зерен циркона на стадии анатексиса и мигматизации и совпадает с возрастом постметаморфических гранитоидов Кавказа [1]. Изучена такая же фракция зональных кристаллов циркона из ортогнейсов г. Чегет из состава палеозойского гнейс-сланцевого комплекса Большого Кавказа, являющихся, возможно, метавулканитами, которые изначально были эффузивными аналогами гранитоидов ущелья Адырсу. U–Pb-изотопные датировки *краевых частей* кристаллов дают 480 Ма – возраст магматизма исходных гранитоидов, характеризующий этап инициального магматизма на Кавказе, который непосредственно предшествовал этапу регионального метаморфизма [2].

Проведены комплексные исследования U-Th-Pb-изотопной системы акцессорного циркона из базальтов *Гойтхской вулканической области* (ГВО) Западного Кавказа. Проба №406 для изотопного датирования была отобрана из базальтовых порфиритов чаталтапинского вулканического комплекса, в бассейне р. Туапсе. Методами изотопной геохронологии с использованием ионного зонда показано (рис. 2.7.2), что излияние базальтов чаталтапинского вулканического комплекса ГВО происходило в юрское время, на рубеже аалена и байоса (169 Ма), в период тектонической трансформации осевого трога рифтогенного бассейна Большого Кавказа. Для цирконов из базальтов было получено низкое Th/U-отношение, что более характерно для пород кислого состава. Этот факт косвенно подтверждает то, что эволюция юрского рифтогенного магматизма на Кавказе происходила за счет ассимиляции коры континентального типа. Подробные результаты исследований оформлены в виде научной статьи, направлены в печать и приняты к публикации [87].

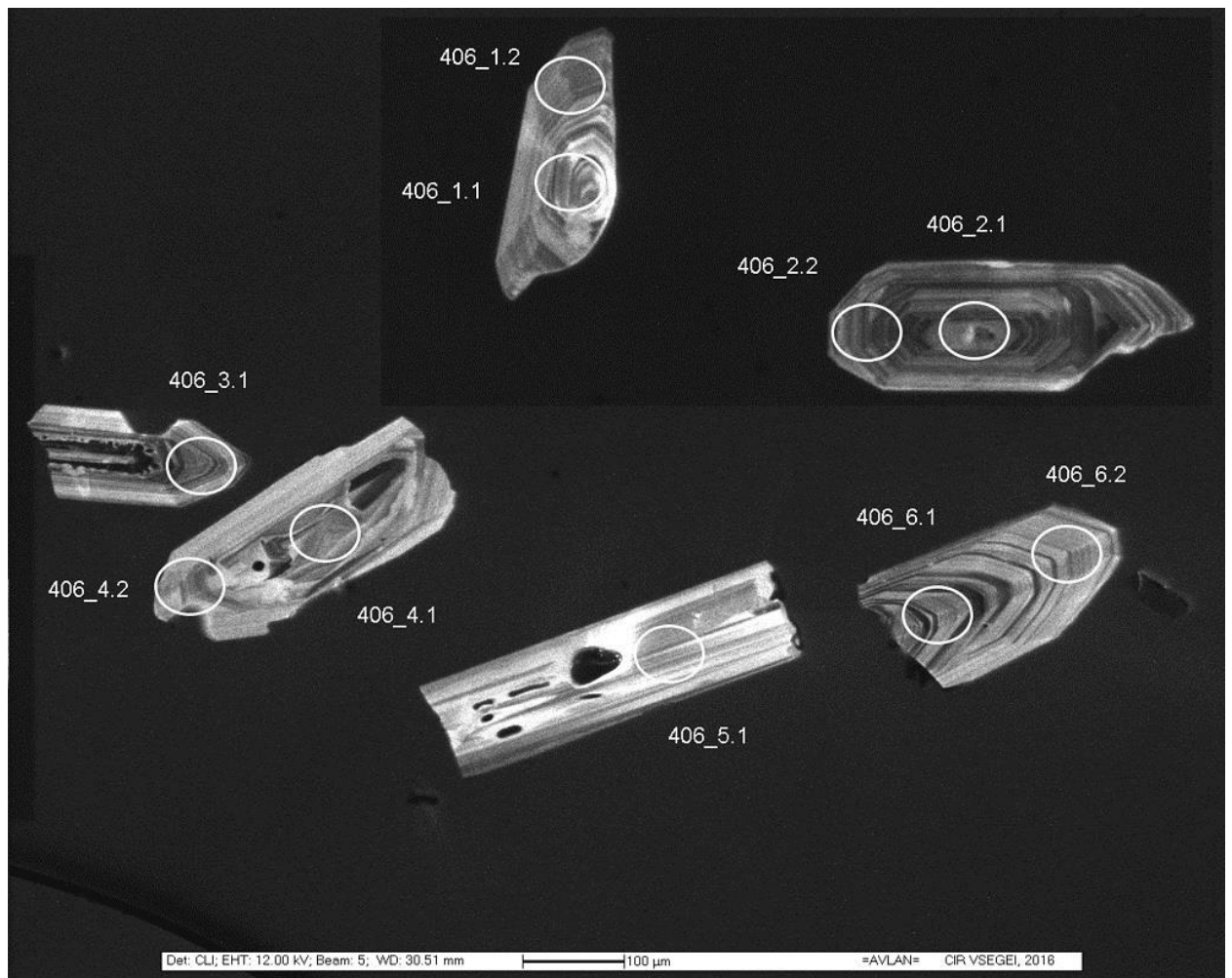


Рисунок 2.7.1 – Катодоллюминесцентные изображения кристаллов акцессорного циркона из пробы № 406 (маркер масштаба 100 мкм). Участки зондирования обозначены белыми кружками, номера точек указаны в соответствии с номерами изотопных анализов. Акцессорный циркон представлен однородной группой магматических кристаллов удлиненного призматического габитуса с тонкой ритмичной концентрической ростовой зональностью. Все зоны кристаллов демонстрируют юрский возраст с небольшим статистическим разбросом в окрестности 169 Ма (рис. 2.7.2). Исключение составляет древнее ксеногенное ядро триасового возраста (точка 2.1, 204 Ма), оно сохранилось в центральной части удлиненного зонального кристалла циркона юрского возраста

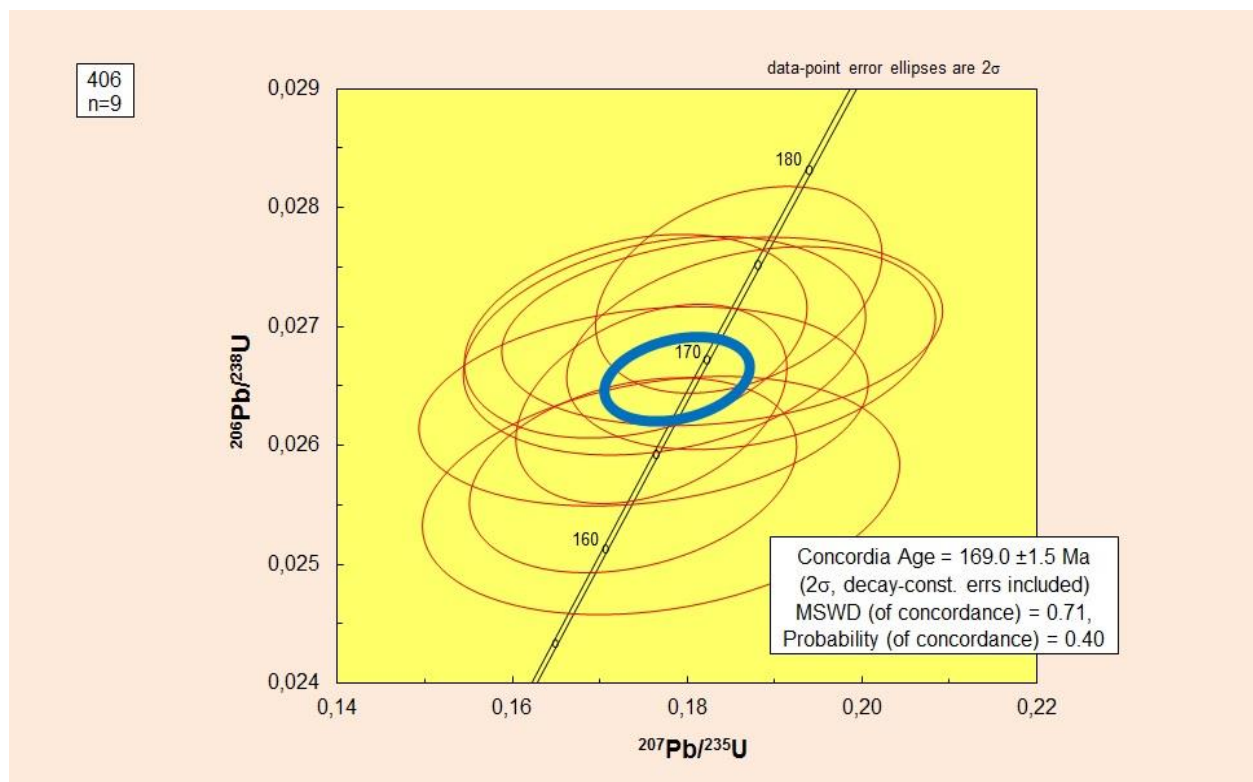


Рисунок 2.7.2 – Результаты датирования кристаллов циркона из юрских базальтов пробы № 406 нанесены на диаграмму с конкордией с табулированными значениями возраста, млн лет (Ma). Датировки кристаллов циркона образуют устойчивый кластер с возрастом 169 Ma. Диаметр эллипсов равен удвоенной ошибке измерения (2σ). Вероятность конкордантности около 40%, СКВО (MSWD) 0.71. Точка с триасовым возрастом ксеногенного ядра циркона 204 Ma исключена из расчетов статистического кластера

Исследование U-Th-Pb-изотопной системы циркона имеет *важное прикладное значение* в рамках реализации программы Государственного геологического картирования территории Российской Федерации (ГГС-200, ГИС «Атлас Кавказа» и др.). Комплексные минералогические исследования циркона с использованием ионного зонда позволяют уверенно датировать различные нестратифицированные комплексы, а также различать их генезис, орто- и парапороды метаморфогенного происхождения, обосновывать палеотектонические реконструкции.

2.8 Новые данные по минералогии метеоритов

Изучение метеоритного вещества в Минмузее РАН было возобновлено в 2018 году после большого перерыва. К настоящему времени в метеоритном веществе описано 470 минералов, среди которых 79 минералов-эндемиков – характерных только для определенного класса метеоритов [88]. Основная метеоритная коллекция музея, организованная еще В.М. Севергиным и накапливавшаяся более ста лет, в 1930-х годах была передана в Комитет по метеоритам АН СССР. В 1939 году в этот же комитет перешли все

сотрудники музея, занимавшиеся метеоритным веществом (Л.А. Кулик, Е.Л. Кринов и другие). Исследования метеоритного вещества в музее прекратились на несколько десятилетий.

Собственная коллекция метеоритов, тектитов и импактитов была заново воссоздана в музее в 2007 году, но ее минералогическая изученность пока остается недостаточной, поэтому была начата систематическая научная ревизия этой коллекции. В 2018 году Минмузей РАН получил официальный международный статус регистратора метеоритов, что дало возможность описания и изучения нового метеоритного вещества уже на новом уровне. В 2020 году сотрудник музея А.А. Агаханов участвовал в экспедиции по сбору метеоритов на территории Чили и последующем изучении собранного материала.

На 2020 год в коллекции метеоритов, тектитов и импактитов музея было 188 образцов, среди которых 109 образцов метеоритов, 57 образцов импактитов и 22 образца тектитов. За 2018–2020 годы Минмузей РАН описал и зарегистрировал 18 новых метеоритов, регистрационные массы которых вошли в нашу коллекцию (табл. 2.8). Работа по регистрации новых метеоритов позволила добавить в основной фонд музея 1737.4 г метеоритного вещества. Большинство новых метеоритов относится к обыкновенным хондритам, но также нами были описаны и зарегистрированы уреилит главной группы NWA 13135 и углистый хондрит редкой подгруппы CV3r NWA12590.

Проверка имеющегося в коллекции материала показала, что 51 образец относится к обыкновенным хондритам (Н – 24, L – 15, LL -12), 4 образца – к углистым хондритам (СМ – 1, CV – 3), а энстатитовые хондриты в коллекции отсутствуют. Железные метеориты представлены 31 образцом различных групп, в том числе 5 образцов не отнесены к какой-либо группе. В коллекции есть 13 образцов палласитов (преимущественно это метеорит Сеймчан), 2 мезосидерита, 1 говардит, 1 эвкрит и 1 лунный метеорит.

Таблица 2.8 – Метеориты, зарегистрированные Минмузеем РАН в 2018–2020 годах

Метеорит	Тип	Общая масса (г)	Масса образца в музее (г)	Год регистрации	Владелец основной массы
Ngare Sero	Обыкновенный хондрит L5	2230	106	2018	Власов К.А.
Chug Chug 003	Обыкновенный хондрит H4	8918	206	2018	Непомилуев М.Е.
Calama 022	Обыкновенный хондрит L6	32000	61	2018	Крячко Т.В.

NWA 12578	Обыкновенный хондрит LL6	415	166	2019	Васильев С.П.
Sierra Gorda 012	Обыкновенный хондрит H4	1100	98	2019	Чаплыгин И.В.
NWA 12590	Углистый хондрит CV3r	1805	44	2019	Васильев С.П.
Chug Chug 010	Обыкновенный хондрит H5	224.5	31.8	2019	Чаплыгин И.В.
Calama 032	Обыкновенный хондрит H5	28	5.6	2019	Непомилуев М.Е.
Calama 033	Обыкновенный хондрит H6	126.4	27	2019	Крячко Т.В.
Calate 017	Обыкновенный хондрит L5	1900	46	2019	Непомилуев М.Е.
Sierra Gorda 022	Обыкновенный хондрит L5	97.5	19	2019	Чаплыгин И.В.
Sierra Gorda 023	Обыкновенный хондрит L6	2090	289	2019	Чаплыгин И.В.
Chug Chug 013	Обыкновенный хондрит H5	37.3	7	2019	Чаплыгин И.В.
Chug Chug 014	Обыкновенный хондрит L4	780	50	2019	Чаплыгин И.В.
Chug Chug 015	Обыкновенный хондрит H5-6	3055	475	2019	Чаплыгин И.В.
NWA 13135	Уреилит	58.3	13	2020	Васильев С.П.
Chug Chug 044	Обыкновенный хондрит L4	62	62	2020	Чаплыгин И.В.
NWA 13529	Обыкновенный хондрит H4	1690	31	2020	Васильев С.П.

В результате детального минералогического изучения метеоритов в основной фонд музея были также добавлены образцы трех редких минеральных видов: это **добреелит** FeCr_2S_4 , **куширонит** $\text{CaAl}[\text{AlSiO}_6]$ и **гроссманит** $\text{CaTi}^{3+}[\text{AlSiO}_6]$. При детальном изучении кальций-алюминиевых включений в углистом хондрите NWA12590 был выявлен ряд богатых молибденом интерметаллидов, среди которых зафиксированы гексагональные минералы: гексамолибден, богатый молибденом осмий, богатый молибденом рутений [89]. Кроме этого, в сростаниях с уже известными интерметаллидами методом EBSD удалось выявить два потенциально новых минерала (интерметаллид Mo, Ir, Ru и Os куб. сингонии и интерметаллид Ru, Ir, Mo и Os ромб. сингонии), богатую молибденом разновидность

самородного железа (куб. сингония) и богатую молибденом разновидность самородного никеля (куб. сингония) [90].

В метеорите Dhofar 922 (обыкновенный хондрит L6), демонстрирующем высокую степень ударного метаморфизма (S6), была изучена минералогия ударно-расплавных жил [91]. В этих жилах встречены относительно крупные (до 100–200 мкм) фиолетовые в проходящем свете округлые выделения рингвудита состава Fe_{66} . В некоторых выделениях оливина в ударных жилах краевые зоны также сложены рингвудитом. Мэйджорит образует микрокристаллические агрегаты в стекле ударных жил вместе с каплевидными вкраплениями Fe-Ni-металла и троилита. Маскелинит в ударных жилах находится в сростках с жадеитом и образуется по плагиоклазу. Фазовый состав подтвержден микронзондовыми анализами и рамановской спектроскопией. Формирование ударных жил происходило при давлении более 19 ГПа и температуре более 2150–2300 °C [91].

3 Изучение вариаций химического состава и генезиса породообразующих минералов

На большой подборке образцов из различных типов формаций (Урал, Македония, Германия) были получены новые данные о закономерностях изоморфных замещений в минералах *надгруппы эпидота*, выявлено девять потенциально новых минеральных видов [1, 92].

Для минералов *группы меллита и монтичеллита* определены энтальпии их образования из элементов и рассчитаны значения энергии Гиббса, что позволяет количественно термодинамически моделировать фазовые равновесия в системах образования контактно-метасоматических пород и известковых скарнов, включающих силикаты и кальцит [1, 93].

Типохимизм оливина в скарнах и кальцифирах

Оливин является главным породообразующим минералом в различных магматических и метаморфических породах и главным минералом верхней мантии Земли. Состав оливина можно использовать как инструмент для выявления особенностей процессов минералообразования, планомерно изучив вариаций химического состава оливина различного генезиса. Несколько лет назад нами были систематизированы находки экстремально магнезиального оливина ($Fo_{>96}$) в магматических породах [94]. Было показано, что экстремально магнезиальный оливин формируется исключительно в результате низкотемпературных процессов (например, окисление или диффузионный обмен). Некоторые зерна экстремально магнезиального оливина в магматических породах могут являться ксенокристаллами, захваченными из вмещающих скарнированных пород [95]. При попытке сравнения состава оливина в магматических породах и карбонатно-силикатных метаморфических породах оказалось, что данные о составе оливина скарнов и силикатных мраморов (кальцифиров) в мировой литературе практически отсутствуют, поэтому в 2020 году нами было впервые проведено систематическое изучение состава оливина скарнов и силикатных мраморов. Для оливина из образцов коллекции Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН были выполнены высокоточные микрозондовые анализы и анализы LA-ICPMS [2, 96]. В итоге впервые были выявлены особенности состава оливина магнезиальных скарнов и силикатных мраморов, которые могут помочь диагностировать генезис ксенокристов оливина в кимберлитах и других карбонатно-силикатных магматических породах.

4 Расплавные и флюидные включения в минералах

Были продолжены систематические работы по изучению включений минералообразующих растворов и расплавов в породообразующих минералах с целью установления условий их формирования.

Методами изучения расплавных включений в плагиоклазе, клино- и ортопироксене из андезитов влк. Карадаг (Крым), локальной геохимии стекол и минералов и Ar–Ar-изотопии показано существование двух различных магматических серий в пределах *Карадагского вулканического массива* [97].

Получены результаты по природно и экспериментально закаленным расплавным включениям в магнезиальном оливине из базальта *Карымского вулканического центра* (Камчатка, Россия) и оценены условия образования родоначальных магм, предложен новый комплексный подход к оценке исходного содержания H₂O в расплавах [98].

В оливине из примитивных высокомагнезиальных базальтов *Камчатского мыса* (Камчатка, Россия) изучены сульфидные включения и сосуществующие с ними включения силикатного расплава и хромшпинелида. Охарактеризован состав силикатных расплавов, от которых отделялись сульфидные жидкости, а также рассчитаны условия равновесия – фугитивность кислорода и температура [99].

Впервые были детально изучены расплавные включения в кварце из экструзии риолитов влк. Базман (Иран) [100]

5 Совершенствование аналитических методик

С целью повышения качества результатов НИР постоянно и систематически расширялся спектр применяемых методов, сотрудниками осваивались и развивались сами методы исследований на всех этапах работы по изучению минерального вещества, совершенствовались аналитические методики.

Методы пробоподготовки

Отработаны **методы приготовления прозрачно-полированных препаратов**, пригодных для изучения элементного состава, оптических свойств и получения КР-спектров из зерен минералов размерами не более 20 мкм, в том числе водорастворимых или реагирующих с водой. Благодаря этому удалось изучить целый ряд редких минералов и описать новые минералы из вулканических фумарол и продуктов возгонов подземных угольных пожаров. Техника изготовления препаратов из крайне ограниченного количества материала оказалась весьма полезной, а в ряде случаев незаменимой при изучении минералов из фондов Минмузея, когда недопустимо повреждение образцов.

Освоены **приемы полирования образцов** для изучения методами дифракции отраженных электронов (EBSD). Особенностью пробоподготовки препаратов для этого метода является необходимость получения поверхности образца с минимальным количеством деформаций в приповерхностном слое материала.

Для **выделения фракций минералов** из дробленого материала, **из шлихов**, кроме магнитной сепарации и разделения в тяжелых жидкостях (бромформе, йодистом метиле, жидкости Клеречи), находится в стадии освоения гидросепаратор конструкции Н.С. Рудашевского. Этот сепаратор позволяет разделять в том числе минералы с плотностью более 5 г/см³, что практически невозможно выполнить с помощью тяжелых жидкостей.

Для изучения метамиктных минералов рентгеновскими дифракционными методами необходимо прокалывание материала с целью восстановления кристаллической структуры. К сожалению, часто прокалывание даже в инертной атмосфере или вакууме приводит к образованию в изучаемом минерале побочных фаз, затрудняющих диагностику. Для преодоления этого затруднения предложено и используется **прокалывание метамиктных минералов** в замкнутом объеме в присутствии металлических геттеров. Таким способом удалось получить не осложненные посторонними фазами рентгеновские порошкограммы для ряда метамиктных минералов.

Оптические методы изучения минералов

Рудные минералы изучаются в музее на поляризационных оптических микроскопах в отраженном свете, при необходимости – в режиме темного поля (для выявления слабых рефлексов,

анатомии выделений). Отражательная способность измеряется на микроскопе-спектрофотометре фирмы Opton. Твердость минералов измеряется на микротвердомерах ПМТ-3 и Leitz.

Оптические свойства прозрачных минералов определяются на поляризационных микроскопах в проходящем свете в прозрачных шлифах и иммерсионных препаратах. Ориентировку оптической индикатрисы относительно кристаллографических направлений и измерение величины угла $2V$ проводят на столике Е.С. Федорова. Используя коноскопию на универсальном теодолитном столике и измерения в монохроматическом свете, удалось прямым методом измерить дисперсию оптических осей некоторых редких минералов, например, пауфлерита. Для наблюдения коноскопических фигур в относительно крупных зернах и пластинках из кристаллов используется метод микроконоскопа. Измерение показателей преломления минералов проводится иммерсионным методом как в плоских препаратах, так и на вращающейся игле и на приборе ППМ-1 конструкции В.Г. Фекличева. Показатели преломления иммерсионных сред проверяются на рефрактометрах и методом полый призмы на однокружном гониометре в натровом свете. При изучении оптических свойств прозрачных минералов часто возникают определенные трудности **при работе с единичными мелкими (менее 30 мкм) зернами и при измерении показателей преломления выше 1.8**. Часть таких затруднений удалось решить:

Для наклеивания в ориентированном положении зерен размерами менее 30 мкм отработаны специальные приемы работы с **устройством ППМ-1**. Наиболее подходящим не растворяющимся в иммерсионных жидкостях клеем для фиксации зерен на игле оказался **гуммиарабик**.

Используемые в настоящее время жидкости с высокими показателями преломления обладают целым рядом недостатков, которые затрудняют получение удовлетворительных результатов. Так, наиболее доступные высокопреломляющие мышьяковистые жидкости на основе $AsBr_3$ (жидкости ВИЖ, наборы Cargille high dispersion liquids, США) реагируют с влагой воздуха, а иногда и с некоторыми минералами, обладают густой окраской, затрудняющей измерение; наиболее высокопреломляющие жидкости имеют пастообразную консистенцию. Этих недостатков лишена ныне почти забытая **жидкость Веста**, имеющая показатель преломления до 2.05. Синтез этой жидкости в музее позволил получить иммерсионные среды в диапазоне 1.74–2.05.

Рентгеновские методы изучения минералов

Рентгеновские порошкограммы минералов при достаточном количестве материала получают на автоматизированных системой DifWin рентгеновских дифрактометрах ДРОН-3. Применение **в качестве кювет бездифракционного кремния** позволило получать удовлетворительные дифрактограммы от значительно меньшего количества минерала, чем при съемке на стандартных кюветах. При очень незначительном количестве материала,

доступного для исследования, съемка рентгеновских порошковых диаграмм проводится фотометодом в камерах Дебая-Шеррера 57.3, 68, в фокусирующей вакуумной камере Гинье. При съемке в камерах Дебая-Шеррера для уменьшения фона от рассеянного излучения используется **продувка камер гелием**. В случае исследования единичного зерна минерала или когда важно сохранить зерно неповрежденным, применяется съемка в камере Гандольфи. Для уменьшения рассеяния рентгеновских лучей от держателя препарата было сварено **бериллий-бор-литиевое стекло**, капилляры из которого почти не увеличивают фон рентгенограмм.

Изучение морфологии кристаллов

Мелкие кристаллы минералов изучаются методами растровой электронной микроскопии при наблюдении в режимах SEI, BSE, TOPO. Кристаллы размерами от 0.2 до 2 мм измеряются на двукружном отражательном гониометре ZRG-3, а более крупные – на гониометре фирмы Fuss. Для измерения небольших кристаллов с несовершенными гранями изготовлено специальное **приспособление для столика Федорова**, которое позволяет проводить замеры координат граней, непригодных для гониометрического изучения.

Изучение элементного состава минералов

Химический состав минералов изучается в Минмузее методами локального электронно-зондового анализа с использованием Si(Li)-энергодисперсионного спектрометров и волнодисперсионных спектрометров, методами «мокрой» химии, рентгенофлуоресцентными методами, в том числе с фокусирующей рентгеновской оптикой, методами лазерной абляции с спектроскопией при возбуждении в индуктивно-связанной плазме (LA-ICP-MS, LA-ICP-OES); содержание воды определяется методами CNH-анализа с хроматографическим окончанием. Основные методические работы связаны с **совершенствованием способов определения легких элементов** (бора, азота) с помощью электронно-зондового анализа, **определения степени окисления железа** в минералах. Положение линии *K α* фосфора в рентгеновском спектре минерала, определенное с помощью волнодисперсионного спектрометра на микрозонде Superprobe JCSA-733, позволило выявить форму нахождения фосфора в гальвине из пегматитов Юго-Западного Памира.

Большой объем методических работ проводится по использованию лазерной абляции в сочетании с эмиссионной спектроскопией с индуктивно-связанной плазмой (LA-ICP-OES) для количественного определения высоких **содержаний лития, бериллия, бора в минералах**. Нам удалось решить весьма непростую задачу получения устойчивой плазмы на ICP-OES, что мешало широкому применению LA-ICP-OES, несмотря на лучшие метрологические характеристики такого тандема при определении высоких содержаний элементов по сравнению с LA-ICP-MS.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты НИР составляют актуальный и значимый вклад в фундаментальные знания о природном веществе, его происхождении, накоплении и рассеянии; создают теоретическую базу для прогнозирования и выявления новых типов руд, материалов, для разработки новых принципов поиска и разведки полезных ископаемых, новых технологий обогащения, пополняют уникальные коллекции Минмузея РАН, а также открытые для пользователей научные базы данных и картотеки, созданные и хранящиеся в музее.

Основные результаты настоящей НИР заключаются в следующем.

В период 2019–2021 годов сотрудниками Минмузея РАН и с их участием было открыт и изучен **61 новый минеральный вид**. Утверждены 2019–2021 годах Комиссией по новым минералам, номенклатуре и классификации Международной минералогической ассоциации ИМА. Это больше чем в любом исследовательском коллективе мира и является главным достижением НИР музея. Каждый новый открытый минеральный вид пополняет фундаментальную науку, проливает свет на природные процессы, дает инструменты для поиска полезных ископаемых, создания новейших материалов, свидетельствует о высочайшем мировом уровне исследований.

В результате **систематического изучения ряда уникальных минералогических объектов** России и ближнего зарубежья получены новые данные.

На уникальном мировом объекте – регионе **активных фумарольных полей вулкана Толбачик на Камчатке** – получены данные **о современном минералообразовании, связанном с поствулканическими процессами**. При изучении фумарольных возгонов было открыто и утверждено 13 новых минеральных видов с Толбачика: полиарсит, юргенсонит, евсеевит, нишанбаевит, натроафтиталит, рабдоборит-(Mo), манганобадаловит, карлдитмарит, паульгротит, мильковоит, рябчиковит, кальциохатертит и резницкиит.

По итогам проведенных **на Фан-Ягнобском угольном месторождении** (Ц. Таджикистан) исследований получены **новые данные по минералогии возгонов и механизмам минералообразования из газовой фазы**. Найдено и утверждено два новых минеральных вида: хасановит и ермаковит; впервые для возгонов природных угольных пожаров описаны самородный теллур, пауфлерит β -VO(SO₄), бонацит As₄S₄, киноварь HgS и тиманнит HgSe; обнаружены три, по всей вероятности, новые фазы; получены новые данные по недостаточно изученной системе As – S.

Работы по систематизации и сравнительному анализу **конституционных характеристик и закономерностей формирования алмазов Архангельской и Якутской алмазонасных провинций** позволили получить новые данные о взаимосвязи вещественных

особенностей основных типов кимберлитовых руд ААП и ЯАП со степенью их алмазности и качественными характеристиками алмазов, продвинувшись в направлении **создания методики прогнозирования качества и минералогических характеристик алмазного сырья.**

Получены новые данные по **минералогии редкометалльных гранитных пегматитов** Юго-Западного и Восточного Памира (ГБАО, Таджикистан), где описан и утвержден новый минерал шахдараит-(Y), изучены циркон с повышенным количеством гафния и урана, редкий висмутоколумбит, борсодержащий гадолинит-(Y) и браннерит, а также Карасу-Каравшинского месторождения Туркестанского хребта (Киргизия), где открыт новый минерал акоповаит.

Новые значимые результаты получены по **минералогии щелочных массивов.**

Систематически описана уникальная **редкоземельная минерализация Мочалина Лога (Вишневые горы, Южный Урал)**, охарактеризовано 37 редкоземельных минералов, восемь из которых утверждены CNMNC IMA как новые минеральные виды, в том числе шесть за отчетный период: радекшодаит-(Ce), алекскузнецовит-(Ce), перклевеит-(La), алекскузнецовит-(La), бираит-(La), и гидроксилбастнезит-(La). Минералогия **массива Дарай-Пиёз** (Алайский хр., Таджикистан) с уникальной **цезиевой минерализацией** дополнена открытием и исследованием трех новых минералов – цезиевых: крейтерита и фторапофиллит-(Cs) и редкоземельного дуткевичита-(Ce). В процессе систематических работ на Кольском п-ове получены новые данные по минералогии уникальных массивов, Ловозерского и Ковдорского, а также массива Вуориярви. Открытые на **Ловозерском щелочном массиве** новые минералы сапожниковит и сергеванит пополнили минералогическую группу содалита и эвдиалита соответственно. Из минералов **Ковдорского щелочно-ультраосновного массива** всесторонне описан ранее открытый редкоземельный минерал манаевит, пополнивший группу везувиана, а также изучены физико-химически с определением термодинамических констант минералы бобьерит и ковдорскит. На щелочно-ультраосновном **массиве Вуориярви** открыт минерал гидроксилбастнезит-(La) одновременно с его обнаружением в Мочалином Логу. Открытый нами в щелочно-ультраосновном **массиве Одихинча** (Красноярский край) и изученный новый минерал одихинчаит также пополнил группу эвдиалита.

Систематизированы и существенно дополнены данные по минералогии **Воронцовского золоторудного месторождения** (Северный Урал), уникального минералогического объекта мирового значения, требующего современных прецизионных методов исследования. Открыто с участием наших сотрудников восемь новых минералов, из них за отчетный период описано пять. Это сульфосоли люборжакит, гладковскиит, походяшинит, гунгерит, ауэрбахит, причем четыре последние – **таллиевые.**

Новые данные получены по **минералогии МПГ россыпей** – российских, на Ю. Урале, и Корякском нагорье, где открыты три новых минерала МПГ: селениды зайковит и селенолаурит и интерметаллид куфарит, а также впервые начато изучение минералов МПГ, сперрилита и холлингвортита–ирарсита, из россыпей Памира (ГБАО, Таджикистан). Изучение методики прокаливания, актуальной для выделения сперрилита из шлихов, показало возможность деарсенизации сперрилита. В результате проведенных высокоточных физико-химических исследований алюинокопиапита с медно-цинкового **месторождения Блява** (Южный Урал) определены термодинамические константы для минералов группы копиапита, важные для моделирования минералообразования при различных *P–T*-условиях, в том числе неземных, а также техногенных – для мониторинга экологических рисков, связанных с кислотным дренажом в отвалах от переработки сульфидных руд. В результате прецизионного исследования этtringита с **марганцеворудного поля Калахари** интерпретирован процесс его поэтапного термического преобразования.

Дополнены и систематизированы данные по изучению химической и изотопной зональности акцессорного циркона из кристаллических пород **Большого Кавказа**, что позволило установить возраст главных стадий формирования этих пород и скорректировать методику цирконометрии.

Пополнены данные по минералогии Главного Сарановского месторождения хромитов и Баженовского месторождения асбеста (Ср. Урал), Озерновского золоторудного месторождения (Камчатка), Дашкесанского месторождения (Азербайджан), Дашкесанского месторождения (Азербайджан), месторождения гуано близ селения Чанабая (Чили), месторождения Лонгбан (Швеция) и др. объектов.

В Минмузее РАН возобновлена после долгого перерыва систематическая работа по **изучению метеоритного вещества**. Это позволило существенно расширить метеоритную коллекцию музея, описать и добавить в систематическую коллекцию несколько редких минеральных видов и обнаружить два потенциально новых минерала.

Продолжены систематические работы **по изучению расплавных и флюидных включений в породообразующих минералах**. Изучены жидкие сульфидные включения в оливине примитивных базальтов **Камчатского мыса**, определен состав силикатных расплавов, от которых отделялись сульфидные жидкости, и рассчитаны условия равновесия.

В рамках систематических работ по изучению **вариаций состава породообразующих минералов** получены новые данные о закономерностях изоморфных замещений в минералах **надгруппы эпидота**, где выявлено девять потенциально новых минеральных видов; массив данных о типохимизме **оливина магнизальных скарнов и кальцифиров**, перспективных для выводов о процессах минерало- и породообразования на базе анализа состава оливина;

определены термодинамические константы минералов **группы мелилита и монтчеллита**, важные для моделирования фазовых равновесий в системах образования контактно-метасоматических пород и известковых скарнов.

На основе систематической работы по изучению **расплавных и флюидных включений в породообразующих минералах** с целью выяснения условий их формирования получены существенные данные: впервые изучены включения в кварце риолита влк. Базман (Иран), для влк. Карадаг (Крым) выявлены две вулканические серии; на Камчатке для влк. Карымский определены условия образования родоначальных магм, а для базальтов Камчатского мыса определен состав силикатных расплавов, от которых отделялись сульфидные жидкости, и рассчитаны условия равновесия; предложен новый комплексный подход к оценке исходного содержания H_2O в расплавах.

Исполнителями НИР **усовершенствованы аналитические методики** на различных этапах исследований минерального вещества: пробоподготовки, изучения морфологии кристаллов, оптических и рентгеновских исследований, определения элементного состава минералов.

По результатам работ по теме в 2021 году было сделано 50 научных публикаций: 49 статей и одна монография. Полученные данные НИР в виде тезисов были представлены на научных конференциях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Разнообразие минералов и их парагенезисов: новые данные, развитие аналитической минералогии. Отчет о научно-исслед. работе (промежуточный) № FMGM-2019-0003, рукопись. – М., 2019. – 79 с.
- 2 Разнообразие минералов и их парагенезисов: новые данные, развитие аналитической минералогии. Отчет о научно-исслед. работе (промежуточный) № FMGM-2019-0003, рукопись. – М., 2020. – 81 с.
- 3 Плечов П.Ю., Пеков И.В., Белаковский Д.И., Паутов Л.А., Касаткин А.В., Агаханов А.А., Карпенко В.Ю., Некрылов Н.А., Гриценко Ю.Д., Гаранин В.К., Карпов А.О., Герасимов В.Ю. Важнейшие научные результаты Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана в 2019 году // Новые данные о минералах. 2020. Т. 54. В. 3. С. 74–95.
- 4 Плечов П.Ю., Белаковский Д.И., Касаткин А.В., Пеков И.В., Агаханов А.А., Паутов Л.А., Гриценко Ю.Д., Карпенко В.Ю., Гаранин В.К., Коновалова К.А., Некрылов Н.А. Важнейшие научные результаты Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана в 2020 году // Новые данные о минералах. 2021. Т. 55. В. 3. С. 57–80.
- 5 Chukanov N.V., Zubkova N.V., Varlamov D.A., Pekov I.V., **Belakovskiy D.I.**, Britvin S.N., Van K.V., Ermolaeva V.N., Vozchikova S.A., Pushcharovsky D.Yu. Steudelite, $(\text{Na}_3\text{□})(\text{K},\text{Na})_{17}\text{Ca}_7\text{Ca}_4(\text{Al}_{24}\text{Si}_{24}\text{O}_{96})(\text{SO}_3)_6\text{F}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, a new cancrinite-group mineral with afghanite-type framework topology // *Physics and Chemistry of Minerals*. 2021. V. 49. 1.
- 6 Zhitova E.S., Chukanov N.V., Jonsson E., Pekov I.V., Belakovskiy D.I., Vigasina M.F., Zubkova N.V., Van K.V., Britvin S.N. Erssonite, $\text{CaMg}_7\text{Fe}^{3+}_2(\text{OH})_{18}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, a new hydrotalcite-supergroup mineral from Långban, Sweden // *Mineralogical Magazine*. 2021. V. 85(5). P. 817–826.
- 7 Chukanov N.V., Möhn G., Bo F.D., Zubkova N.V., Varlamov D.A., Pekov I.V., Jouffret L., Henot J.-M., Chollet P., Vessely Y., Friis H., Ksenofontov D.A., Agakhanov A.A., Britvin S.N., Joy Desor, Koshlyakova N.N., Pushcharovsky D.Yu. Oberwolfachite, $\text{SrFe}^{3+}_3(\text{AsO}_4)(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$, a new alunite-supergroup mineral from the Clara mine, Schwarzwald, Germany and Monterniers mine, Rhône, France // *Mineralogical Magazine*. 2021. Vol. 85. P. 808–816.
- 8 Kriulina G.Yu., Vasiliev E.A., Garanin V.K. Structural and Mineralogical Features of Diamonds from the Lomonosov Deposit (Arkhangelsk Province): New Data and Interpretation // *Doklady Earth Sciences*. 2019. V. 486. № 2. P. 627–629.

- 9 Kriulina G.Yu., Iskrina A.V., Zedgenizov D.A., Bobrov A.V., Garanin V.K. The Compositional Peculiarities of Microinclusions in Diamonds from the Lomonosov Deposit (Arkhangelsk Province) // *Geochemistry International*. 2019. V. 57. Iss. 9. P. 973–980.
- 10 Garanin V.K., Garanin K.V., Kriulina G.Y., Samosorov G.G. Diamonds from the Arkhangelsk Province, NW Russia. *Springer Mineralogy*. 2021. 248 p.
- 11 Chukanov N.V., Aksenov S.M., Pekov I.V., Belakovskiy D.I., Vozchikova S.A., Britvin S.N. Sergevanite, $\text{Na}_{15}(\text{Ca}_3\text{Mn}_3)(\text{Na}_2\text{Fe})\text{Zr}_3\text{Si}_{26}\text{O}_{72}(\text{OH})_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, a new eudialyte-group mineral from the Lovozero alkaline massif, Kola Peninsula // *Canadian Mineralogist*. 2020. Vol. 58 (4). P. 421–436.
- 12 Ogorodova L.P., Gritsenko Yu.D., Vigasina M.F., Kosova D.A., Melchakova L.V., Fomina A.D. Natural Magnesium Hydrous Orthophosphates Bobierrite and Kovdorskite: FTIR, Raman, Thermal, and Thermochemical Study // *Geochemistry International*. 2020. Vol. 58(2). P. 289–199.
- 13 Moiseev M.N., Panikorovskii T.L., Aksenov S.M., Mazur A.S., Mikhailova J.A., Yakovenchuk V.N., Bazai A.V., Ivaniuk 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. №3. P. 1–14.
- 14 Zhitova E.S., Pekov I.V., Chaikovskiy I.I., Chirkova E.P. Yapaskurt V.O., Bychkova Y.V., Belakovskiy D.I., Chukanov N.V., Zubkova N.V., Krivovichev S.V., Bocharov V.N. Dritsite, $\text{Li}_2\text{Al}_4(\text{OH})(12)\text{Cl} \cdot 2 \text{ center dot } 3\text{H}(2)\text{O}$, a New Gibbsite-Based Hydrotalcite Supergroup Mineral // *Minerals*. 2019. V. 9. Iss. 8. № 492. P. 1–15.
- 15 Lykova I, Varlamov D., Chukanov N., Pekov I., Belakovskiy D., Ivanov O., Zubkova N., Britvin S. Chromium Members of the Pumpellyite Group: Shuiskite-(Cr), $\text{Ca}_2\text{CrCr}_2[\text{SiO}_4][\text{Si}_2\text{O}_6(\text{OH})](\text{OH})_2\text{O}$, a New Mineral, and Shuiskite-(Mg), a New Species Name for Shuiskite // *Minerals*. 2020. Vol. 10(5), 390. P. 1–11.
- 16 Chukanov N.V., Rastsvetaeva R.K., Kazheva O.N., Ivanov O.K., Pekov I.V., Agakhanov A.A., Van K.V., Shcherbakov V.D., Britvin S.N. Saranovskite, $\text{SrCaFe}_2+2(\text{Cr}_4\text{Ti}_2)\text{Ti}_{12}\text{O}_{38}$, a new crichtonite-group mineral // *Physics and Chemistry of Minerals*. 2020. V. 47. №11. P. 1–11.
- 17 Kasatkin A.V., Makovicky E., Plášil J., Škoda R., Agakhanov A.A., Stepanov S.Y., Palamarchuk R.S. Luboržákite, $\text{Mn}_2\text{AsSbS}_5$, a new member of pavonite homologous series from Vorontsovskoe gold deposit, Northern Urals, Russia // *Mineralogical Magazine*. 2020. V. 84. Iss. 5. P. 738–745.

- 18 Kasatkin A.V., Zubkova N.V., Pekov I.V., Chukanov N.V., Škoda R., Agakhanov A.A., Belakovskiy D.I., Britvin S.N., Pushcharovsky D.Yu. The mineralogy of the historical Mochalin Log REE deposit, South Urals, Russia. Part IV. Alexkuznetsovite-(La), $\text{La}_2\text{Mn}(\text{CO}_3)(\text{Si}_2\text{O}_7)$, alexkuznetsovite-(Ce), $\text{Ce}_2\text{Mn}(\text{CO}_3)(\text{Si}_2\text{O}_7)$, and biraite-(La), $\text{La}_2\text{Fe}^{2+}(\text{CO}_3)(\text{Si}_2\text{O}_7)$, three new isostructural minerals and a definition of the biraite group // *Mineralogical Magazine*. 2021. Vol. 85. P. 772–783.
- 19 Касаткин А.В., Шкода Р. Терриуолласеит из Кочкарского золоторудного месторождения, Южный Урал: первая находка в России // *Минералогия*. 2020. Т. 6. №1. С. 47–57.
- 20 Gritsenko Y.D., Chukanov N.V., Aksenov S.M., Pekov I.V., Varlamov D.A., Pautov L.A., Vozchikova S.A., Ksenofontov D.A., Britvin S.N. Odikhinchaite, $\text{Na}_9\text{Sr}_3[(\text{H}_2\text{O})_2\text{Na}]\text{Ca}_6\text{Mn}_3\text{Zr}_3\text{NbSi}(\text{Si}_{24}\text{O}_{72})\text{O}(\text{OH})_3(\text{CO}_3)\cdot\text{H}_2\text{O}$, a New Eudialyte-Group Mineral from the Odikhincha Intrusion, Taimyr Peninsula, Russia. // *Minerals*. 2020. Vol. 10. №1062. P. 1–16.
- 21 Kasatkin A.V., Camara F., Chukanov N.V., Skoda R., Nestola F., Agakhanov A.A., Belakovskiy D.I., Lednyov V.S. Patynite, $\text{NaKC}_4[\text{Si}_9\text{O}_{23}]$, a New Mineral from the Patynskiy Massif, Southern Siberia, Russia // *Minerals*. 2019. V. 9. Iss. 10. № 611. P. 1–19.
- 22 Kasatkin A.V., Makovicky E., Plášil J., Škoda R., Agakhanov A.A., Chaikovskiy I.I., Vlasov E.V., Pekov I.V. Chukotkaite, $\text{AgPb}_7\text{Sb}_5\text{S}_{15}$, a New Sulfosalt Mineral from Eastern Chukotka, Russia // *Canadian Mineralogist*. 2020. Vol. 58. P. 1–10.
- 23 Tolstykh N.D., Tuhý M., Vymazalová A., Plášil J., Laufek F., Kasatkin A.V., Nestola F., Bobrova, O.V. Maletoyvayamite, $\text{Au}_3\text{Se}_4\text{Te}_6$, a new mineral from Maletoyvayam deposit, Kamchatka peninsula, Russia // *Mineralogical Magazine*. 2020. V. 84. P. 117–123.
- 24 Pekov I.V., Agakhanov A.A., Zubkova N.V., Koshlyakova N.N., Shchipalkina N.V., Sandalov F.D., Yapaskurt V.O., Turchkova A.G., Sidorov E.G. Oxidizing-type fumaroles of the Tolbachik volcano, a mineralogical and geochemical unique // *Russian Geology and Geophysics*. 2020. V. 61. №5/6. P. 826–843.
- 25 Pekov I.V., Koshlyakova N.N., Agakhanov A.A., Zubkova N.V., Belakovskiy D.I., Vigasina M.F., Turchkova A.G., Sidorov E.G., Pushcharovsky D.Yu. New arsenate minerals from the Arsenatnaya fumarole, Tolbachik volcano, Kamchatka, Russia. XV. Calciojohillerite, $\text{NaCaMgMg}_2(\text{AsO}_4)_3$, a member of the alluaudite group // *Mineralogical Magazine*. 2021. Vol. 85. P. 215–223.
- 26 Pekov I.V., Zubkova N.V., Agakhanov A.A., Yapaskurt V.O., Belakovskiy D.I., Vigasina M.F., Britvin S.N., Turchkova A.G., Sidorov E.G., Pushcharovsky D.Yu. New arsenate minerals from the Arsenatnaya fumarole, Tolbachik volcano, Kamchatka, Russia.

- XVI. Yurgensonite, $K_2SnTiO_2(AsO_4)_2$, the first natural tin arsenate, and the katiarsite–yurgensonite isomorphous series // *Mineralogical Magazine*. 2021. V. 85(5). P. 698–707.
- 27 Пеков И.В., Зубкова Н.В., Кошлякова Н.Н., Щипалкина Н.В., Ф.Д. Сандалов Ф.Д., М.О. Буллах М.О. Агаханов А.А., Япаскурт В.О., Турчкова А.Г., Сидоров Е.Г. Фумарольные минералообразующие системы вулкана Толбачик на Камчатка – уникальная природная лаборатория // *Материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 100-летию подготовки в Томском государственном университете специалистов в области наук о Земле. Том I. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ. 2021. С. 322–324.*
- 28 Nekrylov N., Popov D.V., Plechov P.Y., Shcherbakov V.D., Danyushevsky L.V. The origin of the Late Quaternary back-arc volcanic rocks from Kamchatka: evidence from the compositions of olivine and olivine-hosted melt inclusions // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2021. V. 176(9). P. 1–20.
- 29 Касаткин А.В., Зубкова Н.В., Чуканов Н.В., Ксенофонтов Д.А., Шкода Р., Тищенко А.И., Воронин М.В., Бритвин С.Н., Пеков И.В. Необычно богатый железом джулголдит-(Fe^{3+}) из Карадагского вулканического массива (Крымский полуостров) // *ЗРМО*. 2021. Ч. CL. № 6. С. 1–17.
- 30 Gerasimov V.Yu., Snezhko V.A., Mosar J., Pismennyi A.N., Enna N.L., Ulyanov A.A. The Zirconometry and Thermochronology of Migmatized Gneisses of the Gondaray Metamorphic Complex (Greater Caucasus) // *Moscow University Geology Bulletin*. 2020. Vol. 75. №5. P. 481–495.
- 31 Bindeman I.N., Wotzlaw J.-F., Stern R., Chiaradia M., Guillong M., Colón D.P. Geochronology and geochemistry data for the Elbrus, Tyrnyauz, and Chegem magmatic centers, Greater Caucasus, Russia // *Data in Brief*. 2021. V. 35. P. 106896.
- 32 Stifeeva M.V., Salnikova E.B., Samsonov A.V., Kotov A.B., Gritsenko Y.D. Garnet U-Pb Age of Skarns from Dashkesan Deposit (Lesser Caucasus) // *Doklady Earth Sciences*. 2019. V. 487. № 2. P. 953–956.
- 33 Agakhanov A.A., Pautov L.A., Kasatkin A.V., Karpenko V.Yu., Sokolova E., Day M.C., Hawthorne F.C., Muftakhov V.A., Pekov I.V., Cámara F., Britvin S.N. Fluorapophyllite-(Cs), $CsCa_4(Si_8O_{20})F(H_2O)_8$, a new apophyllite-group mineral from the Darai-Pioz Massif, Tien-Shan, northern Tajikistan // *Canadian Mineralogist*. 2019. V. 57(6). P. 965–971.
- 34 Pautov L.A., Mirakov M.A., Cámara F., Sokolova E., Hawthorne F.C., Schodibekov M.A., Karpenko V.Y. Badakhshanite-(Y), $Y_2Mn_4Al(Si_2B_7BeO_{24})$, a new mineral species of the

- perettiite group from a granite miarolitic pegmatite in Eastern Pamir, the Gorno Badakhshan Autonomous Oblast, Tajikistan // *Canadian Mineralogist*. 2020. Vol. 58 (3). P. 384–394.
- 35 Мираков М.А., Паутов Л.А., Карпенко В.Ю., Файзиев А.Р., Махмадшариф С. Пауфлерит β -VO(SO₄) в возгонах природного подземного пожара в урочище Кухи-Малик (Рават) на Фан-Ягнобском угольном месторождении, Таджикистан // *Новые данные о минералах*. 2019. Т. 53. Вып. 4. С. 114–122.
- 36 Pautov L.A. (2), Mirakov M.A., Siidra O.I., Faiziev A.R., Nazarchuk E.V., Karpenko V.Y., Makhmadsharif S. Falgarite, K₄(VO)₃(SO₄)₅, a new mineral from sublimates of a natural underground coal fire at the tract of Kukhi-Malik, Fan-Yagnob coal deposit, Tajikistan // *Mineralogical Magazine*. 2020. Vol. 84(3). P. 455–462.
- 37 Karpenko V.Y., Pautov L.A., Siidra O.I., Mirakov M.A. Ermakovite, IMA 2020-054 CNMNC Newsletter 58 // *Eur. J. Mineral.* 2020. 32.
- 38 Clark A.H. Alpha-arsenic sulfide, from Mina Alacràn, Pampa Larga, Chile // *Amer. Mineralogist*. 1970. Vol. 55. P. 1338–1344.
- 39 Roland G.W. Concerning the α -AsS realgar inversion // *Canad. Mineralogist*. 1972. Vol. 11. P. 520–525.
- 40 Yu S.-C., Zoltai T. Crystallography of a high-temperature phase of realgar // *Amer. Mineralogist*. 1972. Vol. 57. P. 1873–1875.
- 41 Криулина Г.Ю., Гаранин В.К., Самосоров Г.Г. Прогнозирование качества алмазного сырья в месторождениях различных петрохимических типов // *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2013. №6. С. 25–32.
- 42 Криулина Г.Ю. Конституционные характеристики алмаза из месторождений Архангельской и Якутской алмазоносных провинций. Автореферат дисс. на соискание ученой степени к.г.-м.н., 2012. 26 с.
- 43 Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Типоморфизм алмазов Сибирской платформы. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр». 2003. 603 с.
- 44 Геммология алмаза: учебник / Ю.П. Солодова, М.В. Николаев, К.К. Курбатов и др. М.: 2008. 416 с.
- 45 Karpenko V.Y., Zhitova E.S., Pautov L.A., Agakhanov A.A., Siidra O.I., Krzhizhanovskaya M.G., Rassulov V.A. Bocharov V.N. Akopovaitite, Li₂Al₄(OH)₁₂(CO₃)(H₂O)₃, a new Li member of the hydrotalcite supergroup from Turkestan Range, Kyrgyzstan // *Mineralogical Magazine*. 2020. V. 84(2). P. 301–311.
- 46 Pautov L.A., Mirakov M.A., Sokolova E., Day M.C., Hawthorne F.C., Schodibekov M.A., Karpenko V.Y., Makhmadsharif S., Faiziev A.R. Shakhdaraitite-(Y), ScYNb₂O₈, from the Leskhozovskaya granitic pegmatite, The Valley of the Shakh dara River, South-Western

- Pamir, Gorno.badakhshanskii Autonomous Region, Tajikistan: New mineral description and crystal structure // *Canadian Mineralogist*. 2021. V. 59. (in press).
- 47 Дмитриев Э.А. Гранитные пегматиты Восточного Памира и особенности их камнесамоцветной минерализации // *Изв. АН ТаджССР. Сер. геол. и физ.-техн. наук*. 1983. № 3(89). С. 73–81.
- 48 Россовский Л.Н., Морозов С.А., Скригитиль А.М. Особенности формирования миароловых пегматитов Восточного Памира // *Известия АН СССР. Сер. геол.* 1991. № 5. С. 92–103.
- 49 Gorelova L.A., Panikorovskii T.L., Pautov L.A., Vereshchagin O.S., Krzhizhanovskaya M.G., Spiridonova D.V. Temperature-versus compositional-induced structural deformations of gadolinite group minerals with various Be/B ratio // *Journal of Solid State Chemistry*. 2021. Vol. 299. Article 122187.
- 50 Kasatkin A.V., Hestola F., Škoda R., Chukanov N.V., Agakhanov A.A., Belakovskiy D.I., Lanza A., Hola M., Rumsey M.S. Hingganite-(Nd), $\text{Nd}_2\text{Be}_2\text{Si}_2\text{O}_8(\text{OH})_2$, a New Gadolinite-Supergroup Mineral from Zagi Mountain, Pakistan // *Canadian Mineralogist*. 2020. Vol. 58. P. 1–14.
- 51 Kasatkin A.V., Pekov I.V., Zubkova N.V., Chukanov N.V., Škoda R., Agakhanov A.A., Belakovskiy D.I., Ksenofontov D.A., Plášil J., Kuznetsov A.M., Britvin S.B., Pushcharovsky D.Y. The mineralogy of the historical Mochalin Log REE deposit, South Urals, Russia. Part III. Percleveite-(La), $\text{La}_2\text{Si}_2\text{O}_7$, a new REE disilicate mineral // *Mineralogical Magazine*. 2020. V. 84. P. 913–920. DOI: 10.1180/mgm.2020.81
- 52 Agakhanov A.A., Pautov L.A., Pekov I.V., Karpenko V.Y., Siidra O.I., Sokolova E., Hawthorne F.C., Faiziev A.R., Kasatkin A.V., Kulikova I.M. and Muftakhov V.A. Kreiterite, IMA 2019-041. CNMNC Newsletter No. 51 // 2019. *European Journal of Mineralogy*. 31.
- 53 Agakhanov A.A., Pautov L.A., Zubkova N.V., Zolotarev A.A., Kasatkin A.V., Karpenko V.Y., Pekov I.V., Agakhanova V.A., Muftakhov V.A., Škoda R., Britvin S.N. Dutkevichite-(Ce), IMA 2019-102. CNMNC Newsletter 54 // *Eur. J. Mineral.*: 32.
- 54 Chukanov N.V., Aksenov S.M., Pekov I.V., Belakovskiy D.I., Vozchikova S.A., Britvin S.N. Sergevanite, $\text{Na}_{15}(\text{Ca}_3\text{Mn}_3)(\text{Na}_2\text{Fe})\text{Zr}_3\text{Si}_{26}\text{O}_{72}(\text{OH})_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, a new eudialyte-group mineral from the Lovozero alkaline massif, Kola Peninsula // *Canadian Mineralogist*. 2020. Vol. 58 (4). P. 421–436.
- 55 Kasatkin A.V., Plášil J., Makovicky E., Chukanov N.V., Škoda R., Agakhanov A.A., Stepanov S.Y., Palamarchuk R.S. Auerbakhite, $\text{MnTl}_2\text{As}_2\text{S}_5$, a new thallium sulfosalt from

- the Vorontsovskoe gold deposit. Northern Urals, Russia // *Journal of Geosciences*. 2021. Vol. 66(2). P. 89–96.
- 56 Stepanov S.Y., Palamarchuk R.S., Varlamov D.A., Kiseleva D.V., Sharpyonok L.N., Škoda R. and Kasatkin A.V. The Features of Native Gold in Ore bearing Breccias with Realgar orpiment Cement of the Vorontsovskoe Deposit (Northern Urals, Russia) // *Minerals*. 2021. Vol. 11. P. 541.
- 57 Касаткин А.В., Степанов С.Ю., Цыганко М.В., Шкода Р., Нестола Ф., Плашил Я., Маковицки Э., Агаханов А.А., Паламарчук Р.С. Минералогия Воронцовского золоторудного месторождения (Северный Урал). Часть 1: История изучения, минеральные ассоциации, кадастр минеральных видов // *Минералогия*. 2020. Т. 6. №4.
- 58 Касаткин А.В., Степанов С.Ю., Цыганко М.В., Шкода Р., Нестола Ф., Плашил Я., Маковицки Э., Агаханов А.А., Паламарчук Р.С. Минералогия Воронцовского золоторудного месторождения (Северный Урал). Часть 2: Простые вещества, сульфиды, арсениды, теллуриды // *Минералогия*. 2021. Том. 7(1), С. 3–20.
- 59 Касаткин А.В., Степанов С.Ю., Цыганко М.В., Шкода Р., Нестола Ф., Плашил Я., Маковицки Э., Агаханов А.А., Паламарчук Р.С. Минералогия Воронцовского золоторудного месторождения (Северный Урал). Часть 3: Сульфосоли // *Минералогия*. 2021. Т. 7(2). С. 5–49.
- 60 Касаткин А.В., Степанов С.Ю., Цыганко М.В., Шкода Р., Нестола Ф., Плашил Я., Маковицки Э., Агаханов А.А., Паламарчук Р.С. Минералогия Воронцовского золоторудного месторождения (Северный Урал). Часть 4: Кислородные соединения // *Минералогия*. 2021. Том. 7(3). С. 5–31.
- 61 Kasatkin A., Makovicky E., Plasil J., Skoda R., Chukanov N.V., Stepanov S.Y., Agakhanov A.A., Nestola F. Gladkovskyite, $MnTlAs_3S_6$, a new thallium sulfosalt from the Vorontsovskoe gold deposit, Northern Urals, Russia // *Journal of Geosciences*. 2019. V. 64. Iss. 3. P. 207–218.
- 62 Kasatkin A.V., Makovicky E., Plášil J., Škoda R., Agakhanov A.A. and Tsyganko M.V. Pokhodyashinite, IMA 2019-130. CNMNC Newsletter No. 55 // *Mineralogical Magazine*. 2020. 84.
- 63 Kasatkin A.V., Plášil J., Makovicky E., Chukanov N.V., Škoda R., Agakhanov A.A., Tsyganko M.V. Gungerite, IMA 2020-009. CNMNC Newsletter 56 // *Eur. J. Mineral.* 2020. 32.
- 64 Belogub E.V., Britvin S.N., Shilovskikh V.V., Pautov L.A., Kotlyarov V.A., Zaykova E.V. Zaykovite, IMA 2019-084. CNMNC Newsletter 54 // *Eur. J. Mineral.* 32.

- 65 Belogub E.V., Britvin S.N., Shilovskikh V.V., Pautov L.A., Kotlyarov V.A., Krzhizhanovskaya M.G., Novoselov K.A., Zaykova E.V., Blinov I.A.: Selenolaurite, IMA 2020-027. CNMNC Newsletter 56 // Eur. J. Mineral. 32.
- 66 Sidorov E.G., Kuttyrev A.V., Zhitova E.Z., Agakhanov A.A., Sandimirova E.I., Vymazalova A., Chubarov V.M., Zolotarev A.A. Kufahrite, PtPb, a new mineral from Ledyanoy Creek placer, Galmoenan ultramafic complex, Koryak Highlands, Russia // Mineralogical Magazine. Vol. 85. 2021. P. 254–261.
- 67 Паутов Л.А., Мираков М.А., Искандаров Ф.Ш. О деарсенизации сперрилита при прокалке шлихов // Новые данные о минералах. 2021. Т. 55. В. 1. С. 14–23.
- 68 Хлыбов В.В., Симакова Ю.С. Гипергенная сульфатная минерализация на келловейских глинах реки Ухтым (западное Притиманье) // Вестник УрО РМО. 2005. №6. С. 9–11.
- 69 Лиманцева О.А., Рыженко Б.Н., Черкасова Е.В. Прогноз влияния кислотного дренажа на изменение гидрогеохимической обстановки в районах сульфидсодержащих месторождений // Геохимия. №10. С. 945–960.
- 70 Marion G.M., Kargel J.S., Catling D.C. Modelling ferrous-ferric iron chemistry with application to martian surface geochemistry // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2008. V. 72. P. 242–266.
- 71 Hemingway B.S., Seal R.R., II, Chou I.-M. Thermodynamic data for modeling acidic mine drainage problems: compilation and estimation of data for selected soluble iron-sulfate minerals. 2002. Open-File Report 02-161. U.S. Geol. Surv. Reston VA.
- 72 Chukanov N.V. Infrared Spectra of Mineral Species: Extended Library. Springer-Verlag GmbH, Dordrecht–Heidelberg–New York–London. 2014. 1703 p.
- 73 Majzlan J., Alpers C.N., Koch C.B., McCleskey R.B., Myneni S.C.B., Neil J.M. Vibrational, X-ray absorption, and Mössbauer spectra of sulfate minerals from the weathered massive sulfide deposit at Iron Mountain, California // *Chem. Geol.* 2011. V. 284. P. 296–305.
- 74 Иванова В.П., Касатов Б.К., Красавина Т.Н., Розилова Е.Л. Термический анализ минералов и горных пород. Ленинград: Недра, 1974. 399 с.
- 75 Földvári M. Handbook of thermogravimetric system of minerals and its use in geological practice // Occasional Papers of the Geological Institute of Hungary. 2011. V. 213. 180 p.
- 76 Dyar M.D., Breves E., Jawin E., Marshand G., Nelms M., O'Connor V., Peel S., Rothstein Y., Sklute E.C., Lane M.D., Bishop J.L., Mertzman S.A. What lurks in the Martian rocks and soil? Investigations of sulfates, phosphates, and perchlorates. Mössbauer parameters of iron in sulfate minerals. *Am. Mineral.* 2013. V. 98. P. 1943–1965.

- 77 Hawthorne F.C., Krivovichev S.V., Burns P.C. The Crystal Chemistry of Sulfate Minerals in «Sulfate minerals: crystallography, geochemistry, and environmental significance» (Alpers C.N., Jambor J.L., Nordstrom D.K., eds.) // *Rev. Mineral. Geochem.* 2002. V. 40. P. 608 p.
- 78 Skoblinskaya N.N., Krasilnikov K.G. Changes in crystal structure of ettringite on dehydration 1 // *Cem. Concr. Res.* 1975. V. 5. P. 381–394.
- 79 Moore A.E., Taylor H.F.W. Crystal structure of ettringite // *Acta Crystallogr.* B26. 1970. P. 386–391.
- 80 Hartman M.R., Brady S.K., Berliner R., Conrady M.S. The evolution of structural changes in ettringite during thermal decomposition // *J.Solid State Chem.* 2006. V. 179. P. 1259–1272.
- 81 Scholtzova E., Kuckova L., Kožíšek J., Tunega D. Structural and spectroscopic characterization of ettringite mineral – combined DFT and experimental study // *J. Mol. Struct.* 2015. V. 1100. P. 216–224.
- 82 Zhou Q., Glasser F.P. Thermal stability and decomposition mechanisms of ettringite at <120 °C. *Cem. Concr. Res.* 2001. V. 31. P.1333–1339.
- 83 Карпенко В.Ю., Паутов Л.А., Шодибеков М., Махмадшариф С., Мираков М.А. Кокониноит: находка на рудопоявлении Зор-Ярчи-Чак, Восточный Памир // *Новые данные о минералах.* 2020. Т. 54. Вып. 1. С. 19–25.
- 84 Chukanov N.V., Möhn G., Zubkova N.V., Ksenofontov D.A., Pekov I.V., Agakhanov A.A., Britvin S.N., Desor J. Bojarite, $\text{Cu}_3(\text{N}_3\text{C}_2\text{H}_2)_3(\text{OH})\text{Cl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, a new mineral species with a microporous metal–organic framework from the guano deposit at Pabellón de Pica, Iquique Province, Chile // *Mineralogical Magazine.* 2020. V. 84. P. 921–927.
- 85 Chukanov N.V., Möhn G., Pekov I.V., Zubkova N.V., Ksenofontov D.A., Belakovskiy D.I., Vozchikova S.A., Britvin S.N., Desor J. Ammoniotinsleyite, $(\text{NH}_4)\text{Al}_2(\text{PO}_4)_2(\text{OH}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, a new mineral species from the guano deposit at Pabellón de Pica, Iquique Province, Chile. *Mineralogical Magazine.* 2020. 84 (5). P. 705–711.
- 86 Герасимов В.Ю., Снежко В.А., Мозар Д., Письменный А.Н., Энна Н.Л., Ульянов А.А. Цирконометрия и термохронология мигматизированных гнейсов гондарайского метаморфического комплекса Большого Кавказа // *Вестник Московского Университета.* 2020. №4. С. 30–44.
- 87 Герасимов В.Ю., Ульянов А.А., Снежко В.А., Мозар Д., Лаврищев В.А., Газеев В.М., Гурбанов А.Г. Цирконометрия юрских базальтов Гойтхской вулканической области Западного Кавказа // *Вестник Московского университета.* 2022. Серия 4: Геология, №1 (в печати).

- 88 Rubin A., Ma C. Meteorite Mineralogy. Oxford Research Encyclopedia of Planetary Science. 2020. 49 p.
- 89 Konovalova K.A., Plechov P.Y., Litasov K.D., Shcherbakov V.D., Vasiliev S.P. Mineralogy of the Complex Refractory Metal Nuggets in B1 Type CAI from CV3-Chondrite Northwest Africa 12590. In Lunar and Planetary Science Conference. 2021. No. 2548. P. 1961.
- 90 Konovalova K.A., Plechov P.Y., Litasov K.D., Shcherbakov V.D. Ruthenium-Dominated Phases in the Heterogeneous Refractory Metal Nuggets in Calcium-Aluminium Inclusions in the CV3R Chondrite Northwest Africa 12590 // LPI Contributions. 2021. 2609. 6152.
- 91 Бажан И.С., Литасов К.Д., Бадюков Д.Д. Фазы высокого давления в L6 хондрите Dhofar 922: кристаллизация оливин-рингвудитовых агрегатов и жадеита из расплава // Геология и геофизика. 2020. Т. 61(3). С. 301–311.
- 92 Варламов Д.А., Ермолаева В.Н., Чуканов Н.В., Янчев С., Вигасина М.Ф., Плечов П.Ю. Новое в минералогии надгруппы эпидота: необычные химические составы, типохимизм, КР-спектроскопия // ЗРМО. 2019. Т. 148. Вып. 1. С. 79–99.
- 93 Ogorodova L.P., Gritsenko Y.D., Vigasina M.F., Bychkov A.Y., Ksenofontov D.A., Melchakova L.V. Thermodynamic Properties of Montecellite // Geochemistry International. 2019. V. 57. Iss. 12. P. 1343–1348.
- 94 Plechov P.Y., Shcherbakov V.D., Nekrylov N.A. Extremely magnesian olivine in igneous rocks. Russian Geology and Geophysics. 2018. Vol. 59(12). P. 1702–1717.
- 95 Plechov P.Y., Nekrylov N. A., Shcherbakov V.D., Tikhonova M.S. Extreme-Mg olivines from venancite lavas of Pian di Celle volcano (Italy) // Doklady Earth Sciences. 2017. Vol. 474. № 1. P. 507–510.
- 96 Nekrylov N., Plechov P.Y., Gritsenko Y.D., Portnyagin M.V., Shcherbakov V.D., Aydov V.A., Garbe-Schönberg D. Major and trace element composition of olivine from magnesian skarns and silicate marbles // American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials. 2021. V. 106(2). P. 206–215.
- 97 Popov D.V., Brovchenko V.D., Nekrylov N.A., Plechov P.Y., Spikings R.A., Tyutyunnik O.A., Krigman L.V., Anosova M.O., Kostitsyn Y.A., Soloviev A.V. Removing a mask of alteration: Geochemistry and age of the Karadag volcanic sequence in SE Crimea // Lithos. 2019. V. 324. P. 371–384.
- 98 Tobelko D.P., Portnyagin M.V., Krashenninikov S.P., Grib E.N., Plechov P.Y. Compositions and Formation Conditions of Primitive Magmas of the Karymsky Volcanic Center, Kamchatka: Evidence from Melt Inclusions and Trace-Element Thermobarometry // Petrology. 2019. V. 27. Iss. 3. P. 243–264.

- 99 Korneeva A.A., Nekrylov N., Kamenetsky V.S., Portnyagin M.V., Savelyev D.P., Krasheninnikov S.P., Abersteiner A., Kamenetsky M.B., Zelenski M.E., Shcherbakov V.D., Botcharnikov R.E. Composition, crystallization conditions and genesis of sulfide-saturated parental melts of olivine-phyric rocks from Kamchatsky Mys (Kamchatka, Russia) // *Lithos*. 2020. V. 370. 105657. P. 1–14.
- 100 Прокофьев В.Ю., Наумов В.Б., Романько А.Е., Балашова А.Л., Плечов П.Ю., Имамвердиев Н.А. Низкотемпературные расплавы вулкана Базман, Иран // *Доклады Академии наук*. 2019. Т.485. № 5. С. 614–618.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Список публикаций по теме за 2021 год

- 1 Касаткин А.В., Зубкова Н.В., Чуканов Н.В., Ксенофонов Д.А., Шкода Р., Тищенко А.И., Воронин М.В., Бритвин С.Н., Пеков И.В. Необычно богатый железом джулголдит-(Fe³⁺) из Карадагского вулканического массива (Крымский полуостров) // ЗРМО. 2021. Ч. CL. № 6. С. 1–17.
- 2 Касаткин А.В., Степанов С.Ю., Цыганко М.В., Шкода Р., Нестола Ф., Плашил Я., Маковицки Э., Агаханов А.А., Паламарчук Р.С. Минералогия Воронцовского золоторудного месторождения (Северный Урал). Часть 2: Простые вещества, сульфиды, арсениды, теллуриды // Минералогия. 2021. Том. 7(1), С. 3–20.
- 3 Касаткин А.В., Степанов С.Ю., Цыганко М.В., Шкода Р., Нестола Ф., Плашил Я., Маковицки Э., Агаханов А.А., Паламарчук Р.С. Минералогия Воронцовского золоторудного месторождения (Северный Урал). Часть 3: Сульфосоли // Минералогия. 2021. Т. 7(2). С. 5–49.
- 4 Касаткин А.В., Степанов С.Ю., Цыганко М.В., Шкода Р., Нестола Ф., Плашил Я., Маковицки Э., Агаханов А.А., Паламарчук Р.С. Минералогия Воронцовского золоторудного месторождения (Северный Урал). Часть 4: Кислородные соединения // Минералогия. 2021. Том. 7(3). С. 5–31.
- 5 Кутырев А.В., Каменецкий В.С., Некрылов Н.А. Силикатные включения в минералах системы Os–Ir–Ru россыпи Адамсфилд (Западная Тасмания) // Новые данные о минералах. 2021. Т. 55. В. 1. С. 5–13.
- 6 Паутов Л.А., Мираков М.А., Искандаров Ф.Ш. О деарсенизации сперрилита при прокалке шлихов // Новые данные о минералах. 2021. Т. 55. В. 1. С. 14–23.
- 7 Плечов П.Ю., Белаковский Д.И., Касаткин А.В., Пеков И.В., Агаханов А.А., Паутов Л.А., Гриценко Ю.Д., Карпенко В.Ю., Гаранин В.К., Коновалова К.А., Некрылов Н.А. Важнейшие научные результаты Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана в 2020 году // Новые данные о минералах. 2021. Т. 55. В. 3. С. 57–80.
- 8 Червяцова О.Я., Касаткин А.В., Чуканов Н.В., Нестола Ф. Сульфатная минерализация в тоннеле пещеры Пятигорский провал (Северный Кавказ) // Минералогия. 2021. Том. 7(1). С. 76–87.
- 9 Agakhanov A.A., Kasatkin A.V., Britvin S.N., Siidra O.I., Pautov L.A., Pekov I.V., Karpenko V.Yu. Cesiokenopyrochlore, the first natural niobate with an inverse pyrochlore structure // Canadian Mineralogist. 2021. Vol. 59. P. 149–157.

- 10 Akinin V.V., Bindeman I.N. Variations of Oxygen Isotopic Composition in Magmas of Okhotsk–Chukotka Volcanic Belt // *Doklady Earth Sciences*. 2021. V. 499. № 1. P. 550–555.
- 11 Balatskiy D.V., Dedushenko S.K., Gritsenko Yu.D., Ksenofontov D.A., Perfiliev Yu.D. X-ray and mössbauer study of phosphosiderite from Atacama, Chile // *Hyperfine Interactions*. 2021. T. 242. № 14. C. 13–19.
- 12 Barbaro A., Domeneghetti M.Ch., Litasov K.D., Ferrière L., Pittarello L., Christ O., Lorenzon S., Alvaro M., Nestola F. Origin of micrometer-sized impact diamonds in ureilites by catalytic growth involving Fe-Ni-silicide: The example of Kenna meteorite // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2021. V. 309. P. 286–298.
- 13 Bekker T., Litasov K.D., Shatskiy A., Sagatov N., Podborodnikov I., Krinitsin P. Experimental and Ab Initio Investigation of the Formation of Phosphoran Olivine // *ACS Earth and Space Chemistry*. 2021. V. 5. № 6. P. 1373–1383.
- 14 Bindeman I.N., Colón D.P., Wotzlaw J.-F., Stern R., Chiaradia M., Guillong M. Young Silicic Magmatism of the Greater Caucasus, Russia, with implication for its delamination origin based on zircon petrochronology and thermomechanical modeling // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2021. V. 412. P. 107173.
- 15 Bindeman I.N., Wotzlaw J.-F., Stern R., Chiaradia M., Guillong M., Colón D.P. Geochronology and geochemistry data for the Elbrus, Tyrnyauz, and Chegem magmatic centers, Greater Caucasus, Russia // *Data in Brief*. 2021. V. 35. P. 106896.
- 16 Borisova A., Zagrtednov N., Toplis M., Bohron W., Nédélec A., Safonov O., Pokrovski G., Ceuleneer G., Bindeman I., Melnik O., Jochum K., Stoll . Weis U., Bychkov A., Gurenko A., Shcheka S., Terehin A., Polukeev V., Varlamov D., Chariteiro K., Gouy S., de Parseval P. Hydrated Peridotite–Basaltic Melt Interaction Part I: Planetary Felsic Crust Formation at Shallow Depth // *Frontiers in Earth Science*. 2021. V. 9. P. 640464.
- 17 Chukanov N.V., Möhn G., Bo F.D., Zubkova N.V., Varlamov D.A., Pekov I.V., Jouffret L., Henot J.-M., Chollet P., Vessely Y., Friis H., Ksenofontov D.A., Agakhanov A.A., Britvin S.N., Joy Desor, Koshlyakova N.N., Pushcharovsky D.Yu. Oberwolfachite, $\text{SrFe}^{3+}_3(\text{AsO}_4)(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$, a new alunite-supergroup mineral from the Clara mine, Schwarzwald, Germany and Monterniers mine, Rhône, France // *Mineralogical Magazine*. 2021. Vol. 85. P. 808–816.
- 18 Chukanov N.V., Varlamov D.A., Pekov I.V., Zubkova N.V., Kasatkin A.V., Britvin S.N. Coupled Substitutions in Natural $\text{MnO}(\text{OH})$ Polymorphs: Infrared Spectroscopic Investigation // *Minerals*. 2021. Vol. 11. P. 969.

- 19 Davydova V.O., Shcherbakov V.D., Plechov P.Yu., Koulakov I.Yu. Petrological evidence of rapid evolution of the magma plumbing system of Bezymianny volcano in Kamchatka before the December 20th, 2017 eruption // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2022. V. 421. P. 107422.
- 20 Garanin V.K., Garanin K.V., Kriulina G.Y., Samosorov G.G. Diamonds from the Arkhangelsk Province, NW Russia. *Springer Mineralogy*. 2021. 248 p. ISBN 978-3-030-35716-0. 500 copy.
- 21 Gorelova L.A., Pakhomova A.S., Krzhizhanovskaya M.G., Pankin D. V., Krivovichev S.V., Dubrovinsky L.S. and Kasatkin A.V. Crystal Structure Evolution of Slawsonite $\text{SrAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ and Paracelsian $\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ upon Compression and Decompression // *The Journal of Physical Chemistry C*. 2021. Vol. 6. P. 1–9.
- 22 Gorelova L.A., Panikorovskii T.L., Pautov L.A., Vereshchagin O.S., Krzhizhanovskaya M.G., Spiridonova D.V. Temperature-versus compositional-induced structural deformations of gadolinite group minerals with various Be/B ratio // *Journal of Solid State Chemistry*. 2021. Vol. 299. Article 122187.
- 23 Gorelova L., Vereshchagin O., Kasatkin A. Thermal Expansion and Polymorphism of Slawsonite $\text{SrAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ // *Minerals*. 2021. Vol. 11 P. 1150.
- 24 Hampton R.L., Bindeman I.N., Stern R.A., Coble M.A., Rooyakkers S.M. A microanalytical oxygen isotopic and U-Th geochronologic investigation and modeling of rhyolite petrogenesis at the Krafla Central Volcano, Iceland // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2021. V. 414. P. 107229.
- 25 Kasatkin A.V., Plášil J., Makovicky E., Chukanov N.V., Škoda R., Agakhanov A.A., Stepanov S.Y., Palamarchuk R.S. Auerbakhite, $\text{MnTl}_2\text{As}_2\text{S}_5$, a new thallium sulfosalt from the Vorontsovskoe gold deposit. Northern Urals, Russia // *Journal of Geosciences*. 2021. Vol. 66(2). P. 89–96.
- 26 Kasatkin A.V., Plášil J., Škoda R., Campostrini I., Chukanov N.V., Agakhanov A.A., Karpenko V.Yu., Belakovskiy D.I. Ferroefremovite, $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}^{2+}2(\text{SO}_4)_3$, a new mineral from Solfatara di Pozzuoli, Campania, Italy // *Canadian Mineralogist*. 2021. Vol. 59. P. 59–68.
- 27 Kasatkin A.V., Zubkova N.V., Pekov I.V., Chukanov N.V., Škoda R., Agakhanov A.A., Belakovskiy D.I., Britvin S.N., Pushcharovsky D.Yu. The mineralogy of the historical Mochalin Log REE deposit, South Urals, Russia. Part IV. Alexkuznetsovite-(La), $\text{La}_2\text{Mn}(\text{CO}_3)(\text{Si}_2\text{O}_7)$, alexkuznetsovite-(Ce), $\text{Ce}_2\text{Mn}(\text{CO}_3)(\text{Si}_2\text{O}_7)$, and biraite-(La), $\text{La}_2\text{Fe}^{2+}(\text{CO}_3)(\text{Si}_2\text{O}_7)$, three new isostructural minerals and a definition of the biraite group // *Mineralogical Magazine*. 2021. Vol. 85. P. 772–783.

- 28 Konovalova K.A., Plechov P.Yu., Litasov K.D., Shcherbakov V.D. Ruthenium-Dominated Phases in the Heterogeneous Refractory Metal Nuggets in Calcium-Aluminium Inclusions in the CV3R Chondrite Northwest Africa 12590 // *LPI Contributions*. 2021. V. 2609. P. 6152.
- 29 Kotov A.A., Smirnov S.Z., Plechov P.Yu., Persikov E.S., Chertkova N.V., Maksimovich I.A., Karmanov N.S., Buhtiyarov P.G. Method for determining water content in natural rhyolitic melts by Raman spectroscopy and electron microprobe analysis // *Petrology*. 2021. V. 29. № 4. P. 386–403.
- 30 Litasov K.D., Kagi H., Bekker T.B., Makino Y., Hirata T., Brazhkin V.V. Why Tolbachik diamonds cannot be natural // *American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials*. 2021. V. 106. № 1. P. 44–53.
- 31 Makovicky E., Plášil J., Kasatkin A.V., Škoda R. The Crystal Structure of $Tl_{2.36}Sb_{5.98}As_{4.59}S_{17}$, the Lead-Free Endmember of the Chabournéite Homeotypic Group // *Canadian Mineralogist*. 2021. Vol. 59. P. 533–549.
- 32 Nekrylov N., Korneeva A.A., Savelyev D.P., Antsiferova T.N. Variations of Source Composition and Melting Degrees of Olivine-Phyric Rocks from Kamchatsky Mys: Results of Geochemical Modeling of Trace Element Contents in Melts // *Petrology*. 2021. V. 29(1). P. 14–23.
- 33 Nekrylov N., Plechov P.Y., Gritsenko Y.D., Portnyagin M.V., Shcherbakov V.D., Aydov V.A., Garbe-Schönberg D. Major and trace element composition of olivine from magnesian skarns and silicate marbles // *American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials*. 2021. V. 106(2). P. 206–215.
- 34 Nekrylov N., Popov D.V., Plechov P.Y., Shcherbakov V.D., Danyushevsky L.V. The origin of the Late Quaternary back-arc volcanic rocks from Kamchatka: evidence from the compositions of olivine and olivine-hosted melt inclusions // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2021. V. 176(9). P. 1–20.
- 35 Ogorodova L.P., Gritsenko Yu.D., Kosova D.A., Vigasina M.F., Melchakova L.V., Ksenofontov D.A., Dedushenko S.K. Physicochemical and Thermochemical Study of Ettringite // *Geochemistry International*. 2021. Vol. 59. № 12. P. 1188–1197.
- 36 Ogorodova L.P., Gritsenko Yu.D., Vigasina M.F., Kosova D.A., Melchakova L.V., Ksenofontov D.A., Dedushenko S.K. Physicochemical and Calorimetric Study of Aluminocopiapite and Thermodynamic Properties of Copiapite-Group Minerals // *Geochemistry International*. 2021. Vol. 59. № 3. P. 333–340.
- 37 Pekov I.V., Koshlyakova N.N., Agakhanov A.A., Zubkova N.V., Belakovskiy D.I., Vigasina M.F., Turchkova A.G., Sidorov E.G., Pushcharovsky D.Yu. New arsenate minerals from the Arsenatnaya fumarole, Tolbachik volcano, Kamchatka, Russia. XV. Calciojohillerite,

- NaCaMgMg₂(AsO₄)₃, a member of the alluaudite group // *Mineralogical Magazine*. 2021. Vol. 85. P. 215–223.
- 38 Pekov I.V., Zubkova N.V., Agakhanov A.A., Yapaskurt V.O., Belakovskiy D.I., Vigasina M.F., Britvin S.N., Turchkova A.G., Sidorov E.G., Pushcharovsky D.Yu. New arsenate minerals from the Arsenatnaya fumarole, Tolbachik volcano, Kamchatka, Russia. XVI. Yurgensonite, K₂SnTiO₂(AsO₄)₂, the first natural tin arsenate, and the katiarsite–yurgensonite isomorphous series // *Mineralogical Magazine*. 2021. V. 85(5). P. 698–707.
- 39 Plášil J., Petříček V., Škoda R., Meisser N., Kasatkin A.V. Hidden and apparent twins in uranyl-oxide minerals agrinierite and rameauite: a demonstration of metric and reticular merohedry // *Journal of Applied Crystallography*. 2021. Vol. 54(6). P. 1–8.
- 40 Sagatov N.E., Bazarbek A.-D. B., Inerbaev T.M., Gavryushkin P.N., Akilbekov A.T., Litasov K.D. Phase Relations in the Ni–S System at High Pressures from ab Initio Computations // *ACS Earth and Space Chemistry*. 2021. V. 5. № 3. P. 596–603.
- 41 Sagatov N.E., Bekker T.B., Podborodnikov I.V., Litasov K.D. First-Principles investigation of Pressure-Induced structural transformations of barium borates in the BaO-B₂O₃-BaF₂ system in the range of 0–10 GPa // *Computational Materials Science*. 2021. V. 199. P. 110735.
- 42 Sagatov N.E., Sagatova D.N., Gavryushkin P.N., Litasov K.D. Fe–N System at High Pressures and Its Relevance to the Earth’s Core Composition // *Crystal Growth & Design*. 2021. V. 21. № 11. P. 6101–6109.
- 43 Saubin E., Kennedy B., Tuffen H., Nichols A.R.L., Villeneuve M., Bindeman I., Mortensen A., Schipper C. Ian, Wadsworth F.B., Watson T., Zierenberg R. Textural and geochemical window into the IDDP-1 rhyolitic melt, Krafla, Iceland, and its reaction to drilling // *GSA Bulletin*. 2021.
- 44 Shatskiy A., Arefiev A.V., Podborodnikov I.V., Litasov K.D. Effect of water on carbonate-silicate liquid immiscibility in the system KAlSi₃O₈-CaMgSi₂O₆-NaAlSi₂O₆-CaMg (CO₃)₂ at 6 GPa: Implications for diamond-forming melts // *American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials*. 2021. V. 106. № 2. P. 165–173.
- 45 Sidorov E.G., Kutyrev A.V., Zhitova E.Z., Agakhanov A.A., Sandimirova E.I., Vymazalova A., Chubarov V.M., Zolotarev A.A. Kufahrite, PtPb, a new mineral from Ledyanoy Creek placer, Galmoenan ultramafic complex, Koryak Highlands, Russia // *Mineralogical Magazine*. Vol. 85. 2021. P. 254–261.
- 46 Sokolova E., Day M.C., Hawthorne F.C., Agakhanov A.A., Cámara F., Uvarova Yu.A., Ventura G.D. From Structure Topology to Chemical Composition. XXIX. Revision of the Crystal Structure of Perraultite, NaBaMn₄Ti₂(Si₂O₇)₂O₂(OH)₂F, a Seidozerite-Supergroup

- TS-Block Mineral from the Oktyabr'skii Massif, Ukraine, and Discreditation of Surkhobite // *Canadian Mineralogist*. 2021. Vol. 59 (2). P. 365–379.
- 47 Steciuk G., Kiefer B., Hornfeck W., Kasatkin A.V., Plášil J. Molybdenum Disorder in Hydrated Sedovite, Ideally $U(MoO_4)_2 \cdot nH_2O$, a Microporous Nanocrystalline Mineral Characterized by Three-Dimensional Electron Diffraction, Density Functional Theory Computations, and Complexity Analysis // *Inorganic Chemistry*. 2021. Vol. 60 (20). P. 15169–15179.
- 48 Stepanov S.Y., Palamarchuk R.S., Varlamov D.A., Kiseleva D.V., Sharpyonok L.N., Škoda R. and Kasatkin A.V. The Features of Native Gold in Ore bearing Breccias with Realgar orpiment Cement of the Vorontsovskoe Deposit (Northern Urals, Russia) // *Minerals*. 2021. Vol. 11. P. 541.
- 49 Vyatkin S.V., Kriulina G.Yu., Garanin V.K., Konogorova D.V., E Vasil'ev A.E., Samosorov G.G. The morphologies, defects, and impurities of diamonds in the Zapolyarnaya pipe // 2021. *Moscow University Geology Bulletin*. B. 76. № 2. P. 204–214.
- 50 Zubkova N.V., Pekov I.V., Agakhanov A.A., Ksenofontov D.A., Pushcharovsky D.Yu. A Novel-Type Microporous Heteropolyhedral Framework in Crystal Structure of the Natural Sulfate Philoxenite // *Crystallography Reports*. 2021. Vol. 66. P. 60–65.