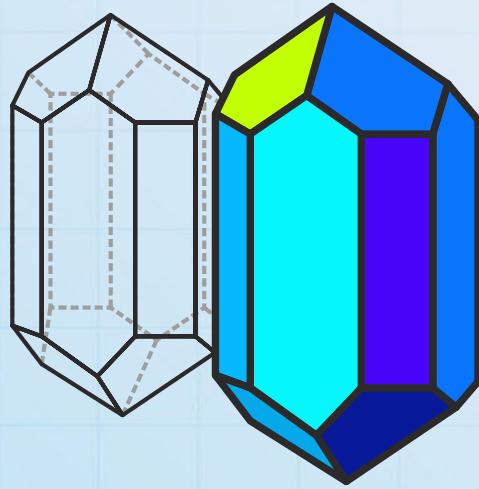


строение, свойства, методы исследования



# МИНЕРАЛЫ

## 15-я конференция

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК**

**Уральское отделение**

**Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого**

**Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии**

**Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина**

**Российское минералогическое общество**

**Комиссия по рентгенографии, кристаллохимии и спектроскопии**



**МИНЕРАЛЫ**  
**15-я конференция**

**XV ВСЕРОССИЙСКАЯ  
НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ**

**«Минералы: строение, свойства,  
методы исследования»**

**проводимая совместно с XII Всероссийской научной конференцией**

**молодых ученых с международным участием**

**«Метеориты. Астероиды. Кометы»**

**3–7 июня 2025 г.**

**ЕКАТЕРИНБУРГ**

**2025**

УДК 549.01

**Материалы XV Всероссийской научной конференции «Минералы: строение, свойства, методы исследования».** Екатеринбург: Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, 2025. 106 с.

ISBN 978-5-89516-336-8

**ОРГКОМИТЕТ:**

- Вотяков С.Л., д.г.-м.н., академик РАН, председатель, ИГГ УрО РАН, Екатеринбург  
Зедгенизов Д.А., д.г.-м.н., проф. РАН, сопредседатель, ИГГ УрО РАН, Екатеринбург  
Кривовичев С.В., д.г.-м.н., академик РАН, сопредседатель, ФИЦ КНЦ РАН, Апатиты  
Филатов С.К., д.г.-м.н., проф., сопредседатель, СПбГУ, Санкт-Петербург  
Аксенов С.М., д.х.н., ФИЦ КНЦ РАН, Апатиты  
Белогуб Е.В., д.г.-м.н., ИМин УрО РАН, Миасс  
Вайнштейн И.А., д.ф.-м.н., проф. РАН, УрФУ, Екатеринбург  
Гроховский В.И., к.т.н., УрФУ, Екатеринбург  
Ерёмин Н.Н., д.х.н., член-корр. РАН, МГУ, Москва  
Дымшиц А.М., к.г.-м.н., ИЗК СО РАН, Иркутск  
Замятин Д.А., к.г.-м.н., ИГГ УрО РАН, Екатеринбург  
Канева Е.В., к.г.-м.н., ИГХ СО РАН, Иркутск  
Лютоев В.П., к.г.-м.н., ИГ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар  
Петрова Е.В., к.ф.-м.н., УрФУ, Екатеринбург  
Реутский В.Н., д.г.-м.н., проф. РАН, ИГМ СО РАН, Новосибирск  
Удачин В.Н., д.г.-м.н., ИМин УрО РАН, Миасс  
Чареев Д.А., д.х.н., ИЭМ РАН, Черноголовка  
Шендрик Р.Ю., к.ф.-м.н., ИГХ СО РАН, Иркутск  
Щапова Ю.В., к.ф.-м.н., ИГГ УрО РАН, Екатеринбург  
Упорова Н.С., к.ф.-м.н., секретарь конференции, ИГГ УрО РАН, Екатеринбург



## СОДЕРЖАНИЕ

- 9 Аксенов С.М.**  
КРИСТАЛЛОХИМИЧЕСКИЙ АСПЕКТ «БЛОЧНОГО» ИЗОМОРФИЗМА В МИНЕРАЛАХ
- 10 Банару Д.А.**  
О СЛОЖНОСТИ СИГНАТУРЫ НАТУРАЛЬНОГО ТАЙЛИНГА
- 11 Басалаев И.Д., Марков В.Ф.**  
ОСАЖДЕНИЕ PbS(La,I) В ВОДНОЙ СРЕДЕ: ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И СИНТЕЗ
- 12 Берзин С.В., Петрова Е.В., Ахмедов Д.А., Дугушкина К.А.,  
Сальгадо Э.Х., Вейтиа Ф.Г., Карташова А.П., Сачков М.Е.**  
ОБЫКНОВЕННЫЙ ХОНДРИТ RAMÓN DE LAS YAGUAS, САНТЬЯГО-ДЕ-КУБА
- 13 Берзин С.В., Дугушкина К.А., Яковлев Г.А., Пастухович А.Ю., Гроховский В.И., Дэмбэрэл С.**  
ОБОГАЩЕНИЕ КАЛИЕМ В БОГАТЫХ КРЕМНЕЗЕМОМ КОМПОНЕНТАХ (SRC) И  
В АККРЕЦИОННОЙ КАЙМЕ Ca-Al-ВКЛЮЧЕНИЙ (CAIs) В ХОНДРИТАХ
- 14 Бибко А.А., Шендрик Р.Ю., Бухарова О.В., Хрущева М.О., Антонов М.С., Коструб Е.А.**  
МЕТАСТАБИЛЬНОСТЬ КОСТНОГО АПАТИТА
- 15 Богданова Л.И., Щапова Ю.В.**  
ПОЛУЭМПИРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ, ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ И УПРУГИХ  
СВОЙСТВ МОНАЦИТО-ПОДОБНЫХ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ОРТОФОСФАТОВ РЗЭ
- 16 Бокизода Д.А., Бунтов Е.А., Щапова Ю.В., Зацепин А.Ф.**  
СТРУКТУРА И КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ЦЕПОЧЕЧНЫХ ФРАГМЕНТОВ НАНОУГЛЕРОДА
- 17 Бритвин С.Н., Иванова М.А., Кржижановская М.Г., Волкова И.А., Верещагин О.С.**  
МИНЕРАЛОГИЯ АММОНИЯ В ВЕЩЕСТВЕ ПОЯСА АСТЕРОИДОВ
- 18 Брусницына Е.В., Гроховский В.И.**  
МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ МЕТЕОРИТОВ
- 19 Булатов В.А., Замятин Д.А., Чареев Д.А.**  
ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО ОКРУЖЕНИЯ НА РЕНТГЕНОЭМИССИОННЫЕ СПЕКТРЫ S  $K_{\beta}$  СЕРЫ
- 20 Вайтиева Ю.А., Сеткова Т.В., Спивак А.В., Аксенов С.М.**  
ОСОБЕННОСТИ МОДУЛЯРНОГО СТРОЕНИЯ НОВОГО Ga-, Ge-ПРЕДСТАВИТЕЛЯ СТРУКТУРНОГО  
СЕМЕЙСТВА ДЬЮМОРТЬЕРИТА С ОБЩЕЙ ФОРМУЛОЙ  $\text{Al}[(\text{Al},\text{Ga})_2\text{O}]_3[(\text{Si}^{4+},\text{Ge}^{4+})\text{O}_4]_3(\text{BO}_3)$
- 21 Васюнин А. И.**  
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ХИМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ МЕЖЗВЕЗДНЫХ ЛЬДОВ
- 22 Виноградова Ю.Г., Шацкий А.Ф.**  
СИСТЕМА ДИОПСИД-ЖАДЕИТ- $\text{CO}_2$  ПРИ 3-6 ГПа
- 23 Воронин М.В.**  
СОЛНЕЧНЫЙ НЕФЕЛИН ИЗ КОПИ НА КАНАЛЕ УВИЛЬДЫ-АРГАЗИ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)
- 24 Гавриленко В.В., Радомская Т.А., Шендрик Р.Ю., Гладкочуб Е.А.**  
ФРЕСНОИТ ИЗ ИНАГЛИНСКОГО МАССИВА (АЛДАНСКИЙ щит):  
КР- И ИК-СПЕКТРОСКОПИЯ

- 25 Гамбуева А.А., Еремин Н.Н.  
РАЗРАБОТКА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ БАЗЫ ДАННЫХ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ БИНАРНЫХ  
ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ СЕРИИ  $K_2LnZr(PO_4)_3$  СО СТРУКТУРОЙ ЛАНГБЕЙНИТА
- 26 Глазачев Д.О., Попова О.П., Подобная Е.Д., Шувалов В.В., Артемьева Н.А., Светцов В.В., Хазинс В.М.  
КАЛЬКУЛЯТОР ОЦЕНКИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТОЛКНОВЕНИЙ АСТЕРОИДОВ И КОМЕТ С ЗЕМЛЁЙ
- 27 Горбов Л.Е., Титов А.А.  
СИНТЕЗ И КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА СИСТЕМЫ  $(Cu_2Se)_nTiSe_2$
- 28 Горюнов М.В., Фелнер И., Наумов С.П., Чукин А.В., Оштрак М.И.  
ОСОБЕННОСТИ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ СПЛАВОВ Fe-Ni-Co НЕКОТОРЫХ  
ЖЕЛЕЗНЫХ И ЖЕЛЕЗОКАМЕННЫХ МЕТЕОРИТОВ ПО ДАННЫМ МАГНИТНЫХ  
ИЗМЕРЕНИЙ И МЕССБАУЭРОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ
- 29 Горячко Ю.А., Микулич А.В., Яротов А.Е., Боровичка И., Брозкова Р.,  
Пастухович А.Ю., Яковлев Г.А., Гроховский В.И.  
ТРАЕКТОРИЯ, ФРАГМЕНТАЦИЯ И ЭЛЛИПС РАССЕИВАНИЯ БОЛИДА НАД СМОЛЕВИЧАМИ
- 30 Готлиб Е.М., Габдулхаев К.Р., Твердов И.Д., Ямалеева Е.С.  
ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ ИЗ РИСОВОЙ ШЕЛУХИ  
НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ СИНТЕЗИРОВАННЫХ НА ЕГО ОСНОВЕ  
ВОЛЛАСТОНИТ И ДИОПСИД СОДЕРЖАЩИХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ
- 31 Грачева Н.С., Михайловская З.А.  
СИНТЕЗ И ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЛОЖНЫХ ОКСИДОВ СЕРИИ  $Bi_{2/3+x/3}Mo_{1-x}V_xO_4$
- 32 Гридчина В.М. , Расцветаева Р.К. , Чуканов Н.В. , Аксенов С.М.  
КРИСТАЛЛОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДВУХ ВЫСОКОКАЛЬЦИЕВЫХ  
ЭВДИАЛИТОВ ИЗ МАССИВА ТАМАЗЕРТ (МАРОККО) В РАМКАХ Р3-СИММЕТРИИ
- 33 Давлетшина А.А., Замятин Д.А., Чебыкин Н.С.  
МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ДИФРАКЦИИ ОТРАЖЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ  
МИКРОДЕФОРМАЦИЙ В ЗЕРНАХ ЦИРКОНА ИЗ МЕТЕОРИТНЫХ КРАТЕРОВ
- 34 Джуманиязов Д.И., Каримова Ф.Б.  
ЗОЛОТОНОСНЫЕ АЛЬБИТ-ХЛОРИТОВЫЕ МЕТАСОМАТИТЫ ЧАРМИАНСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ
- 35 Дугушкина К.А., Шарыгин В.В., Яковлев Г.А., Пастухович А.Ю.,  
Гроховский В.И., Берзин С.В., Мандрыгина Д.А.  
МИНЕРАЛОГИЯ НОВОГО ХОНДРИТА SMALYAVICHY (H6), БЕЛАРУСЬ
- 36 Дымшиц А.М., Олейников О.Б., Ощепкова М.Г., Земнухов А.Л., Опарин Н.А.  
ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА КСЕНОКРИСТАЛЛОВ КЛИНОПИРОКСЕНА  
ИЗ РАЗНОВОЗРАСТНЫХ КИМБЕРЛИТОВ ЯКУТСКОЙ АЛМАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ
- 37 Дюндик С.С., Айрузов А.Р., Максимова Е.М., Петрова Е.В.  
ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА МИКРОСТРУКТУРУ ТРОИЛITA ИЗ ОБЫКНОВЕННОГО  
ХОНДРИТА CALAMA 022 ПО ДАННЫМ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДИФРАКТОМЕТРИИ
- 38 Еремин Н.Н., Еремина Т.А., Гурбанова О.А.  
ЧАСТОТНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ГРУПП СИММЕТРИИ  
В СТРУКТУРНОЙ МИНЕРАЛОГИИ. НОВЫЕ ДАННЫЕ.
- 39 Ермаков Е.А., Соловьев А.В., Марков В.Ф.  
ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ УСАДКИ КЕРАМИКИ NiO-YSZ
- 40 Ефремов В.В., Попова О.П., Карташова А.П., Глазачев Д.О., Бушманова А.И.  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МЕЛКИХ МЕТЕОРНЫХ ТЕЛ ПО НАБЛЮДАТЕЛЬНЫМ ДАННЫМ
- 41 Желуницын И.А., Панкрушина Е.А., Рогинский Е.М., Вотяков С.Л.  
МНОГОКОМПОНЕНТНЫЕ РЗЭ- И ИТТРИЙ-ЖЕЛЕЗИСТЫЕ ГРАНАТЫ:  
ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, РАМАНОВСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

- 42 **Желуницын И.А., Михайловская З.А., Вотяков С.Л.**  
ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРАНАТОВ АЛЬМАНДИНА,  
ДЕМАНТОИДА И АНДРАДИТА ПО ДАННЫМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ  
ИМПЕДАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ: МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
- 43 **Желуницын И.А., Михайловская З.А., Вотяков С.Л.**  
К ВОПРОСУ ОБ ИОННОЙ ПРОВОДИМОСТИ НЕОДИМОВЫХ ТИТАН-  
НИОБАТОВ, ДОПИРОВАННЫХ КАЛЬЦИЕМ  $Nd_{1-x}Ca_xTi_{1-x}Nb_{1+x}O_6$
- 44 **Жиличева А.Н., Мальцев А.С., Пашкова Г.В., Иванов А.В.**  
РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНАЯ СПЕКТРОМЕТРИЯ С ПОЛНЫМ ВНЕШНИМ ОТРАЖЕНИЕМ —  
БЫСТРЫЙ И ЭКОНОМИЧНЫЙ МЕТОД ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА АПАТИТА
- 45 **Жиличева А.Н., Мальцев А.С., Пашкова Г.В.**  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗНЫХ МЕТЕОРИТОВ С ПОМОЩЬЮ  
РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ С ПОЛНЫМ ВНЕШНИМ ОТРАЖЕНИЕМ
- 46 **Житова Е.С.**  
СТРУКТУРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИРОДНЫХ СЛОИСТЫХ ДВОЙНЫХ ГИДРОКСИДОВ
- 47 **Замятин Д.А.**  
ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ  
К ИССЛЕДОВАНИЮ УДАРНО-ПРЕОБРАЗОВАННЫХ ЗЕРЕН ЦИРКОНА
- 48 **Зарубина Е.С., Кориневский В.Г., Рянская А.Д., Замятин Д.А., Расцветаева Р.К., Аксенов С.М.**  
ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КАТИОНОВ В КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ  
СТРУКТУРЕ КАЛИЙ-МАГНЕЗИО-ГАСТИНГСИТА
- 49 **Захаров Е.О., Емельянова Ю.В., Буянова Е.С.**  
СИНТЕЗ, АТТЕСТАЦИЯ И ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ  
ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ НА ОСНОВЕ ОРТОВАНАДАТА ВИСМУТА
- 50 **Зимин М.Д., Фёдоров А.М.**  
ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОТЕРМОБАРОМЕТРА TITANIQ ДЛЯ ОЦЕНКИ  
УСЛОВИЙ МЕТАМОРФИЗМА ВЫСОКОЧИСТЫХ КВАРЦЕВЫХ ПОРОД
- 51 **Игнатов М.А., Половых А.С., Ращенко С.В., Сокол Э.В.**  
НОВЫЙ МЕХАНИЗМ ВХОЖДЕНИЯ  $Fe^{3+}$  В СТРУКТУРУ МИНЕРАЛОВ ГРУППЫ МЕЛИЛITA
- 52 **Ильин Г.С., Чуканов Н.В., Пеков И.В., Ямнова Н.А., Расцветаева Р.К., Япаскурт В.О., Аксенов С.М.**  
ОСОБЕННОСТИ СИММЕТРИИ И КАТИОННОГО УПОРЯДОЧЕНИЯ  
В СТРУКТУРЕ Ca-СОДЕРЖАЩЕГО МИНЕРАЛА РЯДА ПЕРРОТИТА
- 53 **Ильясова Г.И., Николаев А.Г., Ильин Г.С., Аксенов С.М.**  
НОВЫЕ ДАННЫЕ О ПРИРОДЕ ОКРАСКИ МИНЕРАЛОВ ГРУППЫ ЭВДИАЛИТА  
ИЗ ЩЕЛОЧНЫХ МАССИВОВ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА
- 54 **Искрина А.В., Спивак А.В., Сеткова Т.В., Хасанов С.С., Кузьмин А.В., Захарченко Е.С., Вирюс А.А.**  
 $GaGeO_3OH$  МОДЕЛЬНЫЙ АНАЛОГ ФАЗЫ ЭГГ: СИНТЕЗ, СТРУКТУРА  
И СТАБИЛЬНОСТЬ ПРИ ВЫСОКОМ ДАВЛЕНИИ
- 55 **Канева Е.В., Гавриленко В.В., Радомская Т.А., Шендрик Р.Ю.**  
КРИСТАЛЛОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ТЕРМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ СКАПОЛИТОВ
- 56 **Карташова А. П., Кохирова Г. И., Баканас Е. С., Щербина М. П., Наливкин М. А., Пузин В. Б.**  
РОССИЙСКО-ТАДЖИКСКИЕ ОПТИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ МАЛЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ
- 57 **Картеева В.М., Накибов Р.С., Петрашкевич И.В., Ожиганов М.Э., Медведев М.Г., Васюнин А.И.**  
СПЕКТРЫ СЛОИСТЫХ ЛЬДОВ В СРЕДНЕМ ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ  
ДЛЯ ОПИСАНИЯ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ С ТЕЛЕСКОПА JWST

- 58 Киреев В.Е., Чаркин Д.О., Аксенов С.М.**  
СИНТЕЗ И КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА НОВОЙ МОДИФИКАЦИИ  
 $PbGeO_3$  – СТРУКТУРНОГО АНАЛОГА АЛАМОЗИТА  $PbSiO_3$
- 59 Кислов Е. В.**  
МИНЕРАЛОГИЯ ЧЕРНОГО И СЕРОГО НЕФРИТА КАВОКТИНСКОГО  
МЕСТОРОЖДЕНИЯ, СРЕДНЕ-ВИТИМСКАЯ ГОРНАЯ СТРАНА
- 60 Климова А.В., Михайловская З.А., Буянова Е.С.**  
ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  $Ca_{0.1}Bi_{0.883}Mo_{0.15}V_{0.85}O_4$  В ЗАВИСИМОСТИ  
ОТ УСЛОВИЙ ПОЛУЧЕНИЯ ФОТОКАТАЛИЗАТОРА
- 61 Копылова Ю.О., Волков С.Н., Кржижановская М.Г., Юхно В.А.,  
Аксенов С.М., Бубнова Р.С.**  
ТЕРМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ  $Ca_2B_2O_5$
- 62 Корочанцева Е.В., Буйкин А.И., Корочанцев А.В.**  
СВЯЗЬ МЕЖДУ ВРЕМЕНЕМ КОСМИЧЕСКОГО ОБЛУЧЕНИЯ ЛУННЫХ ПОРОД НА ПОВЕХНОСТИ  
РОДИТЕЛЬСКОГО ТЕЛА И ДИФФУЗИОННОЙ ПОТЕРЕЙ НАКОПЛЕННЫХ ГАЗОВ
- 63 Лепеха С.В., Васильев Е.А., Зедгенизов Д.А., Богданова Л.И.**  
ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ СИСТЕМЫ  
603, 700, 787 нм В ПРИРОДНОМ АЛМАЗЕ
- 64 Лысюк А.Ю.**  
СРАВНЕНИЕ ТЕКТИТОВ И ИРГИЗИТОВ ПО ДАННЫМ ИК, ЭПР  
И МЁССБАУЭРОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ
- 65 Мандрыгина Д.А., Михайловская З.А., Щапова Ю.В.**  
ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА МЕТОДОМ ОСАЖДЕНИЯ НА ФАЗОВЫЙ  
СОСТАВ, СТРУКТУРУ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА  $LaPO_4$
- 66 Машина Е.В.**  
БИОГЕННЫЕ АГРЕГАТЫ
- 67 Мирсаяпова И.Ф., Ситдикова Л.М.**  
ПОСТМАГМАТИЧЕСКИЕ МИНЕРАЛЫ АПАТИТ-НЕФЕЛИНОВЫХ  
РУД МЕСТОРОЖДЕНИЯ КУКИСВУМЧОРР
- 68 Мишагин К.А., Дутова В.С., Шакиров Т.Р., Готлиб Е.М.**  
ТВЕРДОФАЗНЫЙ СИНТЕЗ КАЛЬЦИЙ МАГНИЕВЫХ СИЛИКАТОВ  
ИЗ ЦЕОЛИТ -КРЕМНИСТОЙ ПОРОДЫ
- 69 Морохин А.И., Королева М.С.**  
ИЗМЕНЕНИЕ ОКРАСКИ МАЛОМЕДИСТОГО БОРНИТА  
ВОЛКОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ В ДИНАМИКЕ
- 70 Накибов Р.С., Картеева В.М., Ожиганов М.Э., Медведев М.Г., Васюнин А.И.**  
ДАТАСЕТ СПЕКТРОВ СРАВНЕНИЯ ПОЛИАРОМАТИЧЕСКИХ  
УГЛЕВОДОРОДОВ ДЛЯ ПОИСКА В МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЕ
- 71 Нафигуллина Е.Р., Николаев А.Г., Аксенов С.М.**  
ПРИРОДА ОКРАСКИ ТУРМАЛИНОВ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПАПРОК (АФГАНИСТАН)
- 72 Николаев А.Г., Попов М.П., Нуриева Е.М.**  
СЕРТИФИКАЦИЯ ДРАГОЦЕННЫХ КАМНЕЙ С ПОМОЩЬЮ  
МЕТОДА ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ
- 73 Панкрушина Е.А., Рогинский Е.М., Печурин М.С., Чареев Д.А., Вотяков С.Л.**  
КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД ПРИ ИЗУЧЕНИИ КРИСТАЛЛОВ  $MIn_5S_8$  ( $M = K, Rb, Cs$ ):  
РАМАНОВСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ, КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

- 74 **Перминов А.С., Кузнецов Э.Д., Сафронова В.С.**  
ОЦЕНКИ ВОЗРАСТА ПАР АСТЕРОИДОВ СЕМЕЙСТВА EMILKOWALSKI НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЕРОЯТНОСТНОЙ ЭВОЛЮЦИИ ОРБИТ
- 75 **Перькова Е.Н., Селезнев А.А., Пестов А.В.**  
ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ПРОБОПОДГОТОВКИ СОВРЕМЕННЫХ ГОРОДСКИХ ПЫЛЕ-ГРЯЗЕВЫХ ОСАДКОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ В НИХ МИКРОПЛАСТИКА
- 76 **Петрова Е.В., Гроховский В.И., Попов А.А., Карташова А.П., Горячко Ю.А.**  
СРАВНЕНИЕ СОСТАВОВ МЕТЕОРИТОВ, КОРЫ ПЛАВЛЕНИЯ И СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ИХ БОЛИДОВ
- 77 **Печурин М.С., Панкрушина Е.А., Пузанова И.А., Чареев Д.А.**  
СИНТЕЗ И ТЕРМОРАМОНОВСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ИЗОКУБАНИТА  $\text{CuFe}_2\text{S}_3$
- 78 **Пилицына Т.А., Ковальский А.М., Силаев М.В., Юсуф Таки  
Pilitsyna Tatiana, Kovalskii Andrey, Silaev Makar, Yousuf Taqi Y.**  
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ ДЛЯ НЕЙРОСЕТЕВОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В АРИДНЫХ ЗОНАХ
- 79 **Подобная Е.Д., Попова О.П., Иванов Б.А., Глазачев Д.О.**  
НЕДАВНО ОБРАЗОВАННЫЕ КРАТЕРЫ НА МАРСЕ
- 80 **Попов А.А., Кокорин А.Ф.**  
ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ВОСПРОИЗВЕДЕНИЮ АБЛЯЦИИ МЕТЕОРОИДОВ В НАЗЕМНЫХ УСТАНОВКАХ
- 81 **Попова О.П.**  
СПЕКТРЫ МЕТЕОРОИДОВ
- 82 **Пузанова И.Г., Попов Е.А., Чареев Д.А.**  
ПОЛУЧЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ АНАЛОГОВ ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ МИНЕРАЛОВ В СОЛЕВЫХ РАСПЛАВАХ НА ОСНОВЕ ГАЛОГЕНИДОВ ЛИТИЯ
- 83 **Сапунова У.А., Ожиганов М.Э., Петрашкевич И.В., Медведев М.Г., Васюнин А.И.**  
ОПИСАНИЕ ИК-РЕГИОНА 2.65–2.80 МКМ И ПОИСКИ МОЛЕКУЛЯРНОГО АЗОТА В МЕЖЗВЁЗДНЫХ ЛЬДАХ НА ОСНОВАНИИ ПОСЛЕДНИХ ДАННЫХ ТЕЛЕСКОПА JWST
- 84 **Сидорова Е.Ю., Ситдикова Л.М.**  
ГЛИНИСТЫЕ МИНЕРАЛЫ ЛИНЕЙНЫХ КОР ВЫВЕТРИВАНИЯ ФУНДАМЕНТА ЮЖНО-ТАТАРСКОГО СВОДА (ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКАЯ ПЛАТФОРМА)
- 85 **Ситдикова Л.М., Полянская М.В.**  
ИНДЕКС КРИСТАЛЛИЧНОСТИ КВАРЦА И СТРУКТУРНО-МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ
- 86 **Соломатов В.О., Михайловская З.А., Желуницын И.А.**  
СИНТЕЗ И СВОЙСТВА ЭШИНИТ-ПОДОБНЫХ СЛОЖНЫХ ОКСИДОВ СЕРИЙ  $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Ti}_{1-x}\text{Nb}_{1+x}\text{O}_6$  И  $\text{La}_{1-x}\text{Bi}_x\text{TiNbO}_6$
- 87 **Сорокин Е.М., Герасимов М.В., Шкловер В.Я., Бондарев А.В.**  
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВА СФЕРУЛ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ЖЕЛЕЗА В ЧАСТИЦАХ ЛУННОГО ГРУНТА МИССИИ ЧАНЬЕ-5 И СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ
- 88 **Степанов К.М., Шацкий А.Ф.**  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ ДОЛОМИТА С КЛИНОПИРОКСЕНОМ В СИСТЕМАХ  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 \pm \text{NaAlSi}_2\text{O}_6 \pm \text{CaMgSi}_2\text{O}_6$  ПРИ 3–6 ГПа
- 89 **Степенчиков Д.Г., Аксенов С.М.**  
К ТЕОРИИ МОДУЛЯРНОГО СТРОЕНИЯ ЛОВОЗЕРИТОВЫХ СТРУКТУР: НОВЫЕ ДАННЫЕ О ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ СОЧЛЕНИЯ S6R-БЛОКОВ

- 90 Упоров С.А., Евдокимов И.В., Сидоров В.А., Щелкачев Н.М., Быков В.А., Котенков П.В., Черепанова Л.А., Балякин И.А., Рыльцев Р.Е.  
ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ: ПРИРОДА ЭФФЕКТА И ФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ
- 91 Упорова Н.С., Бубнова П.О., Михайловская З.А., Петрова С.А.  
ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА МАГНИТНЫХ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ ОКСИДОВ СО СТРУКТУРОЙ ШПИНЕЛИ
- 92 Филин О.Ю., Домбровский И.М., Цветов Н.С., Аксенов С.М.  
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСТРАКЦИИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ХВОСТОВ ЛОВОЗЕРСКОГО ГОКА С ПОМОЩЬЮ СМЕСИ ХЛОРИД ХОЛИНА + ЛИМОННАЯ КИСЛОТА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА
- 93 Цельмович В.А., Кузина Д.М., Муфтахетдинова Р.Ф., Яковлев Г.А., Ежов В.Ф., Четвериков Ю.О., Булат С.А.  
МИКРОСТРУКТУРА И СОСТАВ КОСМИЧЕСКИХ И ЗЕМНЫХ МАГНИТНЫХ МИКРОМЕТЕОРИТОВ ИЗ АНТАРКТИДЫ
- 94 Чареев Д.А.  
ИЗУЧЕНИЕ ФАЗОВЫХ ОТНОШЕНИЙ В ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМАХ С УЧАСТИЕМ ПЛАТИНОИДОВ И ХАЛЬКОГЕНОВ
- 95 Черепанова Л.А., Хазиева Е.О., Рыльцев Р.Е., Упоров С.А.  
АНИЗОТРОПИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ В ОЦК-ФАЗАХ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ СПЛАВОВ
- 96 Черепанова Л.А., Эстемирова С.Х., Печищева Н.В., Бурдина Л.Г.  
НОВЫЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫЕ ОКСИДЫ СО СТРУКТУРОЙ ПЕРОВСКИТА ДЛЯ ЗЕЛЕНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
- 97 Шарыгин В.В.  
ГЕНРИМЕЙЕРИТ В КАРБОНАТИТАХ МАССИВА СРЕДНЯЯ ЗИМА, ВОСТОЧНЫЙ САЯН
- 98 Шарыгин В.В., Лазарева Е.В., Ращенко С.В., Нигматуллина Е.Н., Жмодик С.М.  
Ba-Fe-ТИТАНАТЫ В СИДЕРИТОВЫХ ПОРОДАХ МАССИВА ТОМТОР
- 99 Шарыгин В.В.  
МИНЕРАЛЬНЫЕ АССОЦИАЦИИ МЕТЕОРИТА ЧЕЛЯБИНСК: МИНЕРАЛОГИЯ КОРЫ ПЛАВЛЕНИЯ
- 100 Шендрик Р.Ю., Радомская Т.А., Канева Е.В., Чуканов Н.В., Паниковский Т.Л., Вигасина М.Ф., Пеков И.В.  
АНИОН-РАДИКАЛ S<sub>2</sub><sup>-</sup> В МИНЕРАЛАХ
- 101 Ширяев А.А., Япаскурт В.О., Аверин А.А., Бураков Б.Е.  
ЦИРКОН И ОКСИД ЦИРКОНИЯ ИЗ ЧЕРНОБЫЛЬСКИХ «ЛАВ»: ОБРАЗОВАНИЕ И СВОЙСТВА
- 102 Шорец О.Ю., Шаблинский А.П.  
НОВЫЕ ЛЮМИНОФОРЫ Y<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>:Eu<sup>3+</sup> С ТЕРМИЧЕСКИМ АНТИ-ТУШЕНИЕМ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ
- 103 Щапова Ю.В., Богданова Л.И., Михайловская З.А., Вотяков С.Л.  
ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ РЕШЕТКИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ОРТОФОСФАТОВ РЗЭ СО СТРУКТУРОЙ МОНАЦИТА
- 104 Щербина М.П., Киселев Н.Н.  
ПОЛЯРИМЕТРИЯ В КАЧЕСТВЕ ПОДДЕРЖКИ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
- 105 Ягудина Л.А., Музрафов Р.Н.  
КРИСТАЛЛОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТУРМАЛИНОВ ИЗ КОЛЛЕКЦИИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО МУЗЕЯ ИМ. А.А. ШТУКЕНБЕРГА КФУ

## КРИСТАЛЛОХИМИЧЕСКИЙ АСПЕКТ «БЛОЧНОГО» ИЗОМОРФИЗМА В МИНЕРАЛАХ

Аксенов С.М.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Лаборатория арктической минералогии и материаловедения,  
ФИЦ КНЦ РАН, Анадырь, Россия, aks.crys@gmail.com

<sup>2</sup> Геологический институт ФИЦ КНЦ РАН, Анадырь, Россия

Гетерополиэдрический или «блочный» изоморфизм [Белов, 1976; Danian et al., 2002; Аксенов и др., 2023] в кристаллических структурах достаточно распространен в минералогии. При этом происходит замещение крупных многоатомных фрагментов (блоков, цепей или слоев), что приводит к формированию модулярных структур [Аксенов и др., 2023]. Наиболее ярко данное явление можно продемонстрировать на примере обширного структурного семейства титаносиликатов, в которых  $\text{TiO}_6$  октаэдры могут замещать тетраэдрические диортогруппы группы типа  $[\text{Si}_2\text{O}_7]$  или более сложные группировки – кольца  $[\text{Si}_4\text{O}_{12}]$  [Белов, 1976; Danian et al., 2002; Аксенов и др., 2023].

Кристаллохимическое родство слоистых титаносиликатов с минералами группами слюд впервые отметил академик Н.В. Белов, заменив в тетраэдрической ( $6^1$ )-сетке через один ряды  $[\text{Si}_2\text{O}_7]$ -диортогрупп на  $\text{TiO}_6$  октаэдры. В настоящее время представители данного структурного семейства называются гетерофиллосиликатами [Аксенов и др., 2023] по аналогии с филлосиликатами (группа слюд), а их основной особенностью являются трехслойные  $HON$ -пакеты, которые состоят из внешних гетерополиэдрических  $H$ -сеток, образованные кремнекислородными тетраэдрами и преимущественно октаэдрами  $L$ -катионов ( $L$  – Ti, Nb, Fe, Zr), и внутреннего октаэдрического  $O$  слоя. Общую формулу такого  $HON$ -пакета можно записать в виде: .

Гетерополиэдрическая сетка с  $n=1$  и соотношением  $(\text{LO}_2):(\text{Si}_2\text{O}_7)=1:1$  (в структурах минералов надгруппы сейдоверита) может быть получена не только из ( $6^1$ )-сетки слюдяного типа, но также из ( $4^18^1$ )-сетки апофиллитового типа. Это позволяет рассматривать гетерофиллосиликаты родственными не только минералам группы слюд и другим смешаннослоистым минералам, но также представителям серии родезита.

Кроме того, ( $4^18^1$ )-сетки апофиллитового типа могут претерпевать и более сложные трансформации в случае, когда уже  $[\text{Si}_4\text{O}_{12}]$ -кольца замещаются на одиночные  $\text{TiO}_6$  октаэдры. Объединение таких смешанных сеток приводит к формированию кристаллической структуры минерала нарсарсукита  $\text{Na}_2(\text{Ti},\text{Fe}^{3+})[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{O},\text{F})$ . В случае, если  $[\text{Si}_4\text{O}_{12}]$ -кольца замечаются на аналогичные  $[\text{Ti}_4\text{O}_{17}]$ -кольца рутилового типа, то объединение таких гибридных сеток приведет к формированию кристаллической структуры бантита  $\text{Ba}_4(\text{Ti},\text{Nb})_8\text{Si}_4\text{O}_{28}\text{Cl}$ . Полное замещение  $[\text{Si}_4\text{O}_{12}]$ -кольца на  $\text{TiO}_6$  октаэдры приведет к образование октаэдрической сетки, а их объединение – к структурному типу перовскита [Белов, 1976].

*Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (№ 20-77-10065-П).*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Аксенов С.М., Чаркин Д.О., Банару А.М., Банару Д.А., Волков С.Н., Дейнеко Д.В., Кузнецов А.Н., Расцветаева Р.К., Чуканов Н.В., Шкурский Б.Б., Ямнова Н.А. Модулярность, политипия и сложность кристаллических структур неорганических соединений (обзор) // Журнал структурной химии. 2023. Т. 64. № 10. Статья 117102.
2. Белов Н.В. Очерки по структурной минералогии. М.: Недра. 1976. 344 с.
3. Denian Y., Pushcharovsky D., Nicheng S., Zhesheng M., Wei H., Zhe L. Functional substitutions of coordination polyhedron in crystal structures of silicates // Science in China. 2002. V. 45. № 8. P. 702–208.

## О СЛОЖНОСТИ СИГНАТУРЫ НАТУРАЛЬНОГО ТАЙЛИНГА

Банару Д.А.

*ГЕОХИ РАН, Москва, Россия, daria.a.banaru@gmail.com*

Под тайлингом понимается нормальное (грань к грани) разбиение пространства на тайлы – обобщенные, не обязательно выпуклые полиэдры, в которых каждая вершина инцидентна двум или более вершинам, а грани могут быть криволинейными [Blatov, 2009]. Всякому тайлингу соответствует некоторая сетка, образованная вершинами и ребрами. Натуральным называют тайлинг, отвечающий следующим условиям: симметрия тайлинга совпадает с симметрией соответствующей ему сетки; гранями тайла являются сильные кольца (циклы, не являющиеся суммой нескольких циклов меньшего размера); все сильные кольца сетки, кроме принадлежащих граням, имеют пересечения, т.е. общие внутренние точки; если в соответствии с предыдущими пунктами возможны разные тайлинги, то путем объединения тайлов друг с другом строят один тайлинг. Таким образом, если для данной сетки натуральный тайлинг существует, то только один. Поиск натурального тайлинга в общем случае нетривиален, но достаточно давно реализован в программном комплексе ToposPro [Blatov et al., 2014].

Комбинаторная сложность используется в химии как мера сложности молекулярных ансамблей, а в кристаллографии как мера сложности кристаллических структур и химических составов [Sabirov et al., 2021]. В данной работе разработана аддитивная модель расчета комбинаторной (шэнноновской) сложности сигнатуры натурального тайлинга, который используют для описания топологических свойств микро- и мезопористых материалов, например, цеолитов. Для расчета сложности данного вида составлен программный код на языке Python [Банару, 2025]. Код протестирован для тайлингов цеолитного типа,

обнаружены корреляции рассчитанной сложности сигнатуры тайлинга и комбинаторной сложности производящей тайлинг структуры.

Для расчета комбинаторной сложности сигнатуры натурального тайлинга не требуются структурные данные, а достаточно сигнатуры тайлинга. Поэтому этот индекс легко использовать в экспертных системах, не привязанных непосредственно к структурным данным.

*Автор выражает глубокую признательность своим коллегам А.М. Банару и С.М. Аксенову за помощь и ценные замечания, а также коллективу Международного научного-исследовательского центра по теоретическому материаловедению (г. Самара, Россия) за научный семинар, в результате которого родилась идея настоящей работы.*

*Работа выполнена в рамках госзадания Института геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского (ГЕОХИ РАН).*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Blatov V.A. Methods for topological analysis of atomic nets // J. Struct. Chem. 2009. V. 50. P. 160.
2. Blatov V.A., Shevchenko A.P., Proserpio D.M. Applied topological analysis of crystal structures with the program package ToposPro // Cryst. Growth Des. 2014. V. 14. P. 3576.
3. Sabirov D.S., Shepelevich I.S. Information entropy in chemistry: An overview // Entropy. 2021. V. 23. 1240.
4. Банару Д.А. Комбинаторная сложность сигнатуры натурального тайлинга // Кристаллография. 2025. Т. 70. С. 163.

## ОСАЖДЕНИЕ PbS(La,I) В ВОДНОЙ СРЕДЕ: ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И СИНТЕЗ

Басалаев И.Д.<sup>1</sup>, Марков В.Ф.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> УрФУ им. Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, [ilyabasalaeff@yandex.ru](mailto:ilyabasalaeff@yandex.ru)

<sup>2</sup> Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России, Екатеринбург, Россия

Сульфид свинца (PbS, галенит) представляет собой перспективный полупроводниковый материал с узкой запрещённой зоной (~0,41 эВ при комнатной температуре), широко используемый в инфракрасной фотонике, термоэлектрике и сенсорике. Одним из эффективных способов управления его структурными и функциональными свойствами является легирование редкоземельными элементами и йодом [Марков и др., 2008]. В данной работе представлен синтез пленок PbS, легированных лантаном ( $\text{La}^{3+}$ ) и йодом ( $\Gamma$ ), с использованием гидрохимического метода (химическое осаждение из раствора или CBD).

Синтез проводился при температуре 80 °C с использованием водных растворов ацетата свинца, тиомочевины в качестве источника серы, нитрата лантана и йодида аммония в качестве легирующей добавки, а также аммиака для поддержания высокого pH. В качестве поставщика лигандов был добавлен цитрат натрия. Реакции протекали

при контролируемом pH, времени и температуре осаждения, что обеспечивало хорошую воспроизводимость результатов.

Расчет долевых концентраций комплексных ионов играет важную роль при гидрохимическом синтезе пленок сульфида свинца, особенно при легировании лантаном. Это обусловлено тем, что в растворе ионы  $\text{Pb}^{2+}$  и  $\text{La}^{3+}$  могут образовывать устойчивые комплексы с различными лигандами (например, аммиаком, гидроксид- и йодид- ионами), что существенно влияет на кинетику и равновесие осаждения. Без учета этих процессов возможно либо слишком быстрое выпадение PbS в осадок, что приведет к некачественным, рыхлым или неоднородным пленкам, либо полное отсутствие осаждения при наличии, казалось бы, достаточной концентрации реагентов. Правильный расчет позволяет определять скорость высвобождения ионов из комплексов, обеспечивая прогноз роста кристаллитов и формирования плотных и однородных пленок.

Анализ долевых концентраций показал превалирующие комплексные ионы свинца: 1 –  $\text{Pb}(\text{OH})\text{Cit}^{2-}$ , 2 –  $\text{Pb}\text{Cit}_3^{7-}$ , 3 –  $\text{Pb}\text{Cit}_2^{4-}$ , 4 –  $\text{Pb}(\text{OH})_4^{2-}$ , 5 –  $\text{Pb}(\text{OH})_3^-$  (рис. 1).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Марков В.Ф., Шнайдер А.В., Миронов М.П., Дьяков В.Ф., Мaskaева Л.Н. Получение высокочувствительных к ИК-излучению пленок PbS, осажденных из галогенидсодержащих растворов // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2008. Т. 3. С. 28–32.

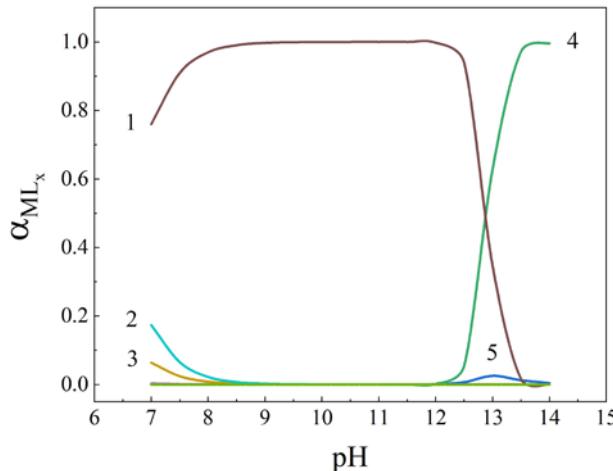


Рис. 1. Анализ долевых концентраций комплексных ионов свинца: 1 –  $\text{Pb}(\text{OH})\text{Cit}^{2-}$ , 2 –  $\text{Pb}\text{Cit}_3^{7-}$ , 3 –  $\text{Pb}\text{Cit}_2^{4-}$ , 4 –  $\text{Pb}(\text{OH})_4^{2-}$ , 5 –  $\text{Pb}(\text{OH})_3^-$

## ОБЫКНОВЕННЫЙ ХОНДРИТ RAMÓN DE LAS YAGUAS, САНТЬЯГО-ДЕ-КУБА

**Берзин С.В.<sup>1,2</sup>, Петрова Е.В.<sup>2</sup>, Ахмедов Д.А.<sup>1</sup>, Дугушкина К.А.<sup>1,2</sup>,**  
**Сальгадо Э.Х.<sup>3</sup>, Вейтиа Ф.Г.<sup>3</sup>, Карташова А.П.<sup>4</sup>, Сачков М.Е.<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия, dugushkina@igg.uran.ru

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

<sup>3</sup> Институт геофизики и астрономии, Гавана, Куба

<sup>4</sup> Институт астрономии РАН, Москва, Россия

10 июля 2021 года, примерно в 13:00 по местному времени, в сельском районе Рамон-де-лас-Ягуас в провинции Сантьяго-де-Куба было зафиксировано падение метеорита. Масса обнаруженного фрагмента метеорита составила 2.7 кг, а его размеры  $13.7 \times 12.9 \times 9.8$  см [Cobas Torres et. al., 2022; García J., 2022; Jaimez Salgado et. al., 2023]. Образец имеет грубо округлую форму, поверхность покрыта темной корой плавления, внутренняя часть имеет светло-серый цвет.

Метеорит состоит из перекристаллизованной матрицы и хондр (30 об.%). Хондры имеют слабо выраженные границы. Минеральный состав метеорита: оливин  $\text{Fa}_{25.1 \pm 0.5}$  ( $N=13$ ), ортопироксен  $\text{En}_{77.0 \pm 0.5}$   $\text{Fs}_{21.0 \pm 0.6}$   $\text{Wo}_{1.4 \pm 0.2}$  ( $N=11$ ), клинопироксен  $\text{En}_{47.4 \pm 0.1}$   $\text{Fs}_{7.5 \pm 0.3}$   $\text{Wo}_{45.1 \pm 0.3}$  ( $N=4$ ), плагиоклаз  $\text{An}_{11.2 \pm 0.4}$   $\text{Ab}_{83.3 \pm 1.0}$   $\text{Or}_{5.4 \pm 1.2}$  ( $N=8$ ), хромит, апатит, мерриллит, троилит, камасит ( $\text{Ni } 5.9 \pm 0.3$  мас.%,  $\text{Co } 2.0 \pm 0.1$  мас.%,  $N=7$ ), тэнит ( $\text{Ni } 23-33$  мас.%), тетратэнит. Метеорит несет следы ударных преобразований (S2), в нем встречены расплавные прожилки и хромит-плагиоклазовые обособления, размером до 60 мкм, состоящие из округлых и изометрических зерен хромита (0.5-3 мкм), окруженных плагиоклазом или стеклом плагиоклазового состава. Следы земного выветривания практически отсутствуют (W0). Плессит, состоит из тонкозернистого срастания камасита ( $\text{Ni } 3.3-3.8$  мас.%) и тетратэнита ( $\text{Ni } 49-54$  мас.%), слагает зоны в зернах металла, преимущественно тэнита. В оливине наблюдаются многочисленные удлиненные цепочки и небольшие скопления округлых и угловатых включений тэнита ( $\text{Ni } 14.4-18.0$  мас.%,  $\text{Co}$  до 1,6 мас%). В метеорите обнаружена самородная медь, представленная зер-

нами диаметром до 0,1 мм с неровными границами, в основном встречающаяся на границах зерен Fe-Ni-металла и троилита.

Общий элементный состав метеорита  $\text{Fe } 51.309 \pm 0.075\%$ ,  $\text{Si } 25.467 \pm 0.073\%$ ,  $\text{Mg } 10.613 \pm 0.086\%$ ,  $\text{Ca } 5.084 \pm 0.029\%$ ,  $\text{Al } 2.581 \pm 0.037\%$ ,  $\text{S } 1.490 \pm 0.011\%$ ,  $\text{Ni } 1.269 \pm 0.018\%$ ,  $\text{Mn } 0.781 \pm 0.012\%$ ,  $\text{Cr } 0.619 \pm 0.010\%$ ,  $\text{K } 0.330 \pm 0.013\%$ ,  $\text{P } 0.278 \pm 0.011\%$ ,  $\text{Cu } 0.179 \pm 0.011\%$ , [Jaimez Salgado et. al., 2023]. Метеорит классифицирован как обычный хондрит L6S2W0 [Cobas Torres et. Al., 2022; García J., 2022; Jaimez Salgado et. al., 2023].

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Программы развития УрФУ в соответствии с программой «Приоритет-2030»*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Cobas Torres R.Y., De la Nuez Colón D., Torres La Rosa M., García J., Iturrealde-Vinent M.A., Arango Arias E.D. Caracterización del Meteorito “Ramón de las Yaguas” caído en Cuba oriental // Revista METEORITOS, 2022, Vol. 32, pp. 24–35 (corrección núm. 33, 2022)
2. García J. Petrografía de “Ramón de las Yaguas”, meteorito presuntamente caído en Cuba en 2021, 10.13140/RG.2.2.19307.00808.
3. Jaimez Salgado E.J., Alonso-Pérez J.A., González-Veitia F., Alonso-Díaz A., Zaldívar-Estrada R. Caracterización y clasificación del meteorito de Ramon de las Yaguas, SANTIAGO de Cuba, 2021 // Ciencias de la Tierra y el Espacio, 2023 Vol. 23(1), pp. 57–63.

## ОБОГАЩЕНИЕ КАЛИЕМ В БОГАТЫХ КРЕМНЕЗЕМОМ КОМПОНЕНТАХ (SRC) И В АККРЕЦИОННОЙ КАЙМЕ Ca-Al-ВКЛЮЧЕНИЙ (CAIs) В ХОНДРИТАХ

**Берзин С.В.<sup>1,2</sup>, Дугушкина К.А.<sup>1,2</sup>, Яковлев Г.А.<sup>1,2</sup>, Пастухович А.Ю.<sup>2</sup>, Гроховский В.И.<sup>2</sup>, Дэмбэрэл С.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия, berzin@igg.uran.ru

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия,

<sup>3</sup> Институт астрономии и геофизики МАН, г. Улан-Батор, Монголия

Тугоплавкие богатые Ca и Al включений (CAIs) встречаются в различных классах неравновесных хондритов, преимущественно в углистых хондритах (CC) и считаются наиболее ранними минеральными образованиями в протосолнечной небуле. Обогащенные кремнеземом компоненты (SRC), как правило, встречаются в виде хондр и их фрагментов в матрице хондритов. В их составе встречаются фазы SiO<sub>2</sub> (тридимит, кристобалит, кварц), пироксен, оливин, полевой шпат, меррихьюит, метал и т. д. [Brigham et al., 1986, Hezel et al., 2006, Dugushkina et al., 2023, и др.]. SRC являются общим компонентом для разных классов хондритов, однако преобладающая их доля встречается в неравновесных обычновенных хондритах (UOC). Нами установлено обогащение калием SRC в метеорите Shinejinst (H4) и аккреционной кайме в CAIs в метеорите Каинсаз (CO3.2).

Изучение метеоритов проводилось в ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН (Екатеринбург) с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan MIRA LMS, оснащенного ЭДС приставкой EDS X-max 80 и ДОЭ (EBSD) приставкой NordlysNano.

В метеорите Каинсаз было обнаружено окружное включение CAIs диаметром 200 мкм, окруженное тонкозернистой аккреционной каймой мощностью 5–8 мкм и реакционной пироксеновой каймой (5–7 мкм). В аккреционной кайме наблюдается обогащение K<sub>2</sub>O до 3.4 мас.%, что в ~50 раз выше содержания калия в CI хондритах.

В метеорите Shinejinst (H4) установлено включение SRC, представленное обломком хондры размером 100 мкм, состоящее из клиноэнstatита с каймами кальциевого пироксена, кристобалита и стекла в мезостазисе. В отличие от ряда других SRC в стекле

в данном включении наблюдаются повышенные содержания K<sub>2</sub>O до 4.0 мас.%.

В протосолнечной небуле калий является умеренно летучим компонентом, так же как и кремний, и, как правило, не встречается в больших концентрациях в компонентах хондритов. Обогащение калием отдельных SRC накладывает дополнительные ограничения на модели формирования SRC. Обогащение калием аккреционной каймы CAIs в метеорите Каинсаз может свидетельствовать о взаимосвязи с формированием SRC.

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Программы развития УрФУ в соответствии с программой «Приоритет-2030».*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Brigham C.A., Murrell M.T., Yabuki H., Ouyang Z., El Goresy A. Silica-bearing chondrules and clasts in ordinary chondrites // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1986. V. 50. P. 1655–1666.
2. Dugushkina K.A., Berzin S.V., Pankrushina E.A., Chebykin N.S., Pastukhovich A.Yu., Grokhovsky V.I., Demberel S. SiO<sub>2</sub>-rich components (SRS) in chondrite Shinejinst (H4) and Severniy Kolchim (H3): new results of EBSD research // Meteoritics & Planetary Science. 2023. V. 58(S1). 86th Annual Meeting of the Meteoritical Society (2023): Abstracts. 6072.
3. Hezel D.C., Palme H., Nasdala L., Brenker F.E. Origin of SiO<sub>2</sub>-rich components in ordinary chondrites // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2006. V. 70. P. 1548–1564.

## МЕТАСТАБИЛЬНОСТЬ КОСТНОГО АПАТИТА

**Бибко А.А.<sup>1</sup>, Шендрик Р.Ю<sup>2</sup>, Бухарова О.В.<sup>1</sup>, Хрущева М.О.<sup>1</sup>, Антонов М.С.<sup>1</sup>, Коструб Е.А.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Томский государственный университет, Томск, Россия, bibko.geology@gmail.com

<sup>2</sup> Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>3</sup> Медико-санитарная часть №2, Томск, Россия

Костная ткань это природный органоминеральный композитный материал. Органическая составляющая представлена, в основном, коллагеном (фибриллярный белок), а минеральная апатитом [LeGeros, LeGeros 1993]. Апатит в костной ткани формирует таблитчатые образования, которые формируются как в зонах разрывов коллагеновых фибрill (инфрафибрillарные), так и снаружи коллагеновых фибрill (экстрафибрillарные) [Hamed et al., 2012].

Экстрафибрillарные таблитчатые образования в кости, представлены поликристаллическим агрегатом блочного строения, где каждый блок характеризуется различной ориентацией оси с элементарной ячейки апатита [Бибко и др., 2024]. Помимо этого, поликристаллические агрегаты упакованы в пачки, а пространство между агрегатами заполнено ионами цитрата [Pang, Schwarcz, Jasuik, 2021].

Существует мнение, что апатит стабилен только в подобной органоминеральной структуре, а стабилизация происходит исключительно за счет органических соединений [Shah, 2025]. В случае удаления органического материала, наступает процесс перекристаллизации, подобный процессам при захоронении костей.

Чтобы это проверить был проведен эксперимент. Бедренные кости крыс нагревались в диапазоне температур 50–400 °C с шагом 50 °C и длительностью нагрева 2 часа. После этого кости истирались. Половина костной ткани использовалась для записи спектров FT-IR в диапазоне 400–4000 см<sup>-1</sup>. Другая половина использовалась для получения дифрактограмм в диапазоне 24–46 2θ. Было зафиксировано, увеличение областей когерентного рассеяния (002) и (310) при

нагреве после 300 °C. Эта же температурная граница характерна для уменьшения интенсивностей пиков органических соединений. Таким образом температурным воздействием запускается процесс перекристаллизации при удалении органических соединений, что указывает на метастабильность апатита в костной ткани.

*Исследования выполнены в рамках госзадания министерства науки и высшего образования РФ (проект № FSWM-2025-0015).*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Hamed E., Novitskaya E., Li J., Chen P.-Y., Jasuik I., McKittrick J. Elastic moduli of untreated, demineralized and deproteinized cortical bone: validation of a theoretical model of bone as an interpenetrating composite material // Acta biomaterialia. 2012. V. 8 (3). – P. 1080–1092.
2. LeGeros R. Z., LeGeros J. P. Dense Hydroxyapatite // An Introduction to Bioceramics. – 1993. – P. 139–180.
3. Pang S., Schwarcz H.P., Jasuik I. Interfacial bonding between mineral platelets in bone and its effect on mechanical properties of bone // J. Mech. Behav. Biomed. Mater. 2021. V. 113. P. 104132.
4. Shah F. A. Revisiting the physical and chemical nature of the mineral component of bone // Acta Biomater. 2025. V. 196. P. 1-16.
5. Бибко А.А., Лычагин Д.В., Бухарова О.В., Коструб Е.А., Хрущева М.О. Нанокомпозиция гидроксиапатита кортикальной костной ткани // Минералогия. 2024. Т. 10 (3). С. 20–31.

## ПОЛУЭМПИРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ, ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ И УПРУГИХ СВОЙСТВ МОНАЦИТО- ПОДОБНЫХ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ОРТОФОСФАТОВ РЗЭ

Богданова Л. И., Щапова Ю. В.

*Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия,  
bogdanovalouisa@gmail.com*

Фосфаты редкоземельных элементов со структурой монацита характеризуются механической прочностью, термической, химической, радиационной стабильностью и перспективны для конструкционных (термобарьерные покрытия) и ядерных приложений. Особый интерес представляют многокомпонентные твердые растворы с повышенной конфигурационной энтропией, варьирование которой дает дополнительный инструмент подстройки функциональных свойств. Для установления влияния химического состава многокомпонентных фосфатов на их структуру и свойства перспективно применение полуэмпирического атомистического моделирования, основанного на минимизации энергии системы с использованием предварительно оптимизированного набора потенциалов межатомных взаимодействий [Урусов, Еремин, 1999].

В настоящей работе выполнены расчеты структуры и свойств одно- ( $\text{Ln}_i\text{PO}_4$ ) и пятикомпонентных

$((\Sigma \text{Ln}_i)_1\text{PO}_4)$  ортофосфатов моноклинной структуры (*pr. gr. P2/n*), где  $\text{Ln}_i = \text{La}, \text{Ce}, \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Gd}, \text{Dy}$ , с использованием программного пакета GULP [Gale, Rohl, 2003] и набора трансферабельных межатомных потенциалов Ln-O и P-O, полученного в работах [Еремин и др., 2017; Eremin et al., 2019]. Для создания неупорядоченного распределения катионов по позициям использована программа BINAR [Еремин и др., 2008].

Выполненные расчеты показали систематические отличия термодинамических и упругих свойств многокомпонентных ортофосфатов от таковых для однокомпонентных (рис. 1) при сохранении основных характеристик структуры. Результаты моделирования востребованы для интерпретации экспериментальных данных колебательной спектроскопии и разработки физических моделей динамики решетки в условиях повышенной конфигурационной энтропии.

*Работа выполнена в рамках Государственного задания ИГГ УрО РАН по теме № 124020300057-6. Авторы выражают благодарность Н.Н. Еремину за предоставление доступа к программному пакету BINAR и Е.И. Марченко за полезные консультации.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Урусов В.С., Еремин Н.Н. Компьютерное моделирование структуры и свойств кристаллов – современные достижения и возможности // Сборник «Проблемы кристаллографии». М.: ГЕОС, 1999. Вып. 5. С. 228–266.
2. Еремин Н.Н., Уланова А.С., Марченко Е.И. Разработка модели межатомных потенциалов и атомистическое моделирование кристаллических структур монацитов легких редкоземельных элементов // Вестник филиала МГУ в г. Душанбе. 2017. Т. 1. № 3. С. 95–108.
3. Еремин Н.Н., Деянов Р.З., Урусов В.С. Выбор сверхячейки с оптимальной атомной конфигурацией при моделировании неупорядоченных твердых растворов // Физика и химия стекла. 2008. Т. 34. № 1. С. 9–18.
4. Eremin N.N., Ulanova A.S., Marchenko E.I. Solid solutions of monazites of lighter rare earth elements and plutonium: atomistic model of crystal structures, point defects and mixing properties // Comput. Mater. Sci. 2019. V. 157. P. 43–51.

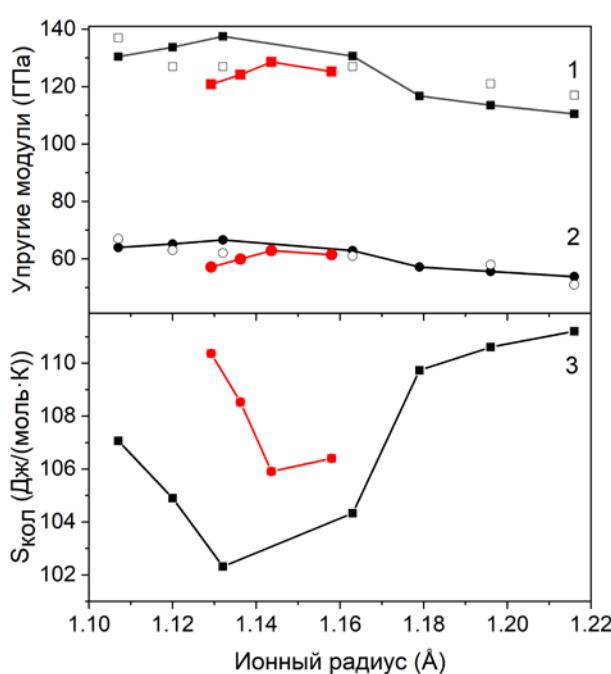


Рис. 1. Расчетные значения модуля всестороннего сжатия (1), модуля сдвига (2) и колебательной энтропии (3) однокомпонентных (черные символы) и многокомпонентных (красные символы) фосфатов в сравнении с экспериментальными данными (незалипные символы) в зависимости от ионного радиуса РЗЭ (для многокомпонентных – среднего радиуса)

## СТРУКТУРА И КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ЦЕПОЧЕЧНЫХ ФРАГМЕНТОВ НАНОУГЛЕРОДА

**Бокизода Д.А.<sup>1</sup>, Бунтов Е.А.<sup>1</sup>, Щапова Ю.В.<sup>1,2</sup>, Зацепин А.Ф.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
Физико-технологический институт, г. Екатеринбург, Россия, bobot92@mail.ru

<sup>2</sup> Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

При синтезе ЛЦУ (линейного цепочечного углерода) возникает сложность с идентификацией получаемого материала. Несмотря на то, что метод комбинационного рассеяния света (КРС) позволяет выявлять углеродные цепочки и определять их параметры [Ferrari et al., 2004], спектр КРС пленок ЛЦУ заметно отличается от спектра отдельных углеродных цепочек [Buntov et al., 2017]. Эти различия обусловлены проявлением кулоновских и ван-дер-ваальсовых взаимодействий между цепями внутри массива. Линии в спектре значительно расширяются, что усложняет их интерпретацию в контексте простых структурных моделей, предложенных М.Б. Гусевой и В.Г. Бабаевым [Babaev et al., 1999]. Возможными объяснениями такого несоответствия могут служить неучтенные аспекты, такие как влияние подложки, присутствие примесных атомов и уровень структурного беспорядка.

В данной работе предложена усовершенствованная структурная модель пленки ЛЦУ на медной подложке, после чего проведено сравнение экспериментального и теоретического спектров комбинационного рассеяния.

Расчетные спектры комбинационного рассеяния структур ЛЦУ на медной подложке приведены на рис. 1. Для сравнения приведен экспериментальный спектр нанокомпозитной пленки ЛЦУ, синтезированной на поликристаллической медной подложке.

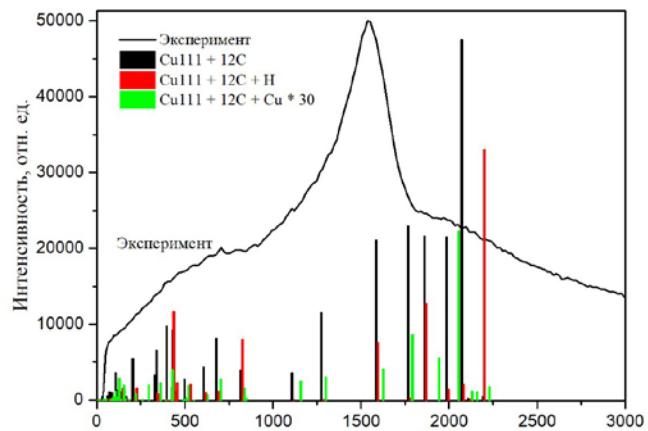


Рис. 1. Сравнение экспериментальных и расчетных спектров углеродных цепочек на поверхности меди (111)

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ferrari A.C., Robertson J. Raman spectroscopy of amorphous, nanostructured, diamond-like carbon, and nanodiamond // Philos Trans A Math Phys Eng Sci. 2004 Nov 15; A 362(1824):2477-512.
2. Buntov E.A., Zatsepin A.F., Guseva M.B., Ponomov Yu.S. 2D-ordered kinked carbyne chains: DFT modeling and Raman characterization // Carbon. – 2017. – V. 117. – P. 271–278.
3. Babaev V.G., Guseva M.B. «Ion-assisted condensation of carbon», in: Carbyne and Carbonyd Structures // Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London, 1999. P. 159-171.

## МИНЕРАЛОГИЯ АММОНИЯ В ВЕЩЕСТВЕ ПОЯСА АСТЕРОИДОВ

Бритвин С.Н.<sup>1</sup>, Иванова М.А.<sup>2</sup>, Кржижановская М.Г.<sup>1</sup>, Волкова И.А.<sup>1</sup>, Верещагин О.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия, sergei.britvin@spbu.ru

<sup>2</sup> Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН), meteorite2000@mail.ru

Азот относится к наиболее биологически значимым элементам, и выяснение путей его эволюции в космическом веществе является важной задачей современной космохимии и планетологии. Аммиак и его протонированная форма – аммоний, простейшие носители низковалентного азота, считаются распространенными компонентами вещества холодных областей Солнечной системы [Pizzarello and Williams, 2012; Poch et al., 2020]. Однако знания человека о минералогической специализации космического аммония до последнего времени основывались на спектроскопических данных, полученных астрофизическими методами. Недавнее обнаружение новограбленовита  $\text{NH}_4\text{MgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  в составе лунного реголита [Jin et al., 2024] показало, что минералогия аммония в космическом веществе может принципиально отличаться от ранее предложенных моделей, основанных на удаленном спектроскопическом зондировании.

В предлагаемом докладе мы приводим первые результаты исследований минералов аммония в составе вещества углистых хондритов – прямых аналогов углистых астероидов класса «С». Помимо никелистого буссенготита  $(\text{NH}_4)_2(\text{Mg},\text{Ni})(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  [Britvin et al., 2024], нами впервые открыты ассоциации водных силикатов кальция и аммония, свидетельствующие о протекании интенсивных гидротермальных

процессов в родительских телах углистых астероидов. Полученные результаты свидетельствуют о том, что специализация аммония в космическом веществе существенно отличается от тех моделей, которые предлагались ранее на основе дистанционной ИК-спектроскопии.

*Работа выполнена за счет гранта Российского Научного Фонда № 24-17-00228.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Britvin S.N., Vereshchagin O.S., Vlasenko N.S., Krzhizhanovskaya M.G., Ivanova V.A. Meteoritic Tutton salt, a naturally inspired reservoir of cometary and asteroidal ammonium. <https://arxiv.org/abs/2407.20997>
2. Jin S., et al. Evidence of a hydrated mineral enriched in water and ammonium molecules in the Chang'e-5 lunar sample // Nat. Astron. 2024. V. 9. P. 1127–1137.
3. Pizzarello S., Williams L.B. Ammonia in the early Solar System: an account from carbonaceous meteorites // Astrophys. J. 2012. V. 749. P. 161–167.
4. Poch O., et al. Ammonium salts are a reservoir of nitrogen on a cometary nucleus and possibly on some asteroids // Science. 2020. V. 367. Article 6483.

## МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ МЕТЕОРИТОВ

Брусницына Е.В., Гроховский В.И.

*Уральский Федеральный Университет, г. Екатеринбург, jeka\_bru@list.ru*

Метеориты содержат запись самых ранних стадий формирования планетезималей и планет в Солнечной системе. Металлическая структура может помочь расшифровать эту запись. Если планетезимали подвергались разогреву, то чем больше размеры твердого тела, тем больше времени требовалось для его охлаждения. В железных метеоритах формируется хорошо известная видманштеттенова структура – кристаллографически ориентированные пластины камасита в тэните. Металлографические скорости охлаждения железных метеоритов можно определить, используя компьютерную модель роста пластин камасита в тэните, концентрационные профили по Ni, скорости диффузии Ni в Fe и равновесные минералы при температуре 800–400 °C. Данная модель была предложена Вудом [Wood, 1964] и многократно уточнялась.

Также скорость охлаждения возможно определить по размеру высоконикелевых частиц тетратэнита, в структуре облачной зоны, которая формируется в результате спинодального распада ниже 400 °C [Yang et al., 1997]. Установлено, что чем больше размер высоконикелевых частиц тетратэнита в облачной зоне, тем ниже металлографическая скорость охлаждения. В соответствии с этим методом были получены зависимости скоростей охлаждения от размера высоконикелевых частиц для различных типов железных метеоритов [Goldstein et al., 2009] и для обычновенных Н-хондритов [Scott et al., 2014].

С помощью данных, полученных из металлографических скоростей охлаждения авторы работы [Yang et al., 2007] пришли к выводу, что родительское тело железных метеоритов группы IVA образовалось в результате катастрофического столкновения протопланеты размером с Луну или Марс ~4,5 млрд лет назад и охлаждалось без силикатной мантии. Размер

тела составил около 300 км. Аналогичные процессы могли формировать и другие группы железных метеоритов (IIAB, IIIAB, IVB). В данной работе были определены металлографические скорости охлаждения по размеру высоконикелевых частиц тетратэнита в облачной зоне в: Челябинск (LL5), Аннам (H5), Calama 009 (L6), Сеймчан (PMG), Vaca Muerta (A1).

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития УрФУ в соответствии с программой «Приоритет-2030» и проект №FEUZ-2023-0014.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Goldstein J.I., Yang J., Kotula P.G., Michael J.R., Scott E.R.D. Thermal histories of IVA iron meteorites from transmission electron microscopy of the cloudy zone microstructure. // Meteorit. Planet. Sci. 2009. V. 44(3). P. 343–358.
2. Scott E.R.D., Krot T.V., Goldstein J.I., Wakita S. Thermal and impact history of the H chondrite parent asteroid during metamorphism: Constraints from metallic Fe-Ni. // Geochim. Cosmochim. Acta 2014. V. 136. P. 13–37.
3. Wood J.A. The cooling rates and parent bodies of several iron meteorites. // Icarus 1964. V. 3. P. 429–459.
4. Yang C.-W., Williams D.B., Goldstein J.I. A new empirical cooling rate indicator for meteorites based on the size of the cloudy zone of the metallic phase. // Meteorit. Planet. Sci. 1997. V. 32. P. 423–429.
5. Yang J., Goldstein J.I., Scott E.R.D. Iron meteorite evidence for early catastrophic disruption of protoplanets. // Nature 2007. V. 446. P. 888–891.

## ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО ОКРУЖЕНИЯ НА РЕНТГЕНОЭМИССИОННЫЕ СПЕКТРЫ S K<sub>β</sub> СЕРЫ

Булатов В.А.<sup>1</sup>, Замятин Д.А.<sup>1</sup>, Чареев Д.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ИГГ УрО РАН, Екатеринбург, Россия, vladislavtalica@gmail.com

<sup>2</sup> ИЭМ РАН, Черноголовка, Россия

Положение и форма рентгеноэмиссионных спектров в области линии S K<sub>β</sub> определяется состоянием химической связи и зависит от степени окисления серы, химического состава и кристаллической структуры соединения. В спектре проявляются накладывающиеся сателлитные линии, обусловленные многократной ионизацией, обменным взаимодействием, эффектом Оже и влиянием молекулярных орбиталей [Zhao et al., 2022]. Закономерности вариации формы линии могут быть использованы для получения данных о состоянии химической связи соединения с микронной локальностью и восстановления изменений условий роста кристалла в геологических или лабораторных условиях. Цель работы — анализ формы линий S K<sub>β</sub> в зависимости от химического состава и структуры соединений на основе серы.

Электронно-зондовый микроанализ (ЭЗМА) выполнен на Cameca SX100 с использованием кристалла-анализатора LPET. Спектры регистрировались в диапазоне 2.4–2.54 кэВ (600 точек) при 100 нА в течение 30 минут (5 аккумуляций). Спектры линий S-K<sub>β<sub>1,3</sub></sub>, S-K<sub>β'</sub> и S-K<sub>β''</sub> получены в минералах FeS<sub>2</sub> и CuFeS<sub>2</sub>, в синтетических сульфидах металлов CsFeS<sub>2</sub>, Ag<sub>5</sub>FeS<sub>4</sub>, Ag<sub>2</sub>S, CsIn<sub>5</sub>S<sub>8</sub>, RbIn<sub>5</sub>S<sub>8</sub>, KIn<sub>5</sub>S<sub>8</sub>, SmS<sub>2</sub>, NaGdS<sub>2</sub>. Кристаллы сульфидов синтезированы путем перекристаллизации шихты в расплавах галогенидов щелочных металлов в условии стационарного температурного градиента [Chareev et al., 2016].

В настоящей работе получены эмиссионные спектры S-K<sub>β</sub> природных и синтезированных сульфидов (рис. 1), выполнен анализ вариации формы и положе-

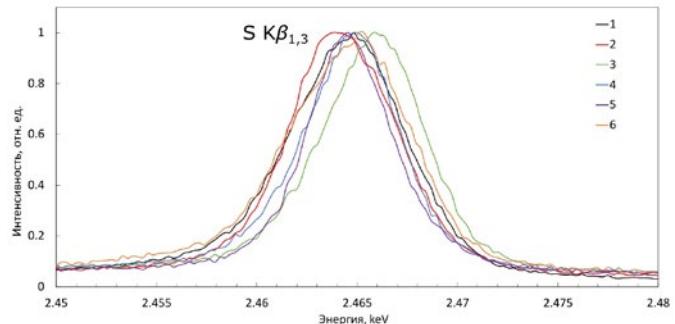


Рис. 1. Рентгеновский эмиссионный спектр S K<sub>β</sub> супьфидов FeS<sub>2</sub> (1), CuFeS<sub>2</sub> (2), KIn<sub>5</sub>S<sub>8</sub> (3), CsIn<sub>5</sub>S<sub>8</sub> (4), NaGdS<sub>2</sub> (5), Ag<sub>5</sub>FeS<sub>4</sub> (6)

ния линии S-K<sub>β<sub>1,3</sub></sub>, в том числе сателлитных линий S-K<sub>β'</sub> и S-K<sub>β''</sub>, рассмотрено влияние матричных эффектов от элементов химического окружения.

*Работа выполнена в рамках Государственного задания ИГГ УрО РАН №124020300057-6 в ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Chareev D.A., Volkova O.S., Geringer N.V., Koshelev A.V., Nekrasov A.N., Osadchii V.O., Filimonova O.N. Synthesis of chalcogenide and pnictide crystals in salt melts using a steady-state temperature gradient // Crystallography reports. 2016. V. 61(3). P. 682–691.
2. Zhao W.-Z., Lu B., Yu J.-B., Zhang B.-B., Zhang Y. Determination of sulfur in soils and stream sediments by wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry // Microchem. J. 2020. V. 156. 104840.

## ОСОБЕННОСТИ МОДУЛЯРНОГО СТРОЕНИЯ НОВОГО Ga-, Ge-ПРЕДСТАВИТЕЛЯ СТРУКТУРНОГО СЕМЕЙСТВА ДЮМОРТЬЕРИТА С ОБЩЕЙ ФОРМУЛОЙ $\text{Al}[(\text{Al},\text{Ga})_2\text{O}]_3[(\text{Si}^{4+},\text{Ge}^{4+})\text{O}_4]_3(\text{BO}_3)$

Вайтиева Ю.А.<sup>1</sup>, Сеткова Т.В.<sup>2</sup>, Спивак А.В.<sup>2</sup>, Аксенов С.М.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Лаборатория арктической минералогии и материаловедения  
ФИЦ КНЦ РАН, Анадырь, Россия, aks.crys@gmail.com

<sup>2</sup> Институт экспериментальной минералогии имени академика  
Д.С. Коржинского РАН, Черноголовка, Россия, setkova@iem.ac.ru

<sup>3</sup> Геологический институт ФИЦ КНЦ РАН, Анадырь, Россия, aks.crys@gmail.com

Обширное семейство природных и синтетических дюмортьеритоподобных соединений, представленное минералами надгруппы дюмортьерита и семейством элленбергерита, может быть описано общей формулой  $X(\text{M}2\Phi)3(\text{Th}\Theta\text{h}3\theta\text{h})3(\text{Tt}\Theta\text{t}3\theta\text{t})$  [Шванская, Якубович, 2021; Evans et al., 2012], где  $\text{M}2\Phi$  – двойные цепочки из связанных по граням октаэдров, характеризующиеся двумя топологическими типами (которые можно обозначить как  $\text{MH}_2\Phi\text{H}$  и  $\text{MC}_2\Phi\text{C}$ );  $(\text{Th}\Theta\text{h}3\theta\text{h})$  и  $(\text{Tt}\Theta\text{t}3\theta\text{t})$  – группировки в каналах гексагонального ( $\text{h}$ ) и треугольного ( $\text{t}$ ) сечения;  $X$  – октаэдрические катионы, располагающиеся в широких гексагональных  $\text{h}$ -каналах. В настоящей работе приводятся результаты первого успешного синтеза нового Ga-, Ge-представителя семейства дюмортьерита.

Синтез проводили в гидротермальных условиях при температуре 600/650 °С и давлении 100 МПа в растворе борной кислоты 30 мас.%  $\text{H}_3\text{BO}_3$ . Шихтовая смесь состояла из кристаллических кварца и корунда, и порошкообразных оксидов галлия и германия (99,9%) в соотношении 3 : 3 : 1 : 1 соответственно. Продолжительность опытов 14 дней. В результате получены игольчатые кристаллы до 350 мкм в длину. Кристаллическая структура изучена методом рентгеноструктурного анализа с использованием монокристального дифрактометра Rigaku XtaLAB Synergy-S (HyPix детектор). Параметры гексагональной элементарной ячейки:  $a = 23.9427(1)$  Å,  $c = 4.7923(1)$  Å,  $V = 2379.1(1)$  Å<sup>3</sup>; пр. гр.  $P6_3mc$ . Структурная модель уточнена до итогового  $R = 5.79$  для  $2053 I > 2\sigma(I)$  с помощью программы Jana2006.

По аналогии с другими представителями структурного семейства дюмортьерита кристаллохимическая формула нового Ga-, Ge-

представителя может быть записана в виде ( $Z = 8$ ):  $\text{Al}[(\text{Al},\text{Ga})_2\text{O}]_3[(\text{Si}^{4+},\text{Ge}^{4+})\text{O}_4]_3(\text{BO}_3)$ . В кристаллической структуре присутствуют цепочки  $M^H_2\Phi^H$  и  $M^C_2\Phi^C$  типов в соотношении 1 : 1. Катионы  $\text{Ge}^{4+}$  замещают  $\text{Si}^{4+}$  во всех тетраэдрах, что выражается в увеличении средних расстояний  $T\text{-O}$  от 1.724 до 2.03 Å. Катионы  $\text{Ga}^{3+}$  располагаются вместе с катионами  $\text{Al}^{3+}$  в двойных цепочках типа  $M^C_2\Phi^C$ . Структуры дюмортьеритоподобных соединений могут быть разбиты на составляющие слои [Evans et al., 2012]. Особенностью нового соединения являются слои, состоящие из шестиугольников  $X(T^h\Theta^h_3\theta^h)$ , чередующихся с цепочками  $M^C_2\Phi^C$  типа, к которым прикрепляются  $(T\Theta'_3\theta)$  – треугольные группировки  $\text{BO}_3$ -групп; слои, состоящие из двойных чередующихся цепочек  $M^H_2\Phi^H$  и  $M^C_2\Phi^C$  типов и слои, состоящие из шестиугольников  $X(T^h\Theta^h_3\theta^h)$ , чередующихся с цепочками  $M^H_2\Phi^H$  типа, к которым также прикрепляются  $(T\Theta'_3\theta)$  – группировки  $\text{BO}_3$ -групп треугольного сечения.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (№ 20-77-10065-П).*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Шванская Л.В., Якубович О.В. “Гибкие” каркасные структуры и физические свойства соединений с переходными металлами, производных от элленбергита и  $\beta$ -тридимита // Кристаллография. 2021. Т. 66(1). С. 13–31.
2. Evans R.J., Groat L.A. Structure and topology of dumortierite and dumortierite-like materials // The Canadian Mineralogist. 2012. V. 50. P. 1197–1231.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ МЕЖЗВЕЗДНЫХ ЛЬДОВ

Васюнин А. И.

*Научная лаборатория астрохимических исследований, Уральский  
федеральный университет, Екатеринбург, Россия, anton@urfu.ru*

Области образования звезд и планет характеризуются экстремальными физическими условиями: сверхнизкими плотностями и температурами вещества, а также наличием ионизирующего излучения. Несмотря на это, химический состав областей звездообразования весьма разнообразен. В межзвездной среде обнаружены как простые двухатомные молекулы, так и сложные многоатомные органические соединения. Количество открытых в межзвездной среде сложных молекул (СОМ) различных типов непрерывно растёт, что обуславливает растущий интерес к астрохимии как к одному из возможных механизмов, вносящих вклад в возникновение жизни во Вселенной. Численное моделирование образования в межзвездной среде сложных органических молекул с использованием модели MONACO показало, что хотя СОМ могут образовываться в холодном межзвездном газе, основной вклад в их образование вносят химические процессы на поверхности межзвездных пылевых частиц, покрытых ледяными мантиями. При этом, значительную роль играют протекающие в межзвездных льдах т.н. недиффузионные химические процессы. Интересно, что содержания СОМ в холодных льдах, образующихся на ранних стадиях развития протозвезд, оказываются близкими к содержаниям СОМ в газе т.н. «горячих ядер», следующей стадии развития протозвезд малой массы.

Результаты численного моделирования дополняются лабораторными экспериментами на сверхвысоковакуумной установке ISEAge, предназначенный для трансмиссионной ИК-спектроскопии аналогов межзвездных льдов. Созданная в лаборатории установка позволяет выращивать тонкие льды контролируемого химического состава и структуры в условиях, приближенных к условиям в межзвездной среде ( $P < 10^{-13}$  атм.,  $T \sim 10K - 300K$ ). Получаемые трансмиссионные ИК-спектры льдов в диапазоне 2.5–20 мкм используются как референсные при анализе наблюдений межзвездных льдов, получаемых с современных наземных и космических телескопов, включая James Webb Space Telescope (JWST). Сравнение лабораторных спектров с данными наблюдений на JWST впервые позволили одновременно оценить содержание метана в газе и ледяных мантиях протозвезды IRAS 23385+6053, установить верхние пределы содержаний молекулы HCN и неактивной в ИК-диапазоне молекулы N<sub>2</sub> в межзвездных льдах.

Ожидается, что в ближайшие десятилетия значительный вклад в развитие понимания химической эволюции межзвездной среды внесут создаваемые отечественные космические обсерватории Спектр-УФ и Миллиметрон. Теоретические и экспериментальные астрохимические исследования будут необходимы для интерпретации наблюдательных данных с этих многообещающих инструментов.

## СИСТЕМА ДИОПСИД-ЖАДЕИТ-СО<sub>2</sub> ПРИ 3-6 ГПа

Виноградова Ю.Г., Шацкий А.Ф.

*ГЕОХИ РАН, г. Москва, Россия, vinogradova@geokhi.ru*

Углекислый газ является важным летучим компонентом мантии Земли. Ключевой реакцией, ограничивающей стабильность CO<sub>2</sub>-флюида в эклогитовой мантии, является карбонизация клинопироксена, ранее изученная на примере диопсида [Luth, 2006]. Однако эклогитовый клинопироксен (омфацит) содержит различные количества жадеита. Термодинамические расчеты предсказали, что примесь жадеита расширяет поле устойчивости ассоциации клинопироксен + CO<sub>2</sub> в сторону более высоких давлений [Knoche et al., 1999].

В данной работе были изучены фазовые отношения в системе диопсид-жадеит-CO<sub>2</sub> (включая подсистему диопсид-CO<sub>2</sub>) при 3–6 ГПа и 900–1500 °C путем экспериментов на многопуансонном прессовом аппарате. В результаты было уточнено положение линии карбонизации диопсида. Показано, что его карбонатизация сопровождается резким снижением температуры солидуса аналогично системе лерцолит-CO<sub>2</sub> [Shatskiy et al., 2023a]. Установлена реакция карбонизации для омфацита, которая приводит к образованию клинопироксена с высокой долей жадеитового минала (90–97 мол. %) [Shatskiy et al., 2023b]. Температура солидуса системы диопсид-жадеит-CO<sub>2</sub> при повышении давления от 2.5 до 6.5 ГПа возрастает от 1000 до 1100 °C (рис. 1). Расплав вблизи линии солидуса является карбонатным (доля SiO<sub>2</sub> 1–5 масс. %) и низкощелочным (Na<sub>2</sub>O 1–5 масс. %). Низкая температура солидуса связана с флюсующим действием CO<sub>2</sub>-флюида.

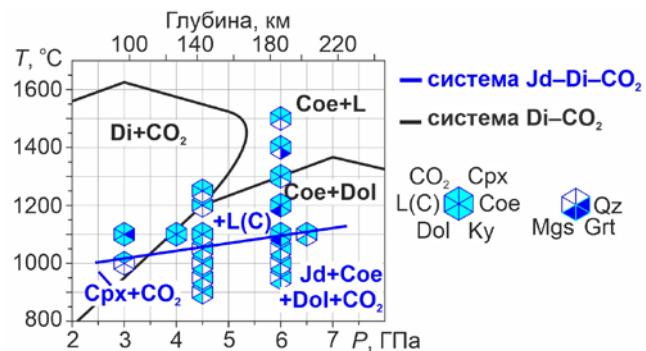


Рис. 1. Фазовые отношения в системе диопсид-жадеит-CO<sub>2</sub>. Закрашенными многоугольниками показан фазовый состав образцов в системе диопсид-жадеит-CO<sub>2</sub>.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Knoche R., Sweeney R.J., Luth R.W. Carbonation and decarbonation of eclogites: the role of garnet // Contrib. Miner. Petrol. 1999. V. 135(4). P. 332–339.
2. Luth R.W. Experimental study of the CaMgSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub> system at 3–8 GPa // Contrib. Miner. Petrol. 2006. V. 151(2). P. 141–157.
3. Shatskiy A., Vinogradova Y.G., Arefiev A.V., Litasov K.D. Revision of the CaMgSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub> P-T phase diagram at 3–6 GPa // Am. Min. 2023a. V. 108. P. 2338–2347.
4. Shatskiy A., Vinogradova Y.G., Arefiev A.V., Litasov K.D. The system NaAlSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>-CaMgSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub> at 3–6.5 GPa: implications for CO<sub>2</sub> stability in the eclogitic suite at depths of 100–200 km // Contrib. Miner. Petrol. 2023b. V. 178(4). P. 22

## СОЛНЕЧНЫЙ НЕФЕЛИН ИЗ КОПИ НА КАНАЛЕ УВИЛЬДЫ-АРГАЗИ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

Воронин М.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ИЭМ РАН, Черноголовка, Россия, voronin@iem.ac.ru

Первое упоминание и подробное описание солнечного нефелина приведено в работе [Попов, Нишанбаев, 1980] на материале копей 236, 237, 240 из района оз. Ишкуль (Ильменские горы). В настоящее время по данным сайта <https://webmineral.ru> солнечный нефелин встречается в трех точках Ильмено-Вишневогорского комплекса (Южный Урал): копь № 240 в Ильменских горах; копь, расположенная на территории горного отвода Потанинского вермикулитового карьера (Потанины горы, Вишневогорский массив); копь, вскрытая в 2003 году при прокладке канала Увильды-Аргази. В борту канала вскрыта жила миаскитового пегматита мощностью до 1.5 м, залегающая среди миаскитов Увильдинской полосы Ильмено-Вишневогорского комплекса и сложенная нефелином, полевым шпатом и биотитом. Также отмечены редкие находки кристаллов циркона, содалита и ильменита.

С применением цифровой сканирующей и оптической микроскопии были изучены образцы из третьего местонахождения. На основании проведенного исследования и с использованием экспериментальных и природных данных по равновесиям с участием минералов пород, в которых встречается солнечный камень [Wones, Eugster, 1965; Rutherford, 1969; Smith, 1974, с цитированной литературой; Зырянов, 1981; Brown, 1984], обоснована и уточнена ранее высказанная гипотеза [Boone, 1969; Smith, 1974] образования полевошпатового солнечного камня.

*Работа выполнена в рамках гос. задания ИЭМ РАН.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Зырянов В.Н. Фазовое соответствие в системах щелочных полевых шпатов и фельдшпатоидов. М.: Наука. 1981. 219 с.
2. Попов В.А., Нишанбаев Т.П. Явления распада в нефелинах Ильменских гор // Онтогенез пегматитов Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР. 1980. С. 102–113.
3. Boone G.M. Origin of Clouded Red Feldspars: Petrologic contrasts in a Granitic Porphyry Intrusion // American Journal of Science. 1969. V. 267. No. 6. P. 633–668.
4. Brown W.L. (Ed.). Feldspars and Feldspathoids: Structures, Properties and Occurrences. Series C: Mathematical and Physical Sciences Vol. 137. Springer Science & Business Media Dordrecht. 1984. 541 p.
5. Rutherford M.J. An Experimental Determination of Iron Biotite-Alkali Feldspar Equilibria // Journal of Petrology. 1969. V. 10. No. 3. P. 381–408.
6. Smith, J.V. Feldspar Minerals. Vol. 2: Chemical and Textural Properties. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. 1974. 690 p.
7. Wones D.R., Eugster H.P. Stability of Biotite: Experiment, Theory, and Application // American Mineralogist. 1965. V. 50. No. 9. P. 1228–1272.

## ФРЕСНОИТ ИЗ ИНАГЛИНСКОГО МАССИВА (АЛДАНСКИЙ ЩИТ): КР- И ИК-СПЕКТРОСКОПИЯ

Гавриленко В.В.<sup>1</sup>, Радомская Т.А.<sup>1</sup>, Шендрик Р.Ю.<sup>1</sup>, Гладкочуб Е.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия,

verf61@yandex.ru; romus@igc.irk.ru; taniaojigova@mail.ru

<sup>2</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Фресноит – редкий минерал, силикат титана и бария с химической формулой  $\text{Ba}_2\text{TiO}(\text{Si}_2\text{O}_7)$ . Жильный минерал, впервые обнаружен в 1965 году в прожилках санборнит-кварцевых метаморфических пород на контакте с гранодиоритами в районе Фресно (штат Калифорния, США). На Алданском щите фресноит был впервые описан на Мурунском массиве в 1996 г., а в 2021 г.– на Инаглинском. Фресноит Инаглинского массива был обнаружен в керне на глубине 300 м в щелочных пегматитах, пересекающих дунит. Идиоморфные кристаллы фресноита желтого цвета достигают размеров  $7 \times 3 \times 3$  мм. Они обладают интенсивной люминесценцией от ярко-голубого до голубовато-белого цвета в коротковолновых ультрафиолетовых ( $\lambda = 245$  нм) лучах.

По результатам электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа установлен следующий состав фресноита  $(\text{Ba}_{1.80}\text{Sr}_{0.07}\text{Na}_{0.03})\text{Ti}_{1.03}(\text{Si}_{2.04}\text{AlO}_7)\text{O}$ . Минерал интересен необычной координацией Ti – в виде тетрагональных пирамидальных групп  $\text{TiO}_5$ . Фресноит – одно из немногих соединений, в котором можно изучить колебательные свойства координированного пятью кислородами титана. Полосы в диапазонах  $317–401\text{ cm}^{-1}$  обусловлены

Si – O-валентными колебаниями. Полоса при  $860\text{ cm}^{-1}$  относится к валентным колебаниям титанильной группы Ti – O. Полосы в интервале  $824$  и  $873\text{ cm}^{-1}$  обусловлены колебаниями короткой ковалентной связи Ti – O<sub>2</sub> [Mayerhöfer, Dunken, 2001]. Выполнено ИК-картирование фресноита для идентификации минералов и отображения их парагенезисов. В изучаемом образце ИК картирование позволило отобразить минеральные парагенезисы фресноита с ортоклазом, фосфоиннелитом, стронциевым апатитом (рис. 1).

Исследования выполнены в рамках государственного задания по Проекту № 0284-2021-0007 на оборудование ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН и ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН (грант № 075-15-2021-682).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Mayerhöfer Th.G., Dunken H.H. Single-crystal IR spectroscopic investigation on fresnoite, Sr-fresnoite and Ge-fresnoite, Germany // Vibrational Spectroscopy. 2001. V. 25. P. 185–195.

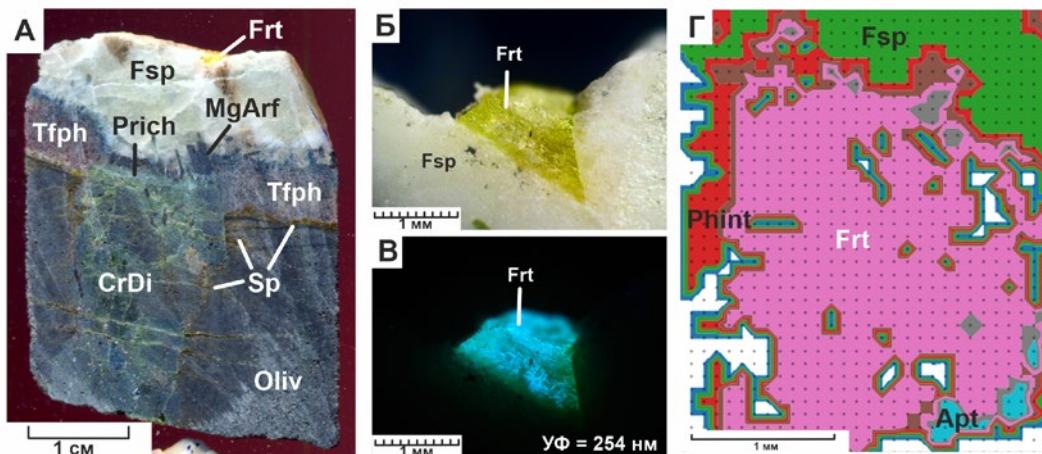


Рис. 1. Фресноит в щелочном пегматите. А – распиленный и пришлифованный образец. Б и В – микрофотографии фресноита в полевом шпата: Б – при дневном освещении, В – при воздействии коротковолнового (254 нм) ультрафиолетового излучения. Г – ИК картирование фресноита для отображения минеральных парагенезисов. Apt – апатит, CrDi – хромдиопсид, Frt – фресноит, Fsp – калиевый полевой шпат, MgArf – магнезиоарфведсонит, Phint – фосфоиннелит, Prich – калиевый риахтерит, Sp – серпентин, Tfph – тетраферрифлогопит

# РАЗРАБОТКА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ БАЗЫ ДАННЫХ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ БИНАРНЫХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ СЕРИИ $K_2LnZr(PO_4)_3$ СО СТРУКТУРОЙ ЛАНГБЕЙНИТА

Гамбуева А.А.<sup>1</sup>, Еремин Н.Н.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Геологический факультет, кафедра кристаллографии и кристаллохимии, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ РАН), Москва, Россия, amgalanagambueva@yandex.ru*

Наряду с фосфатами групп монацита и NZP (насиона) фосфаты редкоземельных элементов с каркасом лангбейнитового типа (пр. гр.  $P2_13$ ) являются возможными прототипами материалов для долговременного хранения радиоактивных отходов. В работе была осуществлена разработка модели межатомных потенциалов, предназначенная для моделирования структур и свойств твердых растворов серии  $K_2LnZr(PO_4)_3$  с каркасом лангбейнитового типа. Для этого на первом этапе была поставлена задача создания набора парных потенциалов, который способен обеспечить адекватное описание структурных параметров и термодинамических характеристик всех исследуемых крайних членов изоморфных рядов твердых растворов редкоземельных фосфатов – лангбейнитов с использованием экспериментальной структурной информации из работы [Трубач и др., 2004].

В качестве набора – прототипа была выбрана модель потенциалов, разработанная в серии работ [Еремин и др., 2017; Еремин и др., 2019; Eremin et al., 2019] и с успехом примененная для структурного и термодинамического моделирования редкоземельных монацитов и ксенотимов. В этой модели эффективные заряды на атомах были зафиксированы следующими величинами:  $q(P)=+1,2e$ ,  $q(Ln)=+1,6e$ ,  $q(O)=-0,7e$ . Модернизированная модель для моделирования лангбейнитов использует следующие атомные заряды:  $q(K)=+0,6e$ ,  $q(Zr)=+2,4e$ ,  $q(Ln)=+1,8e$ ,  $q(P)=+1,6e$ ,  $q(O)=-0,85e$ , что позволяет осуществлять гетеровалентные замещения в катионной подрешетке, не нарушая электронейтральность элементарной ячейки соединения. В рамках разработанной зарядо-

вой модели была проведена оптимизация параметров парных потенциалов Морзе для взаимодействий Ln-O в программе GULP. Далее был проведен расчет параметров взаимодействия и энталпии смешения бинарных твердых растворов серии ортофосфатов со структурой лангбейнита.

*Работа выполнена в рамках государственного задания МГУ и ИГЕМ РАН.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Трубач И.Г., Бескровный А.И., Орлова А.И. и др. Синтез и исследование новых фосфатов вида  $K_2LnZr(PO_4)_3$  ( $Ln=$ Ce-Yb, Y) со структурой лангбейнита // Кристаллография, 2004, Т. 49. № 4. С. 692–696.
2. Еремин Н.Н., Уланова А.С., Марченко Е.И. Разработка модели межатомных потенциалов и атомистическое моделирование кристаллических структур монацитов легких редкоземельных элементов // Вестник филиала МГУ в г. Душанбе, сер. Естественных наук. 2017, Т.1. №3. С. 94.
3. Еремин Н.Н., Марченко Е.И., Михайлова П.С. и др. Теоретическая оценка энергетики вхождения примеси плутония в фосфаты со структурой монацита, ксенотима и рабдофана // Проблемы кристаллографии, 2019, Москва, Выпуск 7. С. 16.
4. Eremin N.N., Marchenko E.I., Petrov V.G. et. al. Solid solutions of monazites and xenotimes of lanthanides and plutonium: Atomistic model of crystal structures, point defects and mixing properties // Computational Materials Science. 2019. V. 157. P. 43.

## КАЛЬКУЛЯТОР ОЦЕНКИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТОЛКНОВЕНИЙ АСТЕРОИДОВ И КОМЕТ С ЗЕМЛЁЙ

Глазачев Д.О., Попова О.П., Подобная Е.Д., Шувалов В.В.,  
Артемьева Н.А., Светцов В.В., Хазинс В.М.

*Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского, Москва, Россия  
GlazachevD@idg.ras.ru*

Удары космических тел (КТ) по Земле приводят к возникновению опасных эффектов, которые могут сразу после удара или впоследствии оказать вредное или губительное воздействие на человека, животных и растения, а также на хозяйствственные объекты. Одними из наиболее важных и опасных последствий падений астероидов и комет, являются разрушения на поверхности Земли, вызываемые ударной волной и тепловое излучение.

Последствия падения космических тел зависят от характера их взаимодействия с атмосферой. Существует два предельных сценария такого взаимодействия, один из них – это кратерообразующий удар, при котором космическое тело практически не теряет энергию при пролете через атмосферу, и вся энергия идет на образование кратера. Второй сценарий – так называемый «метеорный взрыв», при котором основная энергия выделяется в атмосфере.

Проведенное серийное численное моделирование позволило оценить параметры ударной волны, теплового излучения, энергию сейсмических волн и сейсмическую эффективность для метеорных взрывов и кратерообразующих ударов. Образующийся в результате удара атмосферный плюм поднимается на большие высоты (100–300 км) и порождает атмосферные возмущения, распространяющиеся на расстояния до тысяч километров. Для кратерообразующих ударов важными характеристиками являются размер кратера и параметры слоя выброса

из кратера (толщина слоя выброса и количество расплава в выбросах).

Отдельное внимание уделялось переходным вариантам (для ударников диаметром 100–300 метров), для которых важно знать, какая часть начальной кинетической энергии выделяется в атмосфере, а какая доступна для образования кратеров. Для быстрых оценок этого соотношения использовали простую квазиэмпирическую модель типа «pancake», чьи параметры откалибровали по результатам численного моделирования.

На основе результатов моделирования были построены аппроксимационные соотношения для быстрой оценки важнейших параметров удара.

Предлагаемые соотношения зависят только от свойств космического объекта (размер, плотность, скорость и угол входа). Они были использованы в специально созданном интернет-калькуляторе («Impact Effects» <http://AsteroidHazard.pro>), позволяющем быстро и достаточно точно оценивать различные эффекты падения космических тел.

*Работа выполнена в рамках государственного задания «Комплексное моделирование воздействия на внутренние и внешние геосфера внедряющихся космических тел и оценка последствий таких падений», утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 125012200624-5).*

## СИНТЕЗ И КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА СИСТЕМЫ $(\text{Cu}_2\text{Se})_n\text{TiSe}_2$

Горбов Л.Е., Титов А.А.

*Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия levgorbov@mail.ru,  
A.A.Titov@mail.ru*

Интеркалатные соединения и слоистые дихалькогениды способны входить в состав модульных соединений, при этом их роль в таких соединениях малоизучена. Ранее изученные модульные соединения [Lakshan et al., 2024]  $(\text{Cu}_2\text{Se})_n\text{TiSe}_2$  ( $n=2$ ), обладают малой теплопроводностью ( $0.3\text{--}0.47 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) и широкой запрещенной зоной ( $\approx 1.61 \text{ eV}$ ), также представляет интерес само конструирование этих материалов. Целью данной работы стояло синтезировать соединения  $(\text{Cu}_2\text{Se})_n\text{TiSe}_2$  ( $n=0.5; 1; 2$ ) и изучить свойства модульных соединений халькогенидов металлов Cu и Ti, а также влияние методики синтеза на свойства полученных соединений.

Для этого методом твердофазных реакций в вакуумированных кварцевых ампулах были получены соединения  $\text{Cu}_2\text{Se}$ ,  $\text{TiSe}_2$  и  $\text{Cu}_4\text{TiSe}_4$  обладающие про-

странственными группами  $R\text{-}3m$ ;  $P\text{-}3 m\bar{1}$ ;  $P\text{-}4 3 m$ , соответственно. Аттестация кристаллической структуры проводилась на дифрактометре Shimadzu XRD 7000 Maxima (излучение  $\text{Cu K}_{\alpha 1}$ , графитовый монокроматор,  $2\Theta = 10\text{--}90^\circ$ ) в ЦКП «Урал-М» (Института металлургии УрО РАН) с использованием метода порошковой рентгеновской дифракции.  $\text{Cu}_4\text{TiSe}_4$  был синтезирован новым методом, из матриц  $\text{Cu}_2\text{Se}$  и  $\text{TiSe}_2$ , в его структуре обнаружена дефектность по меди, а по своей структуре он схож с Сульванитом  $\text{Cu}_3\text{VS}_4$  параметр решетки которого  $a=5.39$ .

В данной работе изучаются и обсуждаются свойства фазы, а также исследуются другие сочетания  $\text{TiSe}_2$   $\text{Cu}_2\text{Se}$  (рис. 1).

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.*

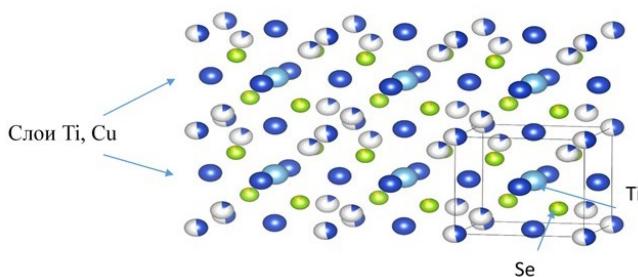


Рис. 1. Фрагмент кристаллической решетки  $(\text{Cu}_2\text{Se})_n\text{TiSe}_2$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. Lakshan A., Koley B., Buxi K., Raghuvanshi P.R., Nuss J., Bhattacharya A., Chatterjee R., Roy A., and Jana P.P. Disorder-Mediated Structural Transformation in the  $\text{Cu}_4\text{TiSe}_4\text{-xSx}$  ( $0 \leq x \leq 4$ ) System and Its Effects on the Thermal Transport Property // Chemistry of Materials. 2024. V. 36 (11). P. 5741-5752.

## ОСОБЕННОСТИ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ СПЛАВОВ Fe-Ni-Co НЕКОТОРЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ И ЖЕЛЕЗОКАМЕННЫХ МЕТЕОРИТОВ ПО ДАННЫМ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И МЕССБАУЭРОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Горюнов М.В.<sup>1</sup>, Фелнер И.<sup>2</sup>, Наумов С.П.<sup>3,4</sup>, Чукин А.В.<sup>1</sup>, Оштракх М.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Физико-технологический институт, Уральский федеральный университет,  
Екатеринбург, Российская Федерация, oshtrakh@gmail.com*

<sup>2</sup> *Racah Institute of Physics, The Hebrew University, Jerusalem, Israel*

<sup>3</sup> *Институт физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского  
отделения РАН, Екатеринбург, Российская Федерация*

<sup>4</sup> *Институт естественных наук и математики, Уральский федеральный  
университет, Екатеринбург, Российская Федерация*

Методами магнитных измерений и мессбауэровской спектроскопии с высоким скоростным разрешением исследованы сплавы из железных метеоритов (Gibeon IVA, Mundrabilla IAB-ung, Campo del Cielo IAB-MG, Gebel Kamil ung, Trenton IIIAB, Sterlitamak IIIAB, Sikhote-Alin IIAB, Anyujskij IIAB, Aliskerovo IIIE-an, Kayakent IIIAB) и железокаменных метеоритов (Seymchan PMG и Omolon PMG).

Получены отличия магнитных моментов насыщения для сплавов Fe-Ni-Co из разных метеоритов, которые изменяются в пределах от 175 до 241 эм/г. На кривых зависимости намагниченности от температуры  $M(T)$  ( $5 \leq T \leq 330$  К) для сплавов Fe-Ni-Co из некоторых метеоритов наблюдаются фазовые переходы, например для сплавов Fe-Ni-Co из палласитов Seymchan PMG и Omolon PMG фазовые переходы обнаружены при 265 и 260 К, соответственно.

Для сплавов Fe-Ni-Co из трех метеоритов: Campo del Cielo IAB, Gebel Kamil ung и Trenton IIIAB ( $T > 90$  К) обнаружено аномальное поведение кривых намагниченности при охлаждении в нулевом поле (ZFC) и в поле (FC), когда кривые ZFC лежали выше кривых FC, что является крайне редким явлением. Мессбауэровские спектры сплавов Fe-Ni-Co из исследованных железных и железокаменных метеоритов имеют форму асимметричного секстета.

Наилучшая аппроксимация этих спектров для разных метеоритов отличается числом магнитных секстетов: от трех до девяти. Эти магнитные

секстеты были связаны с ферромагнитными  $\alpha$ -Fe (Ni, Co),  $\alpha_2$ -Fe (Ni, Co),  $\gamma$ -Fe (Ni, Co) и  $\gamma$ -FeNi (Co) фазами. Кроме того, для многих сплавов Fe-Ni-Co выявлен синглет, связанный с парамагнитной  $\gamma$ -Fe (Ni, Co) фазой.

На основании этих результатов получена диаграмма корреляции диапазонов значений магнитного сверхтонкого поля на ядре  $^{57}\text{Fe}$  ( $H_{\text{eff}}$ ) для соответствующих фаз сплава Fe-Ni-Co с диапазонами концентраций Ni для этих фаз. Эта корреляция предполагает, что диапазоны значений  $H_{\text{eff}}$  связаны с разными фазами следующим образом:  $\sim 345 - 346$  кЭ  $\leq H_{\text{eff}} \leq \sim 365$  кЭ для  $\alpha_2$ -Fe (Ni, Co) фазы ( $\sim 8 - 25$  ат.% Ni),  $\sim 327$  кЭ  $< H_{\text{eff}} \leq \sim 345 - 346$  кЭ для  $\alpha$ -Fe (Ni, Co) фазы (до 7 ат.% Ni),  $\sim 295$  кЭ  $\leq H_{\text{eff}} \leq \sim 327$  кЭ для  $\gamma$ -Fe (Ni, Co) фазы ( $\sim 26 - 48$  ат.% Ni),  $\sim 283$  кЭ  $\leq H_{\text{eff}} < \sim 295$  кЭ для  $\gamma$ -FeNi (Co) фазы ( $\sim 48 - 52$  ат.% Ni). Для парамагнитной  $\gamma$ -Fe (Ni, Co) фазы с концентрационным диапазоном  $\sim 29 - 33$  ат.% Ni (мессбауэровский спектр имеет вид синглета) значения изомерного сдвига ( $\delta$ ) находятся в приблизительном диапазоне  $-0.200 \text{ мм/с} < \delta < 0.150 \text{ мм/с}$ .

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации, проект № FEUZ-2023-0013. М.В.Г., С.П.Н. и М.И.О. признательны за поддержку по программе развития УрФУ «Приоритет 2030» (финансовая поддержка Министерства науки и образования Российской Федерации).*

## ТРАЕКТОРИЯ, ФРАГМЕНТАЦИЯ И ЭЛЛИПС РАССЕИВАНИЯ БОЛИДА НАД СМОЛЕВИЧАМИ

**Горячко Ю.А.<sup>1</sup>, Микулич А.В.<sup>1</sup>, Яротов А.Е.<sup>2</sup>, Боровичка И.<sup>3</sup>, Брозкова Р.<sup>4</sup>,  
Пастухович А.Ю.<sup>5</sup>, Яковлев Г.А.<sup>5,6</sup>, Гроховский В.И.<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> Минский планетарий, Минск, Республика Беларусь;

<sup>2</sup> “Национальный центр мониторинга озонасферы”, Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь;

<sup>3</sup> Астрономический институт Чешской академии наук, Прага, Чехия;

<sup>4</sup> Чешский гидрометеорологический институт, Прага, Чехия;

<sup>5</sup> Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия;

<sup>6</sup> Институт геологии и геохимии им. Заваруцкого, УрО РАН, Екатеринбург, Россия

25 декабря 2024 года, в 14:29:15 по всемирному времени над центральной частью Беларуси наблюдался болид, сопоставимый по яркости с Луной. Он был зафиксирован тремя специализированными камерами Белорусской метеорной сети. Метеороид вошел в атмосферу под углом 56° относительно горизонта. Видимый полёт начался над Минском и продолжился в сторону города Смолевичи. Участок выше 24 км был принят в качестве исходного и применялся для расчета орбиты (эксцентриситет  $0,382 \pm 0,014$ , большая полуось  $1,53 \pm 0,04$  а.е., расстояние до перигелия  $0,9460 \pm 0,0009$  а.е., расстояние до афелия  $2,12 \pm 0,07$  а.е., доатмосферная скорость  $13,64 \pm 0,15$  км/с, геоцентрическая скорость  $8,1 \pm 0,3$  км/с, угол наклона  $7,9 \pm 0,3^\circ$ ). Участок полета при высотах ниже 24 км был использован для построения траектории фрагмента А. Сначала траектория предполагалась линейной и была рассчитана методом наименьших квадратов [Borovička, 1990]. Впоследствии была внесена небольшая поправка, учитывающая искажение под действием силы тяжести.

История фрагментации метеорита Смолевичи не может быть определена досконально из-за отсутствия полной кривой блеска болида. Скорость и замедление были измерены только на высотах ниже 48 км. Моделирование фрагментации послужило основой для моделирования эллипса рассеивания. Темновой полет был рассчитан в соответствии с работой [Ceplecha, 1987]. Профиль ветра на большой высоте был взят из международной модели прогноза

ALADIN. Для каждого фрагмента было выполнено два расчета: один для сопротивления, соответствующего сферической форме, и один для сопротивления в 1,5 раза большего (форма параллелепипеда) [Zhdan I.A. et al., 2007].

Минский планетарий, Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озонасферы Белорусского государственного университета и Уральский федеральный университет организовали поиск осколков метеорита с привлечением волонтеров. По состоянию на 21 апреля 2025 года было найдено семь фрагментов общей массой 581,5 грамма.

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Программы развития УрФУ в соответствии с программой «Приоритет-2030».*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Borovička J. The comparison of two methods of determining meteor trajectories from photographs // Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia. 1990. V. 41. P. 391–396.
2. Ceplecha Z. Geometric, dynamic, orbital and photometric data on meteoroids from photographic fireball networks // Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia. 1987. V. 38. P. 220–234.
3. Zhdan I.A., Stulov V.P., Stulov P.V., Turchak, L.I. Drag coefficients for bodies of meteorite-like shapes // Solar System Research. 2007. V. 41. P. 505–508.

## ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ ИЗ РИСОВОЙ ШЕЛУХИ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ СИНТЕЗИРОВАННЫХ НА ЕГО ОСНОВЕ ВОЛЛАСТОНИТ И ДИОПСИД СОДЕРЖАЩИХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ

**Готлиб Е.М.<sup>1</sup>, Габдулхаев К.Р.<sup>1</sup>, Твердов И.Д.<sup>2</sup>, Ямалеева Е.С.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «КНИТУ», Казань, Россия, egotlib@yandex.ru, 19gkraikido99@mail.ru, curls888@yandex.ru

<sup>2</sup> АНО ВО «Университет Иннополис», Иннополис, Россия, idtverdov@gmail.com

Известно, что аморфный диоксид кремния (АДК) из отхода рисового производства, является перспективным сырьем [Твердов и др., 2023] для синтеза кальций магниевых силикатов (КМС). Однако, исследования влияния способа получения АДК на фазовый состав и свойства синтезированных на его основе КМС практически отсутствуют.

КМС синтезированы твердофазным методом 3 часа при 1100 °C на основе доломита (ГОСТ 23672-2020) и золы рисовой шелухи, полученной в лабораторных условиях при 500 °C (ЗРШ<sub>500</sub>), и промышленным путем (ПРШ) (ТУ 38.21.40-002-91011908-2023), с использованием как плавня 5 % борной кислоты (ГОСТ 18704-78). Рентгенографический количественный фазовый анализ проводился на многофункциональном дифрактометре «Rigaku SmartLab». Пористость образцов определялись по методу BJH (ISO 9277:2010).

ЗРШ<sub>500</sub> содержит 97% АДК, а ПРШ – является полностью аморфной, и общий объем пор ее выше в несколько раз, чем у ЗРШ<sub>500</sub> (0.08 и 0.22 см<sup>3</sup>/г, соответственно).

В фазовом составе КМС на основе ЗРШ<sub>500</sub> отсутствует волластонит, они содержат тридимит, и у них выше содержание диопсида (табл.).

Таким образом, пористость АДК влияет на взаимодействие компонентов при спекании, а, возможно, и на вязкость расплава, что изменяет фазовый состав и свойства КМС.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Твердов И.Д., Готлиб Е.М., Нцуму Р.Ш., Ямалеева Е.С. Диопсид как наполнитель эпоксидных полимеров // Южно-Сибирский научный вестник. 2023. №4. С. 11–15.

**Таблица. Фазовый состав КМС в зависимости от свойств АДК**

Состав шихты, %	Доломит – 52 ЗРШ <sub>500</sub> – 43	Доломит – 43 ЗРШ <sub>500</sub> – 52	Доломит – 52 ПРШ – 43	Доломит – 43 ПРШ – 52
Фазовый состав, %	Диопсид – 95 Кристобалит – 4 Тридимит – 1	Диопсид – 61 Кристобалит – 14 Тридимит – 24	Диопсид – 81 Кристобалит – 5 Волластонит – 14	Диопсид – 66 Кристобалит – 18 Волластонит – 15
Удельный объём пор, см <sup>3</sup> /г	0.001	0.0025	0.017	0.020

## СИНТЕЗ И ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЛОЖНЫХ ОКСИДОВ СЕРИИ $\text{Bi}_{2/3+x/3}\text{Mo}_{1-x}\text{V}_x\text{O}_4$

Грачева Н.С.<sup>1</sup>, Михайлова З.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет, 620002, г. Екатеринбург,  
Россия, [natasha.grachyova0000@yandex.ru](mailto:natasha.grachyova0000@yandex.ru)

<sup>2</sup> Институт геологии и геохимии УрО РАН, 620110, г. Екатеринбург, Россия, [zozoikina@mail.ru](mailto:zozoikina@mail.ru)

В стремительно развивающемся мире в окружающую среду выбрасывается множество вредных органических загрязнителей. Поэтому жизненно важно разработать простые и эффективные способы для их удаления. Основным преимуществом фотокатализа является возможность полной минерализации органических загрязнителей при использовании солнечного излучения в качестве дарового источника энергии. В последние времена растёт интерес к разработке новых материалов для фотокатализа. Система  $\text{Bi}_{2/3}\text{MO}_4 \leftrightarrow \text{BiVO}_4$  представляет собой интересный объект для исследования, благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам и широкому спектру потенциальных приложений в качестве ионников, пигментов, катализаторов [Dang et al., 2019].

В настоящей работе были синтезированы образцы с общей формулой  $\text{Bi}_{2/3+x/3}\text{Mo}_{1-x}\text{V}_x\text{O}_4$ , где  $\Delta x=0...1.0$  с шагом 0.2. Синтез осуществлялся методом со-осаждения при  $\text{pH}=4-5$ , в качестве прекурсоров использовались оксосоли металлов, взятые в необходимых количествах. Полученные в результате синтеза осадки были высушены при 25, 300 и 500 °C. Для определения фазового состава и параметров

элементарной ячейки образцы были исследованы методом рентгенофазового анализа (РФА) сразу после синтеза, а также после отжига при 300 и 500 °C. Результаты анализа показали, что при температуре 25 °C полученные образцы были аморфными, и их фазовый состав не удалось точно определить. После отжига при 300 °C появляется кристаллическая фаза, соответствующая целевой, но с примесями. После отжига при температуре 500 °C целевая фаза сформировалась полностью, и количество примесей стало минимальным (рис. 1).

С порошков были сняты диффузные спектры, методом Кубелки-Мунка, рассчитана ширина запрещенной зоны при прямом переходе. Показано, что в рядах 25-300-500 °C  $E_g$  уменьшается. Фотокаталитические свойства  $\text{Bi}_{2/3+x/3}\text{Mo}_{1-x}\text{V}_x\text{O}_4$  были исследованы на примере окисления метиленового синего (далее МВ), с концентрацией 10 мг/л в водном растворе. Из серии  $\text{Bi}_{2/3+x/3}\text{Mo}_{1-x}\text{V}_x\text{O}_4$  выбран  $\text{Bi}_{0.933}\text{Mo}_{0.2}\text{V}_{0.8}\text{O}_4$ , отожжённый при температуре 300 °C, он оказался наиболее эффективным, степень превращения после 6 часов составила 85.5%. Дальнейшие исследования проводились с его участием. Было оптимизировано количество загрязнителя при использовании МВ различных концентраций (5–30 мг/л), и минимизировано эффективное количество фотокатализатора (0.075...0.15 г на 100 мл раствора МВ) и установлен механизм реакций, с помощью соединений, отвечающих за поглощение радикалов.

*Работа выполнена в рамках ГБ темы ИГГ УрО РАН №124020300057-6.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Dang T.T. Trinh, Wilawan. Khanitchaidecha, Duangdao. Channei, Auppatham. Nakaruk. Synthesis, characterization and environmental applications of bismuth vanadate // J. Res. Chem. I. 2019. V. 45. P. 5217–5259.

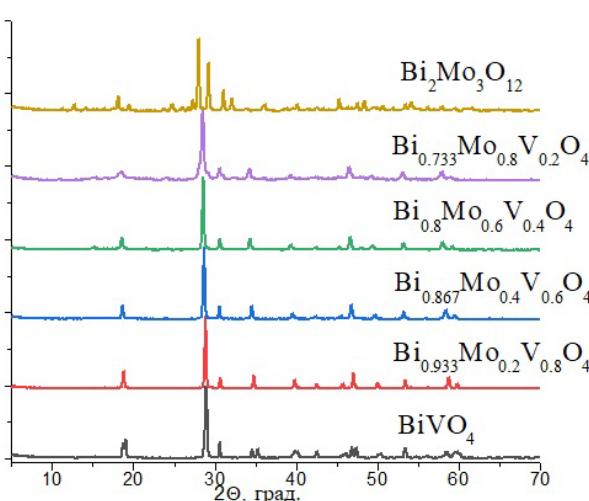


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы порошков образцов VX-500

## КРИСТАЛЛОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДВУХ ВЫСОКОКАЛЬЦИЕВЫХ ЭВДИАЛИТОВ ИЗ МАССИВА ТАМАЗЕРТ (МАРОККО) В РАМКАХ Р3-СИММЕТРИИ

Гридчина В.М.<sup>1</sup>, Расцветаева Р.К.<sup>1</sup>, Чуканов Н.В.<sup>2</sup>, Аксенов С.М.<sup>1,3</sup>

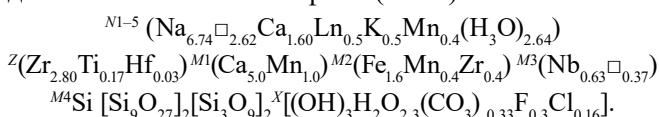
<sup>1</sup> НИЦ «Курчатовский институт», Москва, vasilisa.gridchina@gmail.com

<sup>2</sup> ФИЦ Проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка

<sup>3</sup> ФИЦ Кольский научный центр РАН, Апатиты

Симметрия сложных микропористых цирконо- и титаносиликатов зависит от характера упорядочения катионов по каркасным и внекаркасным позициям. При этом возможно уточнение кристаллических структур в рамках нескольких пространственных групп (пр. гр.) и выбор моделей с разной степенью детализации. Примером кристаллохимического разнообразия структурных моделей в рамках нескольких пр. гр. ( $R\text{-}3m$ ,  $R\bar{3}m$  и  $R\bar{3}$ ) является широко распространенные минералы агпайтовых нефелиновых сиенитов группы эвдиалита. В высококальциевых представителях из карбонатитов Ковдорского массива (фекличевит, голышевит и моговидит) с содержанием  $\text{CaO} > 15$  мас. % и отношение  $\text{Ca/Zr} > 3$ , атомы Ca не только полностью заселяют октаэдры шестичленного кольца, но и преобладают в одной или двух внекаркасных позициях [Расцветаева и др., 2012].

Нами изучены еще два высококальциевые представители группы из массива Тамазерт (Марокко) [Расцветаева и др., 2025а, б], которые являются фрагментами одного монокристалла, характеризуются близкими составами, но отличаются разным распределением катионов по позициям. Такая зональность для эвдиалитов не редкость, и связана с флуктуациями условий кристаллизации в процессе роста кристалла. Химический состав определен микрозондовым методом, а кристаллические структуры изучены с помощью рентгеноструктурного анализа. Параметры ячеек обеих фаз близки:  $a = 14.1863$  (1) и  $14.1530$  (1);  $c = 30.0703$  (2) и  $30.0801$  (2) Å;  $V = 5240.95$  (4) и  $5218.1$  (5) Å<sup>3</sup>. Кристаллические структуры, уточненные в рамках пр. гр.  $R\bar{3}m$ , содержат смешанно-заселенные позиции, как, например, для «низкониобиевой» фазы ( $Z = 3$ ):



Понижение симметрии с переходом к примитивной  $P$ -решетке (пр. гр.  $P\bar{3}$ ) позволило установить детали

упорядочения всех катионов в индивидуальных позициях структуры обеих фаз вокруг кристаллографически независимых осей третьего порядка. Структурные модели, содержащие 161 и 163 позиций, были уточнены до итоговых  $R = 4.4$  ( $8202 F > 3\sigma(F)$ ) и  $5.48$  ( $4644 F > 3\sigma(F)$ ), соответственно.

Особенностью обоих высококальциевых эвдиалитов является однотипность двух шестичленных колец из атомов Ca и присутствие Mn в октаэдре третьего кольца с той лишь разницей, что кольца онейллитового типа [Ca-Mn] в обоих фрагментах приурочены к разным осям третьего порядка. Перераспределение позиций касается также ряда внекаркасных катионов и, в первую очередь, – La, K и избыточного Ca, не вошедшего в октаэдры шестичленных колец.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Расцветаева Р.К., Чуканов Н.В., Аксенов С.М. Минералы группы эвдиалита: кристаллохимия, свойства, генезис. Нижний Новгород: Изд-во НГУ. 2012. 230 с.
2. Расцветаева Р.К., Гридчина В.М., Чуканов Н.В., Аксенов С.М. Диссимметризация в минералах группы эвдиалита. V. Кристаллическая структура потенциально нового минерала из пегматитов Марокко – первого высококальциевого представителя с Р3-симметрией // Кристаллография. 2025. Т. 70. (в печати).
3. Расцветаева Р.К., Гридчина В.М., Чуканов Н.В., Аксенов С.М. Диссимметризация в минералах группы эвдиалита. VI. Особенности Р3-модели аналога высококальциевого эвдиалита из массива Тамазерт (Марокко) // Вестник геонаук. 2025. (в печати).

## МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ДИФРАКЦИИ ОТРАЖЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ МИКРОДЕФОРМАЦИЙ В ЗЕРНАХ ЦИРКОНА ИЗ МЕТЕОРИТНЫХ КРАТЕРОВ

Давлетшина А.А., Замятин Д.А., Чебыкин Н.С.

*Институт геологии и геохимии им. ак. А.Н.Заваруцкого УрО РАН,  
Екатеринбург, Россия, alina.davl@yandex.ru*

В результате удара в метеоритных кратерах реализуются экстремальные динамичные условия (Р до 1500 ГПа, Т до 10000 °C). Циркон отличается высокой стойкостью к внешним давлениям вплоть до 80 ГПа, при которых происходит практически полное плавление пород мишени. Деформационные микроструктуры и внутреннее строение циркона являются РТ-индикаторами, выявление которых требует тщательного стадийного исследования срезов пород [Давлетшина и др, 2025]. Цель работы – оптимизация и апробация методики выявления и исследования микродеформаций зерен циркона из пород метеоритных кратеров методом дифракции отраженных электронов (EBSD) на сканирующем электронном микроскопе (SEM) Tescan Mira с детектором EBSD Oxford Nordlys Nano.

**Объекты и методы исследования.** Плоско-шлифованные шлифы изготовлены из образцов фрагментов импактного расплава кратеров Карский, Усть-Карский ( хр. Пай-Хой, Урал) и Вредефорт (ЮАР). BSE-, CL-изображения и EBSD-карты получены SEM Tescan MIRA LMS с детектором Oxford EBSD Nordlys Nano.

**Результаты.** Отработана методика пробоподготовки шлифов, рассмотрены методы обработки

EBSD-данных, позволяющих повысить качество индексирования дифракционных изображений Кикучи. Повышена эффективность обнаружения и анализа ударно-преобразованных зерен циркона с использованием SEM, оптимизированы условия регистрации электронных изображений и EBSD-карт; разработан алгоритм поиска минералов в шлифах. Методика апробирована на серии из 50 шлифов, обнаружено 436 циркона, среди которых выявлены все известные типы микродеформаций зерен циркона.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИГГ УрО РАН, темы № 123011800012–9 и № 124020300057–6 с использованием оборудования ЦКП «Геоанализик» ИГГ УрО РАН*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Давлетшина А.А., Чебыкин Н.С., Замятин Д. А. Дифракция отраженных электронов в исследовании микродеформаций в зернах циркона из метеоритных кратеров: методические аспекты // Литосфера. 2025, Т. 25, № 2, С. 309–319.

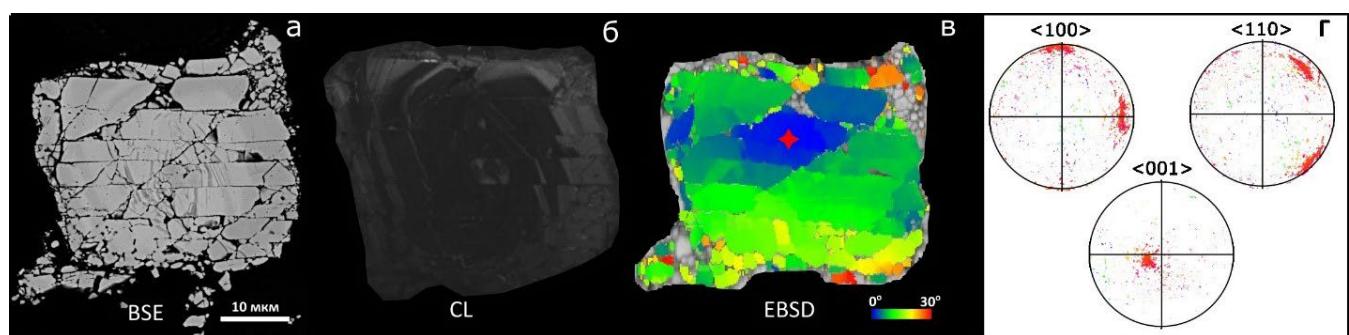


Рис. 1. Циркон импактитов кратера Вредефорт. а – BSE-изображение; б – CL-изображение; в – карта отклонения ориентации относительно точки (красная звездочка); г – полюсные фигуры, показывающие ориентации осей зерна циркона  $<100>$ ,  $<001>$ ,  $<110>$ , цветовая кодировка обратной полюсной фигуры.

## ЗОЛОТОНОСНЫЕ АЛЬБИТ-ХЛОРИТОВЫЕ МЕТАСОМАТИТЫ ЧАРМИТАНСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ

**Джуманиязов Д.И., Каримова Ф.Б.**

*Институт Геологии и геофизики им.Х.М.Абдуллаева, Ташкент, Узбекистан, denisbey@list.ru*

Формационная принадлежность альбит-хлоритовых изменений на Чармитанском рудном поле не указана, так как в то время многие авторы выделяли типы метасоматитов по главным метасоматическим породообразующим минералам. Позднее выделив калишпат-плагиоклазовые метасоматиты утверждали, что альбитизированные и калишпатизированные околоврудные изменения имеют тесную временную и генетическую близость. Далее они указали, что калишпатизация развивается несколько позже и значительно интенсивнее альбитизации. Альбит-хлоритовые изменения [Хамрабаев, 1978], связывали недостаточной интенсивностью процесса калишпатизации следующей за альбитизацией.

Указание на то, что околовильные альбитизированные и калишпатизированные метасоматиты распространяются до глубины 250 м, нам кажется дискуссионным. Препятствий на распространение таких метасоматитов не имеется. Указание на то, что между внешней (хлоритовой) и внутренней (существенно калишпатовой) зонами развивается промежуточная зона, где сосуществуют карбонат, серицит с нечеткими границами недостаточно обоснована. В одной только промежуточной зоне калишпат и серицит существовать не могут, они оба калиевые минералы, поэтому в соответствии с теорией метасоматической зональности устойчивым должен быть один из них. Понятно, что альбит-хлоритовые метасоматиты принадлежат к эйситам, калишпат-карбонат кварцевые метасоматиты к гумбеитам, а кварц-серицит-карбонатовые метасоматиты к березитам. В случае преобладания хлорита над серицитом к лиственитам.

Мы думаем, что такие метасоматиты могут существовать во внутренних фациях лиственитов в ситуации аналогичной образованию серицитоли-

тов во внутренних фациях березитов. Это явление детально рассмотрено на примере Кочбулакского месторождения Восточного Узбекистана. Такие метасоматиты [Русинов, 1989] образуются в виде скоплений различных размеров, среди кварц-серицитовой фации березитов непосредственно прилегающей к рудоносным жилам за счет избыточных перемещенных компонентов, а в случае хлоритолитов Чармитанского месторождения за счет  $Fe_2O_3$  в составе образующихся хлоритов, представленных тюригитами и шамозитами.

Определение интенсивности метасоматических новообразований, их формационной принадлежности влияет на перспективную оценку месторождения, поэтому их изучение является одной из главных задач при оценке месторождения.

*Работа выполнена при поддержке Министерство высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан проект №ПЗ-20170929154.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Русинова О.В., Русинов В.Л., Тронева Н.В. Состав, некоторые особенности структуры и условия образования околоврудных и рудных хлоритов и бертьеринов // Метасоматизм, минералогия и вопросы генезиса золотых и серебряных месторождений. М.: Наука, 1986. С. 5–40.
2. Хамрабаев И.Х., Чеботарев Г.М., Мансуров М.М., Тилляев Х.С., Даутов А.И., Хренов В.А. Некоторые геолого-минералогические особенности золоторудного месторождения Чармитан в Западном Узбекистане // Узбекский геологический журнал, 1971. № 3. С. 3–7.

## МИНЕРАЛОГИЯ НОВОГО ХОНДРИТА SMALYAVICHY (H6), БЕЛАРУСЬ

**Дугушкина К.А.<sup>1,2</sup>, Шарыгин В.В.<sup>2,3</sup>, Яковлев Г.А.<sup>1,2</sup>, Пастухович А.Ю.<sup>2</sup>,  
Гроховский В.И.<sup>2</sup>, Берзин С.В.<sup>1,2</sup>, Мандрыгина Д.А.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия, dugushkina@igg.uran.ru

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

<sup>3</sup> Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

25 декабря 2024 года в 40 км в северо-восточном направлении от г. Минска, Республика Беларусь, три видеокамеры метеорной сети в 17 часов 29 минут по местному времени зафиксировали болид. К концу траектории было видно не менее 15 отдельных фрагментов. Совместными усилиями Минского планетария, Белорусского государственного и Уральского федерального университетов была организована кампания по поиску вещества. Общая масса найденных фрагментов метеорита Smalyavichy на 01.04.2025 составляет 581.5 г. Образцы имеют угловатую и грубо окружную форму, поверхность полностью покрыта темной корой плавления, а внутренняя часть имеет светло-серый цвет. Метеорит классифицирован как обыкновенный хондрит H6S2W0 и утвержден 17 марта 2025 года в метеоритном обществе (Meteoritical Bulletin Database).

Метеорит содержит средне- и крупнозернистую перекристаллизованную матрицу и редкие хондры (POP, BO, RP) имеют слабо выраженные границы, размер варьирует от 20 мкм до 2 мм. Матрица состоит из оливина ( $\text{Fa}_{19.4 \pm 0.5}$ , N=76), ортопироксена ( $\text{Fs}_{16.9 \pm 0.6}$   $\text{En}_{80.8 \pm 0.6}$   $\text{Wo}_{1.5 \pm 0.3}$ , N=53), клинопироксена ( $\text{En}_{45.9 \pm 1.0}$   $\text{Fs}_{6.4 \pm 0.3}$   $\text{Wo}_{47.7 \pm 0.7}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ -0.4-0.8 wt.%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -0.8-0.9 wt.%, N=5), плагиоклаза ( $\text{An}_{13.8 \pm 0.8}$   $\text{Ab}_{80.3 \pm 1.2}$   $\text{Or}_{5.9 \pm 0.9}$ , N=33), троилита, Fe-Ni металлов, хромита ( $\text{Crt}_{81.6 \pm 0.6}$   $\text{Spl}_{15.1 \pm 0.5}$ , N=13), меррилита и апатита. Мерриллит обеднен FeO (0.3-0.8 мас.%, N=14). Апатит содержит как Cl (1.8-2.0 мас.%), так и F (2.4-2.5 мас.%). Fe-Ni металлы (до 1 мм) обычно ассоциируют с троилитом и представлены камаситом, тэнитом и тетратэнитом. Чаще всего встречаются зерна камасита, реже – ассоциации камасит–тэнит и камасит – тэнит – тетратэнит. Состав металлов (в мас.%): камасит (N=33) Fe 93.7 ± 0.5, Co 0.5 ± 0.05, Ni 5.8 ± 0.6 (в ассоциации с троилитом, тэнитом

и тетратэнитом обеднен Ni – 2.8-3.7); тэнит (N=23) – Fe 71.6±5.6, Co 0.3±0.1; Ni 27.9±5.7; тетратэнит (N=18) – Fe 48.1±2.4, Co 0.2±0.1, Ni 52.0±2.2. В матрице встречаются хромит-плагиоклазовые скопления размером 10-100 мкм, состоящие из округлых и изометрических зерен хромита (0.5-50 мкм), окруженных плагиоклазом. В оливине наблюдаются трещины в двух направлениях. Окисление металла и сульфидов не наблюдается или минимальное. Толщина коры плавления составляет до 100 мкм. Она состоит из двух зон: внутренней – среднезернистой (новообразованный оливин + девитрифицированное стекло:  $\text{SiO}_2$  – 35.2-35.4,  $\text{TiO}_2$  – 0.2,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 2.2-2.3,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  – 0.2-0.3, FeO – 35.8-36.3, MnO – 0.2-0.3, MgO – 21.0-21.2, NiO – 1.5-1.6, CaO – 1.8-1.9,  $\text{Na}_2\text{O}$  – 0.8-1.0,  $\text{K}_2\text{O}$  – 0.1,  $\text{P}_2\text{O}_5$  – 0.2-0.3,  $\text{SO}_3$  – 0.3-0.7 мас.%) и внешней – мелкозернистой со скелетными новообразованными магнетитом и оливином. В обеих зонах присутствуют реликты первичного хромита и оливина, а также металл-сульфидные глобулы (5-10 мкм). В глобулах из внешней зоны присутствуют хизлевудитовый твердый раствор (Hzss-1,  $\text{Ni}_3\text{S}_2$ : Fe – 3.3-3.4, Ni – 72.3-73.2, Co – <0.05, S – 24.2-24.5 мас.%), никель, пентландит, а в глобулах из внутренней зоны – мартенсит (Fe – 82.1-23.6, Ni – 14.8-16.2, Co – 0.6-0.9 мас.%), тэнит/тетратэнит и троилит. Во внешней зоне также обнаружена ассоциация пентландит + магнетит. Индивидуальные зерна магнетита содержат NiO (0.7-1.6 мас.%), CoO (до 0.4 мас.%) и MgO (до 1.0 мас.%).

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Программы развития УрФУ в соответствии с программой «Приоритет-2030» и государственного задания ИГМ СО РАН (FWZN-2022-0035, № 122041400312).*

## ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА КСЕНОКРИСТАЛЛОВ КЛИНОПИРОКСЕНА ИЗ РАЗНОВОЗРАСТНЫХ КИМБЕРЛИТОВ ЯКУТСКОЙ АЛМАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ

Дымшиц А.М.<sup>1</sup>, Олейников О.Б.<sup>2</sup>, Ощепкова М.Г.<sup>2</sup>, Земнухов А.Л.<sup>3</sup>, Опарин Н.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия

<sup>3</sup> АО «Алмазы Анабара», Якутск, Россия

В данной работе была изучена представительная выборка ксенокристаллов клинопироксена, отобранных из концентрата тяжелой фракции кимберлитов трубки Ивушка (Толуопское кимберлитовое поле) и аномалии 75/90 (Молодинское кимберлитовое поле), расположенных в пределах Биректинского террейна (северо-восточная часть Сибирского кратона). Для всех изученных зерен на основе их химического состава были рассчитаны давления и температуры, с использованием мономинеральной термобарометрии.

Благодаря полученным данным были рассчитаны мантийные палеогеотермы. Реконструкции термального состояния литосферной мантии показали, что на момент палеозойского кимберлитового магматизма (Толуопское поле) термальная граница литосферы с астеносферой была близка к таковой в районе южных кимберлитовых полей и составляла около 230 км. Предварительные оценки для Аномалии 75/90 указывают на то, что в мезозойское время, литосферная

мантия в этом регионе уже, вероятно, была тоньше, подверглась значительным преобразованиям, а выносимые кимберлитовой магмой ксенокристаллы, представляют собой обломки пород с несколькими генерациями клинопироксенов. Несмотря на то, что в девонское время мощности литосферы северных и южных полей оказываются достаточно близкими по значению, кимберлитовые магмы трубок южных полей, захватывали больший диапазон потенциально алмазоносных пород (глубины от 130 до 230 км) при подъеме, относительно трубок северных полей (глубины до 170 км). Данные результаты могут косвенно объяснять существенную разницу алмазоносности девонских кимберлитов южных полей, расположенных на архейских террейнах и северных полей, относящихся уже к протерозойским блокам.

Выполнено при поддержке базового задания  
ИГАБМ СО РАН FUFG-2024-0007.

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА МИКРОСТРУКТУРУ ТРОИЛITA ИЗ ОБЫКНОВЕННОГО ХОНДРИТА CALAMA 022 ПО ДАННЫМ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДИФРАКТОМЕТРИИ

Дюндик С.С.<sup>1</sup>, Айрузов А.Р.<sup>1</sup>, Максимова Е.М.<sup>1</sup>, Петрова Е.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь, Россия,

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия  
*dyundik.s@cfuv.ru, maksimovaem@cfuv.ru*

Троилит,  $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ), кристаллизуется в гексагональной системе с пространственной группой  $P2c$ . При нагревании троилит претерпевает два фазовых структурных перехода:  $\alpha$  и  $\beta$ .  $\alpha$  – переход происходит при температуре  $\sim 140^\circ\text{C}$  и связан с вращением магнитного момента от перпендикулярного положения к параллельному относительно кристаллографической оси « $c$ ».  $\beta$ -переход возникает при температуре  $\sim 315^\circ\text{C}$  и связан с переходом от антиферромагнитного состояния к парамагнитному [Ricci, 2016].

В настоящей работе методом высокотемпературной рентгеновской дифрактометрии исследовалось влияние температуры на параметры тонкой структуры троилита (микродеформаций  $\varepsilon = \Delta d/d$  и областей когерентного рассеяния (ОКР)) в интервале температур от 50 до  $350^\circ\text{C}$ , полученного методом магнитной сепарации из порошка фрагмента метеорита Calama 022 (L6, S1, W1). Исследования проводились на дифрактометре Bruker D8 Advance в Co K $\alpha$  излуче-

нии. Параметры микроструктуры определялись по главному пику троилита (114), ОКР рассчитывались по формуле Селякова-Шеррева, микродеформации – Уилсона-Стокса. В результате была построена зависимость изменения параметров микроструктуры от температуры нагрева образца (рис. 1).

Установлено, что в интервале температур от 50 до 300 наблюдается уменьшение размеров ОКР и увеличение величины микродеформации. При температуре выше  $300^\circ\text{C}$  наблюдается возрастание величины ОКР и уменьшение величины микродеформаций, что свидетельствует о переходе структуры троилита в районе точки второго фазового перехода к более совершенной структуре типа никелина (NiAs), с группой симметрии  $P6_3/mmc$ . Наблюданное изменение размеров областей когерентного рассеяния совпадает с характером изменения параметра « $c$ » кристаллической структуры троилита от температуры [Tenailleau, 2005].

*Вклад в работу Петровой Е.В. поддержан Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, проект FEUZ-2023-0014.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ricci F., Bousquet E. Unveiling the Room-Temperature Magnetoelectricity of Troilite FeS // Physical Review Letters. 2016. V. 116. P. 227601.
2. Tenailleau, C., Etschmann, B., Wang, H., Pring, A., Grguric, B.A., Studer, A. Thermal expansion of troilite and pyrrhotite determined by *in situ* cooling (873 to 373 K) neutron powder diffraction measurements // Min. Mag. 2005. V. 69 (2). P. 205–216/

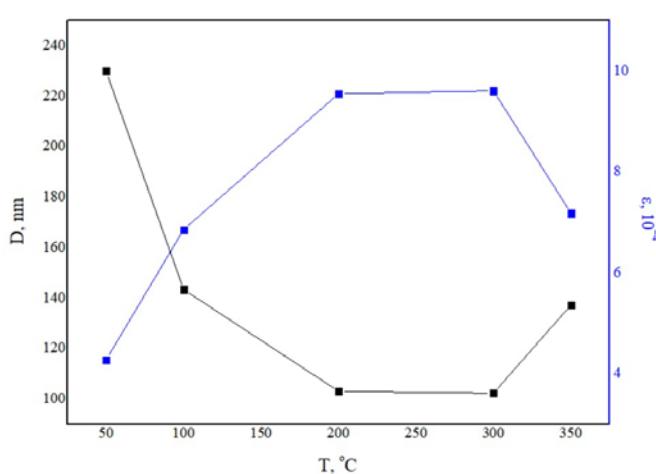


Рис. 1. Температурная зависимость изменения микроструктуры (D – размер ОКР,  $\varepsilon$  – микронапряжение) по главному пику (114) троилита из метеорита Calama 022

## ЧАСТОТНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ГРУПП СИММЕТРИИ В СТРУКТУРНОЙ МИНЕРАЛОГИИ. НОВЫЕ ДАННЫЕ.

**Еремин Н.Н.<sup>1,2</sup>, Еремина Т.А.<sup>1</sup>, Гурбанова О.А.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> МГУ им. М.В.Ломоносова, Геологический ф-т, Москва, Россия, neremin@mail.ru

<sup>2</sup> ИГЕМ РАН, Москва, Россия

*Математика — это язык,  
на котором написана книга природы.*

Г. Галилей

Опираясь на актуальную базу данных минеральных видов, был проведен подробный статистический анализ распределения кристаллических структур минералов по сингониям, классам симметрии и пространственным группам. Для проведения анализа была использована выборка 21.02.2025 года, содержащая 6006 минералов, одобренных и утвержденных номенклатурной комиссией международной минералогической ассоциации.

Существенно выросший за два десятилетия банк данных структурных регистраций не оказал принципиального влияния на вклады каждой из шести сингоний в общее число минеральных видов. Тем не менее, по сравнению с выборками начала XXI века [Николаев, 2000; Урусов, 2002] произошли определенные изменения рангов: в частности, триклинная сингония сменила низший 6-й ранг на 4-й, обогнав и кубическую и тетрагональную сингонию. Также отметим увеличившийся разрыв между моноклинной (ранг 1) и ромбической (ранг 2) сингонией. В целом, три сингонии улучшили свою долю в общей выборке относительно более ранних данных (триклинная, моноклинная и гексагональная), тогда как три оставшиеся заметно потеряли в относительной распространенности.

Анализ показал, что из 32 классов симметрии распространенных оказалось всего семь, среди которых пять голоэдрических (плюс голоэдрический класс тригональной подсингонии). Голоэдрический класс 6/mmm гексагональной подсингонии не попал в число распространенных, что демонстрирует близкую родственность групп с осями третьего и шестого порядков и обоснованность выделения шести, а не семи сингоний при анализе кристаллических структур. Стоит также отметить огромную распространенность моноклинного класса 2/m (30,7% всех минеральных видов).

Из 219 пространственных групп симметрии (при анализе энантиоморфные группы объединялись) абсолютно пустыми оказались 34, что заметно меньше, чем в 1966 г. (112) [Поваренных, 1966] и 2006 году – 54 [Урусов, Надежина, 2006]. Во всех энантиоморфных парах распространенность групп с меньшим порядковым номером намного выше, что подтверждает тезис о существенной роли человеческого фактора в структурных определениях в случае энантиоморфных групп. Заметим, что все «пустые» для структурной минералогии группы в настоящее время заселены неорганическими соединениями (тогда как в 2006 году отмечалось четыре абсолютно пустые в неорганической кристаллохимии группы) [Урусов, Надежина, 2006]. Это позволяет сделать вывод о полной заселенности неорганическими кристаллами пространственных групп симметрии согласно новым данным.

*Работа выполнена в рамках государственного задания МГУ и ИГЕМ РАН.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Николаев С.М. Статистика современной минералогической информации. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000, 95 с.
2. Поваренных А. С. О закономерностях в распределении минеральных видов по сингониям, классам симметрии и пространственным группам // Минерал. Сб. Львовского гос. Ун-та, 1966, Т. 20 (3). С. 341–351.
3. Урусов В.С. Принцип минимума структурной диссиметризации и его нарушение редкими новыми минералами // Доклады РАН, 2002, Т. 386 (3). С. 379–383.
4. Урусов В.С., Надежина Т.Н. Пустые и редкие пространственные группы в структурной минералогии // Вестник МГУ, Сер. 4. Геология. 2006. Т. 5. С. 52–59.

## ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ УСАДКИ КЕРАМИКИ NiO-YSZ

Ермаков Е.А.<sup>1</sup>, Соловьев А.В.<sup>1</sup>, Марков В.Ф.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> УрФУ им. Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, evgenermak27alfa@mail.ru

<sup>2</sup> Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России, Екатеринбург, Россия

Керамика на основе NiO-YSZ получается путем спекания порошков при высокой температуре. Аналогичные процессы происходят в природе при формировании метаморфических горных пород, когда минералы перекристаллизуются под воздействием высоких температур и давления. Термодинамические процессы, контролирующие спекание и перекристаллизацию в геологических условиях, схожи с теми, что протекают при разных режимах спекания керамики. В данной работе была исследована усадка образцов керамики на основе NiO-YSZ после спекания.

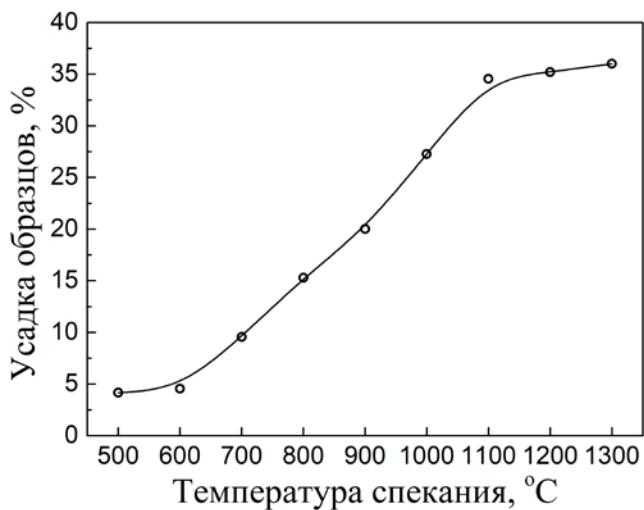


Рис. 1. Зависимость усадки образцов от температуры обжига

В настоящей работе образцы кермета NiO-YSZ (объемное соотношение NiO : YSZ : крахмал = 50 : 33 : 17 об.%) были получены методом совместной прокатки, толщина составляла 0,4–0,87 мм.

Термическая обработка проводилась в печи модели SNOL 8,7/1300 на корундовой подставке в ряде температур 500–1300°C с шагом в 100°C. Параметры спекания: скорость нагрева  $v=9^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ , время выдержки  $\tau=300$  мин. Для избежания вертикальной деформации образцов из-за разностей коэффициентов теплового линейного расширения материалов керамики и подставки, последняя посыпалась сферическим порошком YSZ с размером частиц 80 мкм.

На рисунке представлена зависимость усадки образцов после спекания относительно их исходных размеров от установленной температуры, отражающая комплекс процессов, происходящих в материале при обжиге (рис. 1). Можно предположить, что установленная форма кривой усадки свидетельствует об интенсивности процессов удаления химически связанный воды и органических веществ, о фазовом переходе диоксида циркония в кубическую фазу и выделении металлического никеля. Полученные результаты могут найти практическое применение для контроля и оптимизации процессов обжига и получения керамики с заданными характеристиками.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МЕЛКИХ МЕТЕОРНЫХ ТЕЛ ПО НАБЛЮДАТЕЛЬНЫМ ДАННЫМ

Ефремов В.В.<sup>1</sup>, Попова О.П.<sup>1</sup>, Карташова А.П.<sup>2</sup>, Глазачев Д.О.<sup>1</sup>, Бушманова А.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт динамики геосфер им. М.А. Садовского РАН, Москва, Россия efremov.vv@phystech.edu

<sup>2</sup> Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Основным способом получения информации о характеристиках мелких метеорных тел (размером меньше 1 см) является изучение их взаимодействия с атмосферой. Изучение метеорных явлений с использованием наблюдательных данных ведется несколько столетий, но задача по точному определению их параметров, в частности массы, плотности и других свойств, остается по-прежнему актуальной. Масса часто оценивается на основе эмпирических соотношений, использующих максимальную яркость метеора, скорость и угол входа. Разброс оценок параметров может превышать порядок величины. Кроме того, для определения параметров метеорных тел по данным наблюдений используются различные модели абляции.

В нашей работе оценка параметров метеорных тел потока Персеиды (массы, плотности и другие характеристики) проводилась с помощью двух основных моделей абляции. В первой модели предполагалось, что энергия потока расходуется на нагрев, переизлу-

жение и потерю массы метеороида. В другой модели энергия потока расходуется только на потерю массы.

В работе были использованы базисные оптические наблюдения потока Персеид 2016 г. Поскольку в исследованиях использовалась модель, описывающая процесс абляции небольших метеорных тел, были выбраны метеоры слабее -2m.

В результате были получены оценки исследуемых частиц: массы, размера и плотности. Проанализировано влияние используемых моделей на определение данных параметров метеороидов. Проведен анализ сходства и различия полученных параметров метеороидов, рассматриваются возможные причины их поведения.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (ИДГ РАН – тема № 125012200624-5; ИНАСАН – № 124021000007-1).*

## МНОГОКОМПОНЕНТНЫЕ РЗЭ- И ИТТРИЙ-ЖЕЛЕЗИСТЫЕ ГРАНАТЫ: ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, РАМАНОВСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

Желуницын И.А.<sup>1</sup>, Панкрушина Е.А.<sup>1</sup>, Рогинский Е.М.<sup>2</sup>, Вотяков С.Л.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заваруцкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия,

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

Иттрий-железистый гранат  $Y_3Fe_5O_{12}$  (YIG) и его редкоземельные аналоги состава  $Ln_3Fe_5O_{12}$  (LnIG) – широко используемые магнитные материалы; анализ их физико-химических характеристик и функциональных свойств посвящено большое число публикаций, в том числе и в последние годы (см. например [Zhelunitsyn et al., 2024]). Предпринимаются попытки модифицировать их функциональные характеристики с помощью многокомпонентного замещения Y [Liu et al., 2023].

В настоящей работе представлены результаты комплексного экспериментального и вычислительного исследования рамановских спектров и динамических свойств одно- и многокомпонентных гранатов YIG, LnIG ( $Ln=Eu, Gd, Dy, Er$ ),  $(Y_{0.2}Gd_{0.2}Er_{0.2}Eu_{0.2})_2Dy_{0.2}$ ) IG (YLnIG), синтезированных методом глицин-натратного пиролиза. Представлены результаты расчетов динамики решетки в рамках теории функционала плотности, с помощью которых удалось выполнить отнесение спектральных линий колебательным состояниям в центре зоны Бриллюэна.

По данным теоретико-группового анализа показано, что в раман-активных колебаниях задействованы все атомы, кроме Fe в октаэдрическом окружении (VIFe в позиции Уайкофа 24d). Наиболее интенсивные рамановские линии ассоциируются с фононами, связанными со смещениями атомов в тетраэдрах FeO<sub>4</sub>. Измерения спектров, проведенные в диапазоне температур и давлений 83–773 К и 0–13 ГПа для YIG и YLnIG, выявили структурную стабильность этих гранатов. Подробный анализ динамики решетки гранатов YIG и YLnIG показал, что природа иона

Ln/Y не оказывает существенного влияния на общую ангармоничность системы.

Это наблюдение было подтверждено результатами дилатометрии, показывающими близкие ( $11.07 \cdot 10^{-6}$  и  $10.20 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) значения коэффициентов теплового расширения для гранатов YLnIG и YIG соответственно. Примечательно, что трехфоненная ангармоническая связь играла доминирующую роль в поведении ангармонизма. Вклад объемного расширения в общий ангармонизм ( $\eta$ ) для гранатов YLnIG и YIG был определен как  $\eta \sim 0.3$ . Это значение типично для тетраэдрически координированных полупроводников с низкой ионностью связи, что согласуется со степенью электроотрицательности связи Fe-O.

*Работа выполнена в рамках государственного задания №123011800012-9 (ИГГ УрО РАН).*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Liu H., Bao A., Zhang J., Gu Y., Zhang X., Qi, X. Dielectric properties of  $(Y_{0.2}Eu_{0.2}Er_{0.2}Dy_{0.2})_2Lu_{0.2}$  3 (Al<sub>x</sub>Fe<sub>1-x</sub>)<sub>5</sub>O<sub>12</sub> high-entropy garnet ceramics // Ceramics International. 2023. V. 49. No 5. P. 7208–7213.
2. Zhelunitsyn I.A., Votyakov S.L., Mikhaylovskaya Z.A., Pankrushina E. A. Synthesis, properties, and ionic conductivity of ceramic solid electrolyte-multicomponent garnet  $(Y, Ln)_3Fe_5O_{12}$  ( $Ln=Gd, Er, Eu, Dy$ ) // Ionics. 2024. V. 30. No. 7. P. 3895–3913.

## ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРАНАТОВ АЛЬМАНДИНА, ДЕМАНТОИДА И АНДРАДИТА ПО ДАННЫМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ИМПЕДАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ: МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Желуницын И.А., Михайлова З.А., Вотяков С.Л.

*Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заваруцкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия, zhelunitsyn@igg.uran.ru*

Электрические свойства минералов, пород и руд – объект исследования в области физики Земли, имеющее как фундаментальное, так и прикладное значение, в частности, при электrorазведке месторождений, при зондировании литосферы и мантии и др. [Naif et al., 2021; Yoshino, 2019]. В настоящей работе на примере демантоида из клинопироксенитов (Полдневское месторождение, Урал), андродитов из скарнов (Верхний Уфалей, Урал; Соколовский рудник, Казахстан) и альмандин из Верхоловской гранатовой копи (Урал) проанализированы методические вопросы использования высокотемпературной импедансной спектроскопии для изучения термических характеристик минералов в режиме их нагрева–охлаждения при температурах 200–900 °C и частотах 1–10<sup>6</sup> Гц с электродами из Pt и La<sub>0.5</sub>Sr<sub>0.5</sub>CoO<sub>3</sub> (рис. 1).

Для обработки спектров импеданса использован метод эквивалентных схем. Результаты интерпретированы в сопоставлении с термогравиметрическими и рентгеноструктурными данными, а также данными диффузионного светорассеяния минералов. Впервые получены электрические характеристики демантоида. Показано, что химический и фазовый состав

андрадитов оказывает значимое влияние на их электропроводимость. Для альмандина установлено, что на температурной зависимости электропроводности фиксируется аномалия при 750 °C, обусловленная началом разложения образца; о последнем ранее не сообщалось. Влияние начальных стадий фазовых превращений на электропроводность открывает перспективы использования методики импедансной спектроскопии для анализа данного явления.

*Работа выполнена в рамках государственного задания № 123011800012-9 и № 124020300057-6 (ИГГ УрО РАН).*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Naif S., Selway K., Murphy B.S., Egbert G., Pommier A. Electrical conductivity of the lithosphere–asthenosphere system // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2021. V. 313. P. 106661.
2. Yoshino T. Electrical properties of rocks // In: Encyclopedia of Solid Earth Geophysics. Cham: Springer, 2019. P. 1–7.

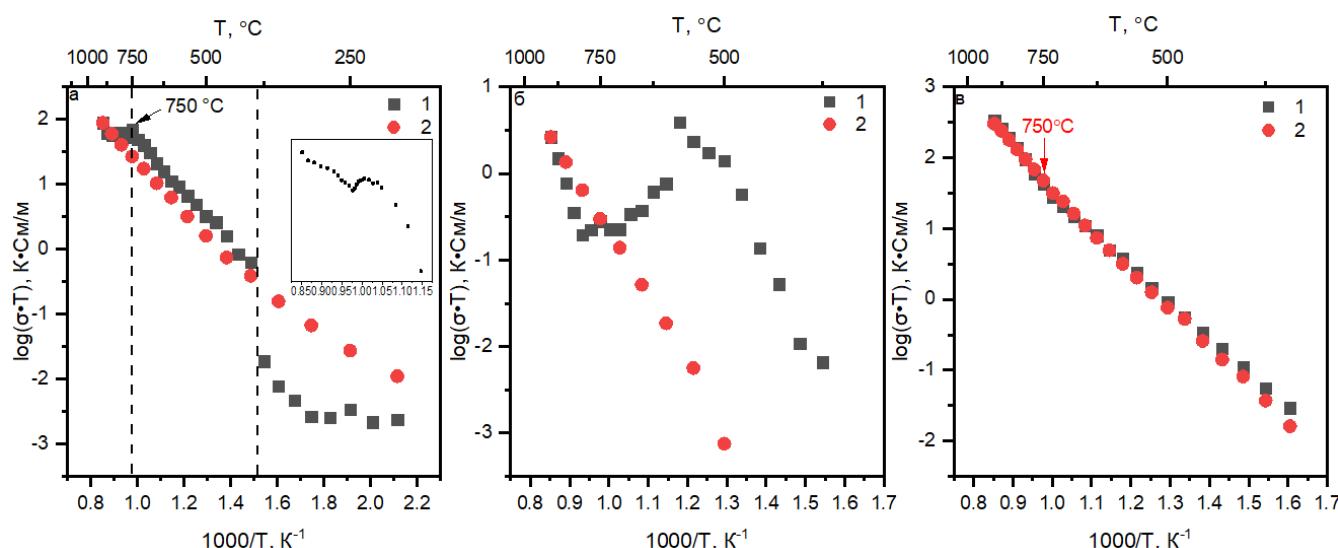


Рис. 1. Аррениусовские зависимости электропроводности альмандина (а), андродита (б) и демантоида (в) в режиме нагрева (1) и охлаждения (2) с электродами из La<sub>0.5</sub>Sr<sub>0.5</sub>CoO<sub>3</sub>. Врезка – область температур 680–900 °C с «шагом» 5–10 °C.

## К ВОПРОСУ ОБ ИОННОЙ ПРОВОДИМОСТИ НЕОДИМОВЫХ ТИТАН-НИОБАТОВ, ДОПИРОВАННЫХ КАЛЬЦИЕМ $Nd_{1-x}Ca_xTi_{1-x}Nb_{1+x}O_6$

Желуницын И.А., Михайловская З.А., Вотяков С.Л.

*Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург,  
Россия, zhelunitsyn@igg.uran.ru*

В СВЧ-устройствах в качестве микроволновых диэлектрических резонаторов с постоянными и малыми потерями используются керамические материалы с температурно-независимыми диэлектрическими характеристиками [Sebastian, 2001]. В их число входят и керамики из семейства  $LnTiNbO_6$  ( $Ln = La \dots Eu$ ) со структурой эшинита [Hirano et al., 2016].

Настоящая работа посвящена анализу возможностей новых замещений в данном семействе и исследованию проводящих свойств соответствующих новых составов. Впервые получены по керамической технологии твердые растворы с формулой  $Nd_{1-x}Ca_xTi_{1-x}Nb_{1+x}O_6$  ( $x=0 \dots 0.2$ ); изучены их свойства методами рентгеновской дифракции, рамановской и импедансной спектроскопии, СЭМ, РФА и спектроскопии оптического диффузного отражения. Для составов  $x=0 \dots 0.1$  наблюдается только орторомбическая эшинитовая фаза; для  $x=0.15 \dots 0.2$  обнаружена примесь моноклининой. Химический состав керамик близок к теоретическому; размер частиц варьирует от 1 до 10 мкм; наблюдаются небольшие области с повышенным содержанием Ca и Ti. На их спектрах диффузного отражения фиксируются f-f-переходы иона  $Nd^{3+}$ , а также полосы (полосы) переноса заряда  $O_2p \rightarrow Nd4f$  и (или)  $\rightarrow Nb4d$ ; ширина запрещенной зоны  $E_g$  составляет 3.56–3.63 эВ.

Рамановские спектры керамик (рис. 1а) типичны для орторомбической структуры эшинита; они связаны с колебательными модами Nd-O и (Ti, Nb)

$O_6$  октаэдров. Для обработки спектров импеданса использован метод эквивалентных схем. Выявлено наличие двух областей линейности на аррениусовой зависимости проводимости (рис. 1б).

На основании измерений на постоянном токе в атмосфере Ar предложен высокий вклад ионной компоненты проводимости. Рассчитаны значения энергии активации  $E_a$ , рассмотрены релаксационные процессы и диэлектрические свойства эшинитов. Значение диэлектрической константы для состава  $Nd_{0.9}Ca_{0.1}Ti_{0.9}Nb_{1.1}O_6$  наибольшее ( $\epsilon_r=44$ ), что вместе с низким значениями электропроводности открывает перспективы для его использования в качестве диэлектрического материала.

*Работа выполнена в рамках государственного задания №123011800012-9 и №124020300057-6 (ИГТ УрО РАН).*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Hirano M., Kondo S., Sato S. Mild hydrothermal formation and comparative coprecipitation route for  $EuTiNbO_6$  fine phosphor // Ceram. Int. 2016. V. 42(7). P. 8240–8246.
2. Sebastian M.T., Solomon S., Ratheesh R., George J., Mohanan P. Preparation, characterization, and microwave properties of  $RETiNbO_6$  ( $RE = Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Y$ , and  $Yb$ ) dielectric ceramics // J. Am. Ceram. Soc. 2001. V. 84(7). P. 1487–1489.

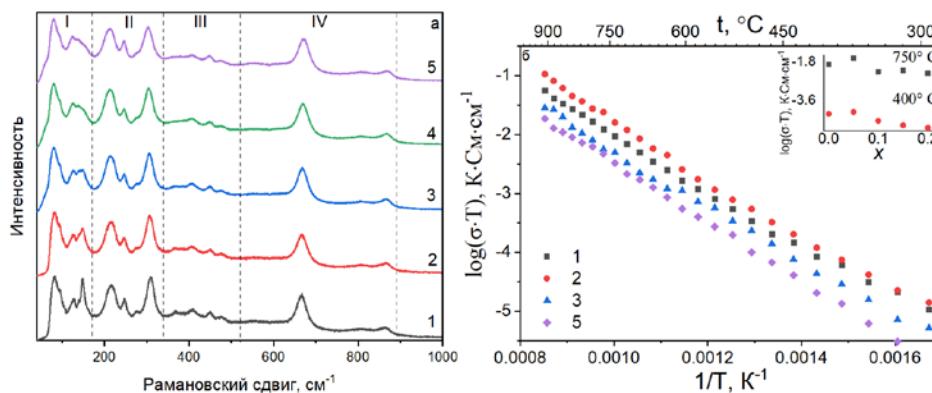


Рис. 1. Рамановские спектры  $Nd_{1-x}Ca_xTi_{1-x}Nb_{1+x}O_6$  при  $x=0$  (1), 0.05 (2), 0.1 (3), 0.15 (4), 0.2 (5) (а) и зависимости электропроводности от температуры в Аррениусовых координатах (б). Врезка – зависимость электропроводности от состава керамики при 450 и 750 °C.

## РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНАЯ СПЕКТРОМЕТРИЯ С ПОЛНЫМ ВНЕШНИМ ОТРАЖЕНИЕМ — БЫСТРЫЙ И ЭКОНОМИЧНЫЙ МЕТОД ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА АПАТИТА

**Жиличева А.Н., Мальцев А.С., Пашкова Г.В., Иванов А.В.**

*Институт земной коры, г. Иркутск, Россия, alena.zhilicheva.13@mail.ru*

Апатит – один из самых распространенных минералов на Земле, встречающийся во многих осадочных, метаморфических и магматических породах. Несмотря на высокое содержание Ca и P, апатит также богат редкоземельными элементами, Sr, U и Th, количественное определение которых может быть использовано в геологии для анализа происхождения и расшифровки петрологического генезиса.

Одним из факторов, ограничивающих использование апатита для решения геологических задач, является отсутствие валидированных аналитических методик. Масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией (ЛА-ИСП-МС) – рутинный метод определения элементного и изотопного состава апатита, однако в его использовании есть несколько проблем: внешняя калибровка по искусственным стеклянным стандартам (NIST 610) приводит к возникновению матричных эффектов; точность метода не подтверждена из-за отсутствия стандартных образцов; расчеты неопределенности основаны только на инструментальной погрешности.

В связи с этим, мы предлагаем использовать для анализа апатита новый метод – рентгенофлуоресцентную спектрометрию с полным внешним отражением (РФА ПВО), которая является чувствительным методом, позволяющим анализировать очень малые количества образца. Количественный анализ методом РФА ПВО обычно проводится способом внутреннего стандарта, поэтому внешние калибровочные образцы не требуются. Крупные кристаллы апатита готовят к анализу следующим образом: кристаллы измельчаются в порошок, затем 5–10 мг образца разлагаются азотной кислотой [Maltsev, et al. 2020]. В случае микроразмерных образцов один кри-

сталл апатита (от 50 мкм до > 1000 мкм) разлагается азотной кислотой непосредственно на кварцевой подложке-отражателе [Maltsev, et al. 2021, 2023]. РФА ПВО позволяет одновременно определять элементы от P до U с пределом обнаружения до 0,1 мкг/г.

Наше исследование показало, что метод РФА ПВО может служить альтернативой ЛА-ИСП-МС для элементного анализа апатита.

*Исследование выполнено за счет гранта Российской научного фонда № 25-77-30006, <https://rscf.ru/project/25-77-30006/>*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Maltsev, A.S., Ivanov, A.V., Chubarov, V.M., Pashkova, G.V., Panteeva, S.V., Reznitskii, L.Z. Development and validation of a method for multi-element analysis of apatite by total-reflection X-ray fluorescence spectrometry // Talanta. 2020. P. 120870, <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.120870>
2. Maltsev, A.S., Ivanov, A.V., Pashkova, G.V., Marfin, A.E., & Bishaev, Y.A. New prospects to the multi-elemental analysis of single micro-crystal of apatite by total-reflection X-ray fluorescence spectrometry // Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy. 2021. V. 184. P. 106281. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2021.106281>
3. Maltsev, A.S., Zhilicheva, A.N., Pashkova, G.V., & Karimov, A.A. New quantification approaches for total-reflection X-ray fluorescence analysis of micro-sized samples: Apatite case study // Microchemical Journal. 2023. V. 193. P.109139. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2023.109139>

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗНЫХ МЕТЕОРИТОВ С ПОМОЩЬЮ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ С ПОЛНЫМ ВНЕШНИМ ОТРАЖЕНИЕМ

**Жиличева А.Н., Мальцев А.С., Пашкова Г.В.**

*Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия, alena.zhilicheva.13@mail.ru*

Метеориты являются фундаментальным источником информации о происхождении Земли и первичном составе ее оболочек. Метеориты делятся на группы: железные, каменные и железно-каменные. Классификация железных метеоритов строится на двух основных принципах:

- 1) по структуре;
- 2) по химическому составу.

В настоящее время известно более 1300 железных метеоритов, найденных на Земле. Для классификации железных метеоритов получены многочисленные данные по их составам с помощью разных методов анализа (нейтронно-активационного анализа, масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (MC-ИСП), MC-ИСП с лазерной аблацией).

Метод рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) в традиционном исполнении не получил широкого распространения при анализе железных метеоритов из-за присущих ему ограничений, таких как: относительно невысокая чувствительность определения примесных элементов, матричные эффекты, проблемы с подбором образцов сравнения для градуировки. Важным шагом на пути расширения возможностей традиционного РФА является использование эффекта полного внешнего отражения (РФА-ПВО). Достоинствами РФА ПВО являются более низкие пределы обнаружения по сравнению с традиционным РФА из-за невысокого уровня фона в спектре, градуировка спектрометра с использованием стандартных растворов элементов и применение способа внутреннего стандарта. В представленной работе на примере метеорита Сихотэ-Алинь (ПАВ) показаны перспективы применения РФА-ПВО для определения элементного состава метеоритов.

Для перевода метеорита в раствор применяли кислотное разложение с использованием концентрированной  $\text{HNO}_3$  или смеси 1:3  $\text{HNO}_3$  и  $\text{HCl}$  (царская водка). Во фторопластовый сосуд объемом 5 мл по-

мещали ~100 мг образца железного метеорита, добавляли 2,5 мл 68% масс.  $\text{HNO}_3$  или 2,5 мл царской водки и нагревали при 80 °C. Стандартный вариант приготовления излучателей для РФА-ПВО предполагает получение образца, удовлетворяющего критерию «тонкого» излучающего слоя, поэтому были опробованы разные степени разбавления полученных растворов после разложения образцов метеоритов. Для повышения точности определения Co, Cu, Ni и Ga апробирована процедура экстракции железа метилизобутилкетоном [Chen, Berndt, Klockenkper et al., 1990].

Контроль правильности результатов РФА ПВО проводили сравнением результатов с литературными данными [Gemelli, D’Orazio, and Folco, 2015; D’Orazio and Folco, 2003]. Показано, что выбранные способы подготовки проб могут быть использованы для количественного определения Fe, Co, Cu, Ni, Ga и Ge в железных метеоритах.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-23-00515, <https://rscf.ru/project/25-23-00515/>*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Chen J.S., Berndt H., Klockenkper R., Tlg G. Trace analysis of high-purity iron by total reflection X-ray fluorescence spectrometry // Fresenius. J. Anal. Chem. 1990. V. 338(8). P. 891–894.
2. D’Orazio M., Folco L. Chemical Analysis of Iron Meteorites by Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry // Geostandards Newsletter. 2003. V.27(3). P. 215–25.
3. Gemelli M., D’Orazio M., Folco L. Chemical Analysis of Iron Meteorites Using a Hand-Held X-Ray Fluorescence Spectrometer. // Geostandards and Geoanalytical Research. 2015. V. 39 (1). P. 55–69.

## СТРУКТУРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИРОДНЫХ СЛОИСТЫХ ДВОЙНЫХ ГИДРОКСИДОВ

Житова Е.С.

*Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук, Петропавловск-Камчатский, Россия, zhitova\_es@mail.ru*

Доклад посвящен структурной характеристике минералов надгруппы гидроталькита или природных слоистых двойных гидроксидов (СДГ). С

структурный анализ квинтинита различных мест находок показал их изоструктурность несмотря на противоречивость предыдущих структурных описаний [Zhitova et al., 2023a]. Установлена новый тип сверхструктуры, определяемый наложением упорядоченного распределения Mn<sup>2+</sup> и Al катионов и карбонат анионов, реализуемый в чармарите [Zhitova et al., 2024a]. Определена кристаллическая структура айовайта, в которой впервые локализованы атомы хлора [Zhitova et al., 2023c].

На примере айовайта из кимберлитовой трубы Удачная (Россия) показано, что цветовая зональность соответствует вариациям анионной части, что может являться первым зарегистрированным случаем природного анионного обмена [Zhitova et al., 2024b].

Рентгеноструктурный анализ десотельсита, имеющего контрастный (с точки зрения рентгеновской дифракции) набор катионов, показал разупорядоченное расположение Mg и Mn<sup>3+</sup> в октаэдрических слоях по объему кристалла [Zhitova et al., 2023b]; ранее предложенные теоретические схемы на трехмерном уровне не подтверждаются. Охарактеризованы две новые природные фазы: (1) состава Ni<sub>4</sub>Co<sup>3+</sup><sub>2</sub>(OH)<sub>12</sub>(SO<sub>4</sub>)·4H<sub>2</sub>O, образующаяся по Со-содержащему миллериту и (2) состава Zn<sub>2</sub>Al(OH)<sub>6</sub>Cl·H<sub>2</sub>O, образующаяся по сфалеритовый рудам (Лаврион, Греция) [Zhitova et al., 2025]. Обобщены структурные принципы минералов группы гидроталькита и вермландита, показаны минералы, для которых кристаллографические и химические характеристики не согласуются [Житова и др., 2025].

*Работа выполнена за счет гранта Российского Научного Фонда № 22-77-10036.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Zhitova E.S., Sheveleva R.M., Zolotarev A.A., Krivovichev S.V. The crystal structure of Mg–Al–CO<sub>3</sub> layered double hydroxide // Crystals. 2023a. V. 13(5). AN. 839.
2. Zhitova E.S., Sheveleva R.M., Kasatkin A.V., Zolotarev A.A., Bocharov V.N., Kupchinenko A.N., Belakovskiy D.I. Crystal structure of hydrotalcite group mineral – desautelsite, Mg<sub>6</sub>Mn<sup>III</sup><sub>2</sub>(OH)<sub>16</sub>(CO<sub>3</sub>)•4H<sub>2</sub>O, and relationship between cation size and in-plane unit cell parameter // Symmetry. 2023b. V. 15(5). AN. 1029.
3. Zhitova E.S., Chukanov N.V., Pekov I.V., Zolotarev A.A., Shilovskikh V.V., Bocharov V.N. Crystal chemistry of iowaite, Mg<sub>6</sub>Fe<sup>III</sup><sub>2</sub>(OH)<sub>16</sub>Cl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O, a natural layered double hydroxide // Appl. Clay Sci. 2023c. V. 243. AN. 107070.
4. Zhitova E.S., Zolotarev A.A., Kasatkin A.V., Sheveleva R.M., Krivovichev S.V., Pekov I.V., Bocharov V.N. The crystal structure of charmarite—the first case of a 11× 11 Å superstructure mesh in layered double hydroxides // Mineral. Mag. 2024. V. 88(3). P. 244–254.
5. Zhitova E.S., Mikhailenko D.S., Pekov I.V., Korsakov A.V., Zolotarev A.A. Iowaite from the Udachnaya kimberlite pipe, Yakutia: crystal chemistry and post-crystallization transformations // Dokl. Earth Sci. Vol. 517(1). P. 1190–1198.
6. Zhitova E.S., Chukanov N.V., Pekov I.V., Schäfer C., Belakovskiy D.I., Van K.V., Zolotarev A.A. The new natural layered double hydroxide, Zn<sub>2</sub>Al(OH)<sub>6</sub>Cl·H<sub>2</sub>O, from the Lavrion ore district, Greece // Zapiski RMO. 2025. In press.
7. Житова Е.С., Кривовичев С.В., Пеков И.В., Золотарев А.А. Минералы группы гидроталькита: кристаллохимия и новый взгляд на «старые» минералы. 2025. Т. 70(2). С. 336–346.

## ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ К ИССЛЕДОВАНИЮ УДАРНО-ПРЕОБРАЗОВАННЫХ ЗЕРЕН ЦИРКОНА

Замятин Д.А.

*Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заваричского УрО РАН, Екатеринбург, Россия, замятин@igg.uran.ru*

Циркон является важнейшим термобарометром импактных (ударных) процессов, обладает высокой устойчивостью и способен сохраняться вплоть до 80 ГПа. Возникающие ударные микроструктуры деформаций минерала зависят от PTt-условий и характеристик минерала. В частности, установлено, что от степени радиационного повреждение структуры циркона зависит результат его ударных преобразований [Gucsik et al., 2002]. Спектроскопия комбинационное рассеяние света (КРС) – наиболее разработанный локальный метод количественного измерения степени нарушения структуры циркона; дифракция обратного рассеяния электронов (EBSD) – основной метод исследования импактного циркона с микродеформациями. По данным [Zamyatin, 2022] спектроскопия КРС применяется лишь в небольшом числе исследований ударно-преобразованных зерен циркона. Цель работы – КРС-спектроскопия импактных зерен циркона, рассмотрение совместного применения и сопоставление возможностей КРС и EBSD методов.

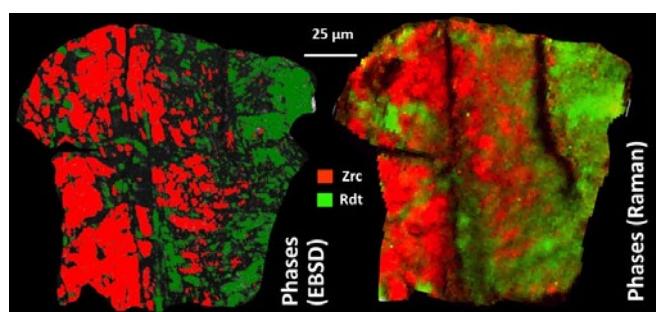


Рис. 1. Фазовые карты циркона после ударного нагружения 60 ГПа по данным EBSD (слева) и КРС-спектроскопии (справа), красный – циркон, зеленый – рёйтит.

Зерна циркона из импактитов Вредефорта (Южная Африка) и Кары (Урал, Россия) исследованы на КРС-спектрометре Horiba LabSpec HR800 и сканирующем электронном микроскопе SEM Tescan MIRA LMS, оснащенном детектором Oxford Nordlys Nano EBSD. Изучены зерна с ростовой зональностью, полосами плоской деформации, микродвойками, зернистой структурой и рейдитом – высокобарическим полиморфом циркона. Совокупность карт соотношения интенсивностей  $B_{lg}/E_g$  и ширины  $B_{lg}$  КРС-полос циркона позволили выявлять признаки ударной деформации зерен. Установлено, что наноразмерные смеси значительно размыают дифракционные изображения Кикучи, что не позволяет идентифицировать фазы, при этом они отчетливо проявляются в КРС-спектрах (рис. 1). По сравнению с EBSD-методом КРС-спектроскопия обладает меньшим пространственным разрешением и чувствительностью к ориентации кристаллической решетки, но большей эффективностью для фазового анализа.

*Работа выполнена в ЦКП УрО РАН «Геоаналитик» в рамках темы № 124020300057-6 государственного задания ИГГ УрО РАН.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Gucsik A., Koeberl C., Brandstätter F., Reimold W.U., Libowitzky E. Cathodoluminescence, electron microscopy, and Raman spectroscopy of experimentally shock-metamorphosed zircon // Earth and Planetary Science Letters, 2002. V.202. P.495–509.
2. Zamyatin D.A. Application of Raman Spectroscopy for Studying Shocked Zircon from Terrestrial and Lunar Impactites: A Systematic Review // Minerals, 2022. V.12. 969.

## ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КАТИОНОВ В КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЕ КАЛИЙ-МАГНЕЗИО-ГАСТИНГСИТА

Зарубина Е.С.<sup>1</sup>, Кориневский В.Г.<sup>2</sup>, Рянская А.Д.<sup>3</sup>, Замятин Д.А.<sup>3</sup>, Расцветаева Р.К.<sup>4</sup>, Аксенов С.М.<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> Лаборатория арктической минералогии и материаловедения,

<sup>ФИЦ Кольский научный центр РАН, Апатиты, Россия, aks.crys@gmail.com</sup>

<sup>2 Южно-Уральский ФНЦ Минералогии и геоэкологии УрО РАН, Миасс, Россия</sup>

<sup>3 Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия</sup>

<sup>4 Курчатовский комплекс кристаллографии и фотоники, НИЦ Курчатовский институт, Москва, Россия</sup>

Согласно современной номенклатуре, подгруппа кальциевых амфиболов определяется согласно следующим условиям [Hawthorne et al., 2012]:

$${}^B(\text{Ca} + \Sigma M^{2+})/\Sigma B \geq 0.75, {}^B\text{Ca}/\Sigma B \geq {}^B M^{2+}/\Sigma B.$$

В эту подгруппу входит семейство минералов с корневым названием *гастингсит*, которое определяется следующими критериями:

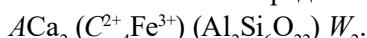
$$0.5 < {}^A(\text{Na} + \text{K} + 2\text{Ca}) < 1.5;$$

*C*-позиции заняты преимущественно двухвалентными ионами (Mg или Fe<sup>2+</sup>);

$$0.5 < {}^C(\text{Al} + \text{Fe}^{3+} + 2\text{Ti}) < 1.5 \text{ с преобладанием } \text{Fe}^{3+};$$

*W*-позиция содержит (OH), F или Cl.

Упрощённая формула минералов семейства гастингсита может быть представлена в виде:



В настоящее время в семействе гастингсита утверждено восемь самостоятельных минеральных видов: гастингсит  $\text{NaCa}_2 (\text{Fe}^{2+} \text{Fe}^{3+}) (\text{Si}_6 \text{Al}_2) \text{O}_{22} (\text{OH})_2$ ; магнезио-гастингсит  $\text{NaCa}_2 (\text{Mg}_4 \text{Fe}^{3+}) \text{Si}_6 \text{Al}_2 \text{O}_{22} (\text{OH})_2$ ; калий-гастингсит  $\text{KCa}_2 (\text{Fe}^{2+} \text{Fe}^{3+}) (\text{Si}_6 \text{Al}_2) \text{O}_{22} (\text{OH})_2$ ; калий-фтор-гастингсит  $\text{KCa}_2 (\text{Fe}^{2+} \text{Fe}^{3+}) (\text{Si}_6 \text{Al}_2) \text{O}_{22} \text{F}_2$ ; калий-хлор-гастингсит  $\text{KCa}_2 (\text{Fe}^{2+} \text{Fe}^{3+}) \text{O}_{22} \text{Cl}_2$ ; магнезио-фтор-гастингсит  $\text{NaCa}_2 (\text{Mg}_4 \text{Fe}^{3+}) (\text{Si}_6 \text{Al}_2) \text{O}_{22} \text{F}_2$ ; калий-магнезио-гастингсит  $\text{KCa}_2 (\text{Mg}_4 \text{Fe}^{3+}) (\text{Si}_6 \text{Al}_2) \text{O}_{22} (\text{OH})_2$ .

Калий-магнезио-гастингсит был обнаружен в блоках биотит-амфиболового габбро, входящих в состав серпентинитового меланжа Ильменогорского метаморфического комплекса, который расположен на территории Ильменского заповедника [Кориневский, Кориневский, 2006].

Кристаллические структуры трех образцов калий-магнезио-гастингсита изучены методом рентгеноструктурного анализа с использованием монокри-

сталльного дифрактометра Xcalibur Oxford Diffraction (CCD-детектор) и уточнены до следующих итоговых значений *R*-фактора: 4.01, 4.18 и 4.7% с использованием 1043, 1116 и 1148 отражений с  $I > 2\sigma (I)$ , соответственно [Zarubina et al., in press].

Кристаллические структуры изученных образцов в целом аналогичны другим представителям. Октаэдрическая *M* (2) – позиция характеризуется разнообразным составом гетеровалентных катионов и занята  $\text{Fe}^{3+}$ , Al, Mg, Fe<sup>2+</sup> и V. Октаэдрические *M* (1) и *M* (3) позиции преимущественно заняты Mg и Fe<sup>2+</sup>. Среди трёхвалентных *C*-катионов преобладает  $\text{Fe}^{3+}$ , которое занимает *M* (3) – позицию. Во всех изученных образцах наблюдается характерная для амфиболов магматических пород примесь Ti, упорядоченно занимающего *M* (2) – позицию.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (№ 20-77-10065-П).*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Кориневский В.Г., Кориневский Е.В. Калиймагнезиогастингсит ( $\text{K}, \text{Na}\text{Ca}_2 (\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_4 (\text{Fe}, \text{Al}, \text{Ti}) [\text{Si}_6 \text{Al}_2 \text{O}_{22}] (\text{OH}, \text{Cl})_2$  – новый минеральный вид амфиболов // Записки РМО. 2006. Т. 135. С. 49–57.
2. Hawthorne F.C., Oberti R., Harlow G.E., Maresch W., martin R.F., Schumacher J.C., Welch M.D. Nomenclature of the amphibole supergroup // Am. Mineral. 2012. V. 97. P. 2031–2048.
3. Zarubina E.S., Korinevsky V.G., Ryanskaya A.D., Zamyatin D.A., Rastsvetaeva R.K., Aksenov S.M. The crystal structure of potassio-magnesio-hastingsite  $\text{KCa}_2 (\text{Mg}_4 \text{Fe}^{3+}) (\text{Si}_6 \text{Al}_2 \text{O}_{22}) (\text{OH})_2$  // Cryst. Rep. (in press).

## СИНТЕЗ, АТТЕСТАЦИЯ И ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ НА ОСНОВЕ ОРТОВАНАДАТА ВИСМУТА

Захаров Е.О.<sup>1</sup>, Емельянова Ю.В.<sup>1</sup>, Буянова Е.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Уральский Федеральный Университет, Екатеринбург,

<sup>2</sup> Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*Eugen2003EZ@mail.ru*

Ортованадат висмута в последние годы привлекает к себе все большее внимание благодаря своим фотокатализитическим свойствам в видимой области света, ярко-желтому цвету в качестве нетоксичного пигмента, а также высокой относительной диэлектрической проницаемости в качестве потенциальной керамики для СВЧ-диэлектриков. В данной работе ортованадат висмута  $\text{BiVO}_4$  и твердые растворы на его основе были получены и аттестованы с точки зрения возможности использования металлоксидного фотокатализатора.

Эффективность однофазного  $\text{BiVO}_4$  как фотокатализатора ограничена невозможностью рекомбинации электронно-дырочных носителей заряда. Поэтому необходимо разработать стратегии повышения эффективности фотокатализитического процесса за счет разделения электронно-дырочных носителей заряда. Эту проблему можно решить несколькими путями, одним из которых является контроль морфологии и кристаллографических характеристик, путем получения моноклинно–тетрагональной гетероструктуры из  $\text{BiVO}_4$ .

В настоящей работе получен ортованадат висмута  $\text{BiVO}_4$  и твердые растворы на его основе  $\text{Bi}_{1-x-y}\text{Gd}_x\text{Eu}_y\text{VO}_4$ , где  $x = 0.07$ ;  $y = 0.01, 0.02, 0.03$  методом соосаждения. Оценено соотношение моноклинной (47–66%) и тетрагональной фазы (34–53%) в полученных образцах. Структурная аттестация полученных образцов проведена методами РФА (установлен тип кристаллической решетки, оценены параметры элементарных ячеек). Методом СЭМ была изучена поверхность и внешний вид образцов, проведен элементный анализ. Показано, что элементный состав образцов соответствует их номинальным формулам, распределение элементов по поверхности и сколу образца равномерное.

Методом ИК-спектроскопии подтверждено присутствие характерных полос поглощения для ортованадатов висмута: полосы поглощения группы V – O в области  $920–750 \text{ см}^{-1}$ , антисимметричным валентным колебаниям группы V–O–V в области  $736–775 \text{ см}^{-1}$ . На ИК-спектре образцов полосы поглощения в области  $520–410 \text{ см}^{-1}$  характерны для  $v_4\text{VO}_4^{3-}$  валентных колебаний, а в области  $360 \text{ см}^{-1}$  для  $v_2\text{VO}_4^{3-}$  валентных колебаний.

Методом импедансной спектроскопии определена общая электропроводность всех исследуемых образцов в зависимости от температуры. Построены и проанализированы эквивалентные схемы годографов импеданса. Построены температурные зависимости электропроводности. Общий вид зависимостей является типичным для ортованадата висмута. На кривых наблюдаются перегибы, соответствующие фазовым переходам из тетрагональной в моноклинную модификацию.

Для всех составов рассчитано значение ширины запрещенной зоны. Оценка фотокатализитической активности  $\text{BiVO}_4$  и твердых растворов на его основе  $\text{Bi}_{1-x-y}\text{Gd}_x\text{Eu}_y\text{VO}_4$ , полученных методом соосаждения и высущенных при температуре  $25^\circ\text{C}$  (72 часа), при  $300^\circ\text{C}$ ,  $400^\circ\text{C}$  (6 часов) проведена с использованием красителя метиленового синего. Полученные образцы проявляют значительную фотокатализитическую активность в реакции деградации метиленового синего, наилучшие результаты получены для состава  $\text{Bi}_{0.9}\text{Gd}_{0.07}\text{Eu}_{0.03}\text{VO}_4$  ( $400^\circ\text{C}$ ).

*Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН в рамках Государственного задания ИГГ УрО РАН по теме № 124020300057-6.*

## ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОТЕРМОБАРОМЕТРА TITANIQ ДЛЯ ОЦЕНКИ УСЛОВИЙ МЕТАМОРФИЗМА ВЫСОКОЧИСТЫХ КВАРЦЕВЫХ ПОРОД

Зимин М.Д., Фёдоров А.М.

*Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск,  
dzimin.igc.irk.ru*

Определение условий метаморфизма мономинеральных высокочистых кварцевых пород является сложной задачей из-за малого количества сопутствующих минералов и, в связи с этим ограниченного количества методов изучения. В данной работе проведены термобарометрические исследования хемогенных кварцитов Восточного Саяна в комплексе с геохимическими и технологическими исследованиями. На основе содержания структурного титана в кварцевых концентрататах с помощью двух калибровок геотермобарометра TitanIQ [Osborne et al., 2022; Zhang et al., 2020] и микротермокриометрических измерений флюидных включений оценены Р-Т условия образования пород. Из-за отсутствия рутила и титанита, а также хемогенного происхождения кварцитов использовано минимальное значение коэффициента активности  $TiO_2$  равное 0,1. Содержание структурного титана в кварце уточнялось путем определения общего содержания этого элемента в концентрататах и отдельно в титансодержащих фазах (мусковит) с последующим пересчетом по формуле

$$Ti_{\text{кварц}} = Ti_{\text{общ}} - Ti_{\text{муск (расчетный)}},$$

где  $Ti_{\text{муск (расчетный)}} = (K_{\text{общ}} \times Ti_{\text{муск}} / K_{\text{муск}})$ .

Условия метаморфизма сливных разновидностей кварцитов оценены не выше 3.8 кбар и 465 °C. Условия формирования мелкозернистых кварцитов оцениваются в диапазоне 442–543 °C, а наиболее высокочистых перекристаллизованных разновидностей (суперкварцитов) оценены в диапазоне 2.9–4 кбар и 449–502 °C. Самым поздним по времени является жильный гидротермальный кварц с температурой образования 312–411 °C.

Данный метод основан на предположении, что захват флюидных включений происходит одновременно с переуравновешиванием содержания структурного титана в кварце в процессе динамической перекристаллизации. Полученные значения температуры метаморфизма подтверждаются геотермобарометром на основе состава мусковита,

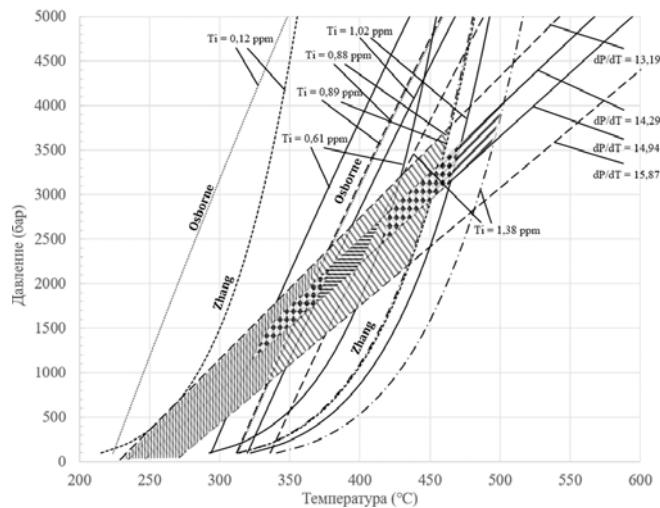


Рис. 1. Графики температуры и давления образования кварцитов в областях пересечения изоплет геотермобарометра TitanIQ при  $Ti = 0,1$  и изохор флюидных включений.

признаками перехода из режима вращения субзёрен в режим миграции границ зёрен и геотермометром на основе комбинационного рассеяния углеродистого материала.

*Исследования выполнены на базе Центра коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН (г. Иркутск) в рамках государственного задания по Проекту № 0284-2021-0004.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Osborne Z. R., Thomas J. B., Nachlas W. O., Angel R. J., Hof C. M., Watson E. B. TitanIQ revisited: expanded and improved Ti-in-quartz solubility model for thermobarometry // Contributions to Mineralogy and Petrology, 2022. V. 177. Article 31.
2. Zhang C., Li X., Almeev R. R., Horn I., Behrens H., Holtz F. Ti-in-quartz thermobarometry and  $TiO_2$  solubility in rhyolitic melts: New experiments and parametrization // Earth and Planetary Science Letters, 2020. V. 538. Article 16213.

## НОВЫЙ МЕХАНИЗМ ВХОЖДЕНИЯ $\text{Fe}^{3+}$ В СТРУКТУРУ МИНЕРАЛОВ ГРУППЫ МЕЛИЛИТА

**Игнатов М.А.<sup>1,2</sup>, Половых А.С.<sup>1</sup>, Ращенко С.В.<sup>1,2</sup>, Сокол Э.В.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, Новосибирск,  
*ignatovma@igm.nsc.ru, devyatiyarova@igm.nsc.ru, rashchenko@igm.nsc.ru, sokol@igm.nsc.ru*  
<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск

В пирогенных комплексах наряду с преобладанием мелилитов простых составов, близких к гелениту, отмечаются и очень сложные, не характерные для иных генетических обстановок –  $(\text{Ca}, \text{Na}, \text{Ba})_2(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Mn})(\text{Si}, \text{Al}, \text{Fe}^{3+})_2\text{O}_7$ . Отличительной особенностью мелилитов из пирогенных плавленых пород – паралав является высокое содержание в них железа в форме ферроакерманитового  $(\text{Ca}_2\text{Fe}^{2+}[\text{Si}_2\text{O}_7])$  либо ферригеленитового  $(\text{Ca}_2\text{Fe}^{3+}[\text{AlSiO}_7])$  миналов (до 50–70 мол. %) [Foit et al. 1987; Cosca et al. 1989; Stracher et al., 2015]. При этом минеральные виды с доминирующим  $\text{Fe}^{3+}$  в группе мелилита пока зарегистрированы не были. Объектами нашего исследования стал мелилит из гранатовых паралав пирогенного комплекса Хатруим (Израиль), содержащий 11.7–14.3 в мас. % железа в пересчете на  $\text{FeO}$ .

Исходя из предположения, что в этом минерале присутствует ферроакерманитовый минал  $\text{Ca}_2\text{Fe}^{2+}[\text{Si}_2\text{O}_7]$ , состав мелилита с максимальным содержанием железа исходно был пересчитан на пять катионов: . Однако, электронная плотность в позициях А и В, уточненная по данным рентгеноструктурного анализа, оказалась заметно (на ~5%) ниже той, которая соответствует данной формуле.

Указанное расхождение снижается до ~1% в варианте пересчета формулы для  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}_{\sum} = 1$ . В пользу преобладания  $\text{Fe}^{3+}$  в позиции В также свидетельствует и анализ валентных усилий. Рентгеноструктурный анализ также выявил ранее неизвестную для минералов группы мелилита структурную особенность – расщепление позиций кислорода, связанное с ориентационным разупорядочением тетраэдров позиций В и Т, при сохранении ПГС  $P2_1m$ .

Таким образом, исследуемый образец с высокой вероятностью является ранее неизвестным конечным членом группы мелилита с преобладанием  $\text{Fe}^{3+}$  в составе – Доля этого минала достигает 42 мол. %. С рядом акерманит-ферроакерманит он связан гетеровалентным изоморфизмом по схеме, выявленной для твердых растворов магнетит-маггемит [Bosi et al. 2019]. Для независимого подтверждения формы нахождения железа, однако, желательно привлечение дополнительных методов (мёссбауэровской или рентгеновской спектроскопии).

*Исследование выполнено за счет гранта  
Российского научного фонда № 24-77-00014*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Bosi F., Biagioni C., Pasero M. Nomenclature and classification of the spinel supergroup. // Eur. J. Mineral. 2019. V. 31. P. 183–192.
2. Cosca M.A., Essene E.J., Geissman J.W., Simmons W.B., Coates D.A. Pyrometamorphic rocks associated with naturally burned coal beds, Powder River Basin, Wyoming. // Am. Min. 1989. V. 74. P. 85–100.
3. Foit F.F., Hooper R.L., Rosenberg P.E. An unusual pyroxene, melilite, and iron oxide mineral assemblage in a coal-fire bichite from Buffalo, Wyoming. // Am. Min. 1987. V. 72. P. 137–147.
4. Stracher G.B., Prakash A., Sokol E. V. Coal and Peat Fires: A Global Perspective. // Elsevier. 2015. V. 3. Case Studies – Coal Fires.

## ОСОБЕННОСТИ СИММЕТРИИ И КАТИОННОГО УПОРЯДОЧЕНИЯ В СТРУКТУРЕ Ca-СОДЕРЖАЩЕГО МИНЕРАЛА РЯДА ПЕРРОТИТА

**Ильин Г.С.<sup>1</sup>, Чуканов Н.В.<sup>2</sup>, Пеков И.В.<sup>3</sup>, Ямнова Н.А.<sup>3</sup>,  
Расцветаева Р.К.<sup>4</sup>, Япаскурт В.О.<sup>3</sup>, Аксенов С.М.<sup>1,4</sup>**

<sup>1</sup> ФИЦ «Кольский научный центр РАН», Апатиты, Россия, g.ilin@ksc.ru

<sup>2</sup> ФИЦ Проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка, Россия

<sup>3</sup> МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>4</sup> НИЦ Курчатовский институт, Москва, Россия

Перротит впервые обнаружен в пегматитах агапитовых нефелиновых сиенитов в карьере Демикс в массиве Сент-Илер (Квебек, Канада) [Chao, 1991]. По современной классификации входит в группу бафертисита, которая является подразделением надгруппы сейдозерита, и имеет идеализированную формулу  $\text{BaNaMn}_4\text{Ti}_2(\text{Si}_2\text{O}_7)_2\text{O}_2(\text{OH})_2\text{F}$ .

Нами изучен образец Ca-содержащего минерала ряда перротита из Октябрьского щелочного массива (Северное Приазовье) [Пеков и др., 1999]. Эмпирическая формула, рассчитанная на  $(\text{Si}_2\text{O}_7)_8$ , имеет вид ( $Z = 1$ ):  $(\text{Ba}_{2.48}\text{K}_{1.56})_{\Sigma 4.04}(\text{Na}_{3.12}\text{Ca}_{0.84})_{\Sigma 3.96}(\text{Mn}_{9.44}\text{Fe}^{2+}_{6.12}\text{Zn}_{0.36})_{\Sigma 15.92}(\text{Ti}_{6.96}\text{Nb}_{0.80}\text{Zr}_{0.16})_{\Sigma 7.92}(\text{Si}_2\text{O}_7)_8\text{O}_{7.64}(\text{OH})_{8.40}\text{F}_{3.96}$  [Ильин и др., 2025].

Рентгеноструктурные исследования выполнены с использованием монокристального дифрактометра Rigaku XtaLAB Synergy-S. Параметры моноклинной элементарной ячейки:  $a = 10.7230(3)$ ,  $b = 13.8313(4)$ ,  $c = 20.8178(7)$  Å,  $\beta = 95.0348(3)$ °,  $V = 3075.638(15)$  Å<sup>3</sup>. Кристаллическая структура минерала была уточнена в рамках двух пр. гр.–  $C2$  ( $R = 4.66\%$ ) и  $C2/m$  ( $R = 4.84\%$ ). Установленное распределение катионов (выполнено на основании кристаллохимических критериев, с учетом рассеивающей способности каждой позиции) наиболее полно соответствует модели с пр. гр.  $C2$ .

Изученный минерал из Октябрьского массива является F-доминантным аналогом перротита, отличаясь от последнего присутствием в составе кальция, высоким содержанием железа и низким – ниобия. На основании действующих правил минералогической номенклатуры можно предположить, что в изученном минерале из Приазовья и особенно – в родственном ему сурхобите [Sokolova et al., 2021], кальций можно рассматривать в том числе

как компонент, играющий видообразующую роль. Имеющиеся данные о химическом составе минерала, изученного в настоящей работе, позволяют рассматривать его как самостоятельный минеральный вид, отличающийся от перротита видообразующей ролью фтора и кальция.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ № 20-77-10065-Л.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ильин Г.С., Чуканов Н.В., Пеков И.В., Ямнова Н.А., Расцветаева Р.К., Япаскурт В.О., Аксенов С.М. Псевдосимметрия и особенности катионного упорядочения в гетерофиллосиликатах. 2. Уточнение кристаллической структуры Ca-содержащего минерала ряда перротита // Литосфера. 2025. Т. 25. В печати.
2. Пеков И.В., Беловицкая Ю.В., Карташов П.М., Чуканов Н.В., Ямнова Н.А., Егоров-Тисменко Ю.К. Новые данные о перротите (Приазовье). // Записки ВМО. 1999. Т. 128(3). С. 112–120.
3. Chao, G.Y. Perraultite, a new hydrous Na-K-Ba-MnTi-Nb silicate species from Mont Saint-Hilaire, Quebec // Canad. Mineral. 1991. V. 29. P. 355–358.
4. Sokolova E., Day M.C., Hawthorne F.C., Agakhanov A.A., Cámará F., Uvarova Yu.A., Della Ventura G. From Structure Topology to Chemical Composition. XXIX. Revision of the Crystal Structure of Perraultite,  $\text{NaBaMn}_4\text{Ti}_2(\text{Si}_2\text{O}_7)_2\text{O}_2(\text{OH})_2\text{F}$ , a Seidozerite-Supergroup TS-Block Mineral from the Oktyabr'skii Massif, Ukraine, and Discreditation of Surkhobite // Canad. Mineral. 2021. V. 59(2). P. 365–379.

## НОВЫЕ ДАННЫЕ О ПРИРОДЕ ОКРАСКИ МИНЕРАЛОВ ГРУППЫ ЭВДИАЛИТА ИЗ ЩЕЛОЧНЫХ МАССИВОВ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА

Ильясова Г.И.<sup>1</sup>, Николаев А.Г.<sup>1</sup>, Ильин Г.С.<sup>2</sup>, Аксенов С.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

*ilyasova.gulsiya399@gmail.com*

<sup>2</sup> Лаборатория Арктической минералогии и материаловедения,

ФИЦ Кольский научный центр РАН, Анадырь, Россия

Минералы группы эвдиалита (МГЭ) представляют собой сложные породообразующие цирконосиликаты, основу структуры которых составляет гетерополиэдрический каркас  $\{Ca_6Zr_3[Si_3O_9]_2[Si_9O_{27}]_2\}^{24-}$  из кремнекислородных колец двух типов, объединенных изолированными октаэдрами циркония шестичленными кольцами реберно-связанных октаэдров кальция [Расцветаева и др., 2012]. Благодаря сложным вариациям химического состава в настоящее время известно более 30 самостоятельных минеральных видов, которые привлекают интерес как важные концентраторы редких и стратегических металлов (Zr, REE, Hf, Nb, Ta).

Окраска МГЭ также отличается широким разнообразием. Наиболее распространенным является красный цвет различных оттенков, но известны также разновидности розового, фиолетового, пурпурного, желтого, желто-зеленого и вплоть до бурого цветов. Наиболее светлая окраска характерна для МГЭ с пониженным содержанием элементов-хромофоров, а наиболее темная – для образцов с высоким содержанием  $Fe^{3+}$  и  $Mn^{3+}$  [Расцветаева и др., 2012]. В частности, интенсивная малиновая, фиолетовая или лиловая окраска связана с  $^5E \rightarrow ^5T_2$  переходом в  $Mn^{3+}$ , а коричневая и желто-коричневая – с ионами  $Fe^{2+}$  тетрагонально-пирамidalной координации. Систематическое исследование связи электронных спектров МГЭ с кристаллохимическими особенностями на основе данных рентгеноструктурного анализа, оптической и мессбауэровской спектроскопии выполнено в работе [Pol'shin et al., 1991].

В настоящей работе представлены новые данные по исследованию природы окраски МГЭ из Хибинского и Ловозерского массивов.

В качестве методов исследования использовались рентгенофазовый анализ, оптическая микроскопия, оптическая спектроскопия. Было установлено, что в МГЭ из Хибинского массива присутствует полоса поглощения в районе от 470 до 600 нм, с максимумом на длине волны 537 нм. Согласно [Платонов, 1976] она связана разрешенным  $d-d$  переходом в трехвалентном марганце. В МГЭ из Ловозерского массива присутствует полоса поглощения с максимумом на длине волны 534–542 нм, связанная с трехвалентным марганцем. Дополнительно в районе 400–450 нм присутствует полоса поглощения с максимумом 422–430 нм, которая связана с механизмом переноса заряда в обменной паре  $Ti^{4+} - Fe^{2+}$ .

Полученные данные свидетельствуют в пользу того, что МГЭ из Ловозерского массива обогащены четырехвалентным титаном, благодаря чему обладают дополнительной насыщенной коричневой окраской, что хорошо согласуется с особенностями их химического состава.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Расцветаева Р.К., Чуканов Н.В., Аксенов С.М. Минералы группы эвдиалита: кристаллохимия, свойства, генезис. Нижний Новгород: НГУ. 2012. 229 с.
2. Платонов А.Н. Природа окраски минералов. Киев: Наукова Думка. 1976. 254 с.
3. Pol'shin E.V., Platonov A.N., Borutzky B.E., Taran M.N., Rastsvetaeva R.K. Optical and Mössbauer study of minerals of the eudialyte group //Physics and Chemistry of Minerals. 1991. V. 18. P. 117–125.

## GaGeO<sub>3</sub>OH МОДЕЛЬНЫЙ АНАЛОГ ФАЗЫ ЭГГ: СИНТЕЗ, СТРУКТУРА И СТАБИЛЬНОСТЬ ПРИ ВЫСОКОМ ДАВЛЕНИИ

**Искрина А.В.<sup>1</sup>, Спивак А.В.<sup>1</sup>, Сеткова Т.В.<sup>1</sup>, Хасанов С.С.<sup>2</sup>,**  
**Кузьмин А.В.<sup>2</sup>, Захарченко Е.С.<sup>1</sup>, Вирюс А.А.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Институт экспериментальной минералогии имени академика  
Д.С. Коржинского РАН, Черноголовка, *iskrina@iem.ac.ru*

<sup>2</sup>Институт Физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна РАН, Черноголовка

Благодаря геохимическому сходству кремния с германием и алюминием с галлием Ga, Ge – содержащие структурные аналоги минералов могут использоваться в качестве высокобарных моделей для изучения соответствующих силикатных и алюмосиликатных систем [Ringwood, Seabrook, 1963; Reid, Ringwood, 1970; Thomas et al., 2008]. При 7 ГПа и 1000 °C на аппарате высокого давления типа «наковальня с лункой» в ИЭМ РАН впервые были синтезированы кристаллы GaGeO<sub>3</sub>OH.

В результате эксперимента были получены белые изометрические кристаллы псевдокубического габитуса размером 5–8 мкм. Химический состав определен как Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 40,9±0,8, GeO<sub>2</sub> 43,8±0,8 мас.%. Синтетическое соединение GaGeO<sub>3</sub>OH, как и фаза Эгг AlSiO<sub>3</sub>OH [Eggleton et al., 1978], имеет моноклинную сингонию и пространственную группу P2<sub>1</sub>/n. Спектр комбинационного рассеяния для фазы GaGeO<sub>3</sub>OH имеет топологию, схожую с КР-спектрами фазы Эгг AlSiO<sub>3</sub>OH. Также было проведено изучение барической стабильности фазы GaGeO<sub>3</sub>OH методом *in situ* КР-спектроскопии при давлениях до ~30 ГПа. В результате прослежено изменение 15 КР-полос при увеличении давления и выявлены изменения коэффициентов зависимости сдвигов частот мод КР при сжатии. Для полос в области колебаний OH изменения частот определить не удалось, поскольку интенсивности этих полос относительно малы при сжатии и декомпрессии.

Предыдущие работы по изучению стабильности структурных характеристик фазы AlSiO<sub>3</sub>OH при высоком давлении показали, что ось *b* является наиболее сжимаемым направлением при давлениях до 16 ГПа, при этом значение угла  $\beta$  уменьшается [Schulze et al., 2018]. Это связано с тем, что расстояние связи Si-O4 быстро уменьшается вплоть до давления 16 ГПа,

усиливая связь Si-O4 и ослабляя связь O4-H. Этот эффект также наблюдается и для полосы валентного колебания GeO6 соединения GaGeO<sub>3</sub>OH; во всех трех областях давления эта полоса имеет наибольшее значение  $\partial\nu/\partial P$ , что свидетельствует о более сильном сжатии связи Ge···O. Таким образом, синтетическое соединение GaGeO<sub>3</sub>OH можно рассматривать как аналог фазы эгг AlSiO<sub>3</sub>OH.

*Работа выполнена за счет гранта РНФ № 24-27-00078.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Eggleton R.A., Chappell B.W. The crystal structure of stilpnomelane. Part III: Chemistry and physical properties // Mineral. Mag. 1978. V. 42. P. 361–368.
2. Reid A.F., Ringwood A.E. The crystal chemistry of dense M<sub>3</sub>O<sub>4</sub> polymorphs: High pressure Ca<sub>2</sub>GeO<sub>4</sub> of K<sub>2</sub>NiF<sub>4</sub> structure type // J. Solid State Chem. 1970. V. 1. P. 557–565.
3. Ringwood A.E., Seabrook M. High-pressure phase transformations in germanate pyroxenes and related compounds // J. Geophys. Res. 1963. V. 68. P. 4601–4609.
4. Schulze K., Pamato M.G., Kurnosov A., Ballaran T.B., Glazyrin K., Pakhomova A., Marquardt H., High-pressure single-crystal structural analysis of AlSiO<sub>3</sub>OH phase egg // Am. Mineral. 2018. V. 103. P. 1975–1980.
5. Thomas S.M., Koch-Müller M., Kahlenberg V., Thomas R., Rhede D., Wirth R., Wunder B. Protonation in germanium equivalents of ringwoodite, anhydrous phase B, and superhydrous phase B // Am. Mineral. 2008. V. 93. P. 1282–1294.

## КРИСТАЛЛОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ТЕРМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ СКАПОЛИТОВ

Канева Е.В., Гавриленко В.В., Радомская Т.А., Шендрик Р.Ю.

*Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия, kev604@mail.ru*

Скалолит представляет собой группу каркасных алюмосиликатов с дополнительными анионами, общая формула которых  $M_4[T_{12}O_{24}]A$ , где  $M = \text{Na}, \text{K}, \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}, \text{Fe}^{2+}$ ,  $T = \text{Si}, \text{Al}, \text{Fe}^{3+}$ , а  $A = \text{Cl}, (\text{CO}_3), (\text{SO}_4)$  и в меньшей степени  $\text{Br}$ . Семейство минералов группы скалолита образует твёрдый раствор, крайними членами которого являются мариалит,  $\text{Na}_4[\text{Al}_3\text{Si}_9\text{O}_{24}]\text{Cl}$ , и мейонит,  $\text{Ca}_4[\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}]\text{CO}_3$ . Кристаллизация этих соединений возможна в пространственных группах  $I4/m$  или  $P42/n$ . Структура скалолита характеризуется наличием сложных колец, образованных четырьмя тетраэдрами  $T$ , которые формируют колонки вдоль оси  $c$ . В полостях каркаса располагаются катионы  $\text{Ca}^{2+}, \text{Na}^+$ , анионные группы  $(\text{CO}_3)^{2-}$  и  $(\text{SO}_4)^{2-}$ , а также анионы  $\text{Cl}^-$ . Состав скалолита часто выражают числом, обозначаемым как  $Me(\%)$ , отражающим относительное содержание кальция по формуле:  $\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Na}+\text{K}) \times 100$ , которое соответствует доле мейонитового конечного члена в составе минерала.

Разнообразие цветов скалолитов – от фиолетового до синего – в основном обусловлено параметрами радиационно-индукционных дефектов. Наиболее распространённой парой является карбонатный радикал-анион  $(\text{CO}_3)^{\cdot-}$  в сочетании с вакансией внекаркасного аниона, захватившего электрон ( $F$ -центр) [Shendrik et al., 2024a, 2024b]. Реже встречается фиолетовый хромофор – радикал-анион  $\text{S}_3^{\cdot-}$  [Shendrik et al., 2024a]. Он придаёт образцам более выраженный фиолетовый оттенок по сравнению с системами  $(\text{CO}_3)^{\cdot-}/F$ -центр. Жёлтая окраска связана с присутствием радикал-анионов  $\text{S}_2^{\cdot-}$  [Shendrik et al., 2024a]. Катионное окружение (соотношение  $\text{Na}/\text{Ca}$ ) влияет на оттенки скалолитов и пороговую энергию образования радиационных дефектов.

Исследованные в рамках данной работы образцы голубого, бесцветного и фиолетового скалолита имеют соответственно следующие формулы:

$(\text{Ca}_{3.13}\text{Na}_{0.68}\text{K}_{0.02})[\text{Al}_{5.40}\text{Si}_{6.60}\text{O}_{24}](\text{CO}_3)_{0.58}(\text{SO}_4)_{0.16}\text{Cl}_{0.08}$ , соответствующая  $Me(\%) 81.7$ ,  $(\text{Ca}_{2.12}\text{Na}_{1.81}\text{K}_{0.04})[\text{Al}_{4.49}\text{Si}_{7.51}\text{O}_{24}](\text{CO}_3)_{0.55}\text{Cl}_{0.26}(\text{SO}_4)_{0.12}$ , соответствующая  $Me(\%) 53.4$  и  $(\text{Na}_{2.78}\text{Ca}_{1.11}\text{K}_{0.06})[\text{Al}_{3.99}\text{Si}_{8.01}\text{O}_{24}]\text{Cl}_{0.67}(\text{CO}_3)_{0.19}(\text{SO}_4)_{0.01}$ , соответствующая  $Me(\%) 28.1$ .

Комплексное исследование скалолитов с применением *in situ* высокотемпературных дифракционных экспериментов и *ex situ* ИК-спектроскопии позволяют устанавливать структурно-спектроскопические особенности: позволяют проследить динамику структурных изменений при нагреве в реальном времени, определить температурные границы устойчивости различных структурных типов скалолитов и выявить температурные точки фазовых переходов и аномалий термического расширения, а также установить корреляции между положением полос колебаний на ИК-спектрах и составом твердого раствора и изменения кристаллической структуры при повышении температуры.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Shendrik R., Chukanov N.V., Bogdanov A., Myasnikova A., Pankrushina E., Zolotarev A.A., Babkina A., Popova E., Vigasina M.F., Aksenov S.M., Ilyin G., Pekov I.V. Nature of scapolite color: ab initio calculations, spectroscopy, and structural study // Minerals. 2024a. Vol. 14(9). P. 937.
2. Shendrik R., Kaneva E., Pankratova V., Pankrushina E., Radomskaya T., Gavrilenco V., Loginova P., Pankratov V. Intrinsic luminescence and radiation defects in scapolite // Chemical Physics Letters. 2024b. Vol. 838. P. 141081.

## РОССИЙСКО-ТАДЖИКСКИЕ ОПТИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ МАЛЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

**Карташова А. П.<sup>1</sup>, Кохирова Г. И.<sup>2</sup>, Баканас Е. С.<sup>1</sup>, Щербина М. П.<sup>1</sup>, Наливкин М. А.<sup>1</sup>, Пузин В. Б.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Институт астрономии РАН, Москва, Россия, akartashova@inasan.ru

<sup>2</sup> Институт астрофизики НАНТ, Душанбе, Таджикистан

Объединение фотометрических рядов наблюдений, полученных с интервалом по времени на различных широтах, позволяет получить более полную картину об исследуемом объекте. Особенно это важно в случае околоземных астероидов, для которых время видимости ограничено условиями сближения с Землей в силу их размеров и особенностью орбит. Поэтому с целью изучения выбранных астероидов на основе комбинации данных с различных обсерваторий (обсерватория Сангло – ЦКП «Терскольская обсерватория») были проведены оптические наблюдения с учетом предварительного моделирования условий видимости выбранных объектов.

Была оценена возможность наблюдений практически одновременно с двух обсерваторий астероидов, сближающихся с Землёй, особенно потенциально опасных. Учитывались возможности используемых инструментов и особенности методики фотометрических наблюдений. В качестве ограничений по инструментальной и методической составляющих были приняты следующие значения: для обсерватории Сангло – астероиды должны иметь видимую звездную величину не слабее 16<sup>m</sup> в фильтре V, находиться на высоте от 30 градусов в течение минимум 1 часа (минимальное время для получения фотометрических измерений в каждом фильтре достаточного количества данных). Для Терскольской обсерватории были приняты такие же ограничения по высоте и доступному для наблюдений времени, видимая звездная величина принималась до 17.5<sup>m</sup>.

Определение доступных для наблюдения астероидов проводилось с помощью инструмента, представленного на сайте JPL ([ssd.jpl.nasa.gov/tools/](http://ssd.jpl.nasa.gov/tools/)),

позволяющего задавать как необходимую точку наблюдений по коду обсерватории, так и все описанные выше параметры; база данных NASA (Small-Body Database Lookup) использовалась для поиска необходимой информации об астероидах.

На обсерватории Сангло ИА НАНТ и ЦКП «Терскольская обсерватория» ИНАСАН в 2024 году были проведены синхронные наблюдения ряда астероидов, сближающихся с Землей. Были получены астрометрические и фотометрические данные для этих астероидов. По ним были подтверждены полученные ранее параметры, такие как, например, показатели цвета, а также проведена оценка принадлежности к спектральному классу.

Моделирование возможности наблюдений малых тел Солнечной системы с помощью одновременных наблюдений с территории России и Таджикистана и проведение соответствующих наблюдений астероидов показали эффективность работы Российско – Таджикского наблюдательного сегмента.

В то же время для решения различных задач, а особенно по проблемам астероидно-кометной опасности, в ИНАСАН разрабатываются обзорные мультиапертурные телескопы, способные осуществлять небесные обзоры одновременно в 4-х фотометрических полосах. В докладе будет представлено описание основных технических характеристик.

Данные телескопы планируются установить как на территории России, так и в Таджикистан и других доступных площадках.

*Работа выполнена за счет гранта Министерства науки и высшего образования РФ № 075-15-2024-626.*

## СПЕКТРЫ СЛОИСТЫХ ЛЬДОВ В СРЕДНЕМ ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛЯ ОПИСАНИЯ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ С ТЕЛЕСКОПА JWST

Картеева В.М., Накибов Р.С., Петрашкевич И.В., Ожиганов М.Э., Медведев М.Г., Васюнин А.И.

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия, varvara.karteeva@urfu.ru

Инфракрасные (ИК) спектры лабораторного льда являются аналогами спектров, получаемых космическими аппаратами в направлении областей образования звезд и планет. Такие спектры получают, используя криогенные сверхвысоковакуумные лабораторные установки. На базе лаборатории астрохимических исследований УрФУ собрана установка ISEAge. Для получения аналога межзвездного льда в главной камере установки поддерживается сверхнизкое давление ( $P \sim 2 \times 10^{-10}$  мбар) с помощью турбомолекулярного насоса. В главную камеру погружен криогенный держатель с закрепленным на нем германием окном, которое можно охладить до 6.7 К. Именно на это окно осаждаются молекулы, подаваемые через игольчатые натекатели из линии дозировки. Поток вещества из натекателей образует своеобразное молекулярное облако вокруг подложки, молекулы из которого осаждаются на подложку, формируя лабораторные аналоги межзвездного льда.

Процесс формирования межзвездного льда происходит слоями. Сначала формируется полярный слой, в котором основным компонентом является вода. Также в этом слое присутствуют молекулы

$\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{NH}_3$  и  $\text{CH}_4$ . Далее происходит вымораживание молекул  $\text{CO}$  из газа, в связи с чем образуется слой, богатый  $\text{CO}$ .

По аналогии с этими этапами эволюции нами были выращены слоистые льды для анализа полосы поглощения, видимой в ИК спектрах вблизи длины волн 7.7 мкм. Данный пик относится преимущественно к полосе деформационных колебаний метана. Получены две бинарных, трехкомпонентная и четырехкомпонентная смеси. Затем поверх таких льдов производилось напыление чистого  $\text{CO}$ . Далее производился нагрев слоистого льда с шагом 0.5 К/мин. В качестве результата выращивания четырех смесей с малым содержанием метана нами было установлено, что такие смеси могут описывать наблюдательные данные лучше, чем льды только полярного слоя. Результатом описания пика 7.7 мкм маломассивной протозвезды B1-с по данным JWST стала смесь  $\text{CH}_4:\text{H}_2\text{O}:\text{CO}_2/\text{CO}=1:10:5/10$  при температуре 15 К.

*Исследование выполнено за счет гранта Российской научного фонда № 23-12-00315.*

## СИНТЕЗ И КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА НОВОЙ МОДИФИКАЦИИ $\text{PbGeO}_3$ – СТРУКТУРНОГО АНАЛОГА АЛАМОЗИТА $\text{PbSiO}_3$

Киреев В.Е.<sup>1</sup>, Чаркин Д.О.<sup>1,2</sup>, Аксенов С.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Лаборатория арктической минералогии и материаловедения,  
ФИЦ Кольский научный центр РАН, Апатиты, Россия, [aks.crys@gmail.com](mailto:aks.crys@gmail.com)  
<sup>2</sup> Химический факультет, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Благодаря своим кристаллохимическим особенностям, сходству ионных радиусов  $\text{Ge}^{4+}$  и  $\text{Si}^{4+}$ , а также строению и характеру полимеризации  $\text{GeO}_4$  тетраэдров, германаты часто рассматриваются как высокобарические аналоги силикатов. Наибольший интерес вызывают соединения с изолированными неразветвленными цепочечными анионами с общей формулой  $[\text{Si}_p\text{O}_{3p}]^{2p-}$  [Day, Hawthorne, 2020] для которых известны представители вплоть до  $p=24$  (синтетический  $\text{Na}_{24}\text{Y}_8[\text{Si}_{24}\text{O}_{72}]$ ). Среди аналогичных германатов самая длиннопериодная цепочка с  $p=12$  наблюдается в кристаллической структуре  $\text{Pb}_{12}[\text{Ge}_{12}\text{O}_{36}]$  [Nozik et al. 1979] – Ge-аналога силикатного минерала аламозита  $\text{Pb}_{12}[\text{Si}_{12}\text{O}_{36}]$  [Кривовичев, Бернс, 2004] и родственных синтетических фаз.

Кристаллы новой полиморфной модификации  $\text{PbGeO}_3$ -II были получены методом растворения в расплаве при  $T=550^\circ\text{C}$  в системе, содержащей  $\text{KI}$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{PbI}_2$  и  $\text{GeO}_2$  в эквимолярных количествах. Рентгеноструктурные исследования выполнены при комнатной температуре с использованием монокристального дифрактометра Rigaku XtaLAB Synergy-S (Hybrid Pixel Array детектор; Mo $\text{K}\alpha$ -излучение).

Кристаллическая структура новой модификации  $\text{PbGeO}_3$ -II характеризуется параметрами ячейки  $a=22.9394$  (3) Å,  $b=14.4672$  (2) Å,  $c=13.2344$  (2) Å,  $\beta=119.4335$  (15)°,  $V=3825.18$  (11) Å<sup>3</sup> (пр. гр.  $C2/c$ ;  $Z=48$ ) и топологически близка к изученным ранее по данным нейтронографии кристаллической структуре  $\text{PbGeO}_3$ -I [Nozik et al. 1979] с параметрами  $a=11.469$  Å,  $b=7.236$  Å,  $c=12.555$  Å,  $\beta=113.3$ °,  $V=956.96$  Å<sup>3</sup> (пр. гр.  $P2/c$ ;  $Z=12$ ), а также синтетическому аламозиту  $\text{PbSiO}_3$  [Кривовичев, Бернс, 2004]

с параметрами  $a=11.209$  (1) Å,  $b=7.0410$  (8) Å,  $c=12.957$  (1) Å,  $\beta=119.76$  (15)°,  $V=887.7$  (8) Å<sup>3</sup> (пр. гр.  $P2/c$ ;  $Z=12$ ) [Кривовичев, Бернс, 2004]. Основу их кристаллических структур составляют параллельные длиннопериодические тетраэдрические цепочки  $[\text{T}_{12}\text{O}_{36}]^{24-}$ , где  $\text{T}=\text{Si}^{4+}$ ,  $\text{Ge}^{4+}$ . Соседние цепочки объединяются катионами  $\text{Pb}^{2+}$ , обладающие стереоактивной неподеленной  $6s^2$  электронной парой, что определяет специфический волнобразный изгиб тетраэдрических цепочек.

Отличительной особенностью кристаллической структуры новой модификации  $\text{PbGeO}_3$ -II является различие в ориентациях  $[\text{GeO}_4]$ -тетраэдров в соседних  $[\text{Ge}_{12}\text{O}_{36}]$ -цепочках, что приводит к увеличению объема элементарной ячейки в четыре раза по сравнению с исходной в структуре  $\text{PbGeO}_3$ -I. Анализ кристаллической структуры  $\text{PbGeO}_3$ -II показывает ее высокую степень псевдосимметричности  $\Delta_{\max}=1.1112$ .

*Работа выполнена за счет гранта Российского Научного Фонда № 20-77-10065-П.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Кривовичев С.В., Бернс П.К. Кристаллическая структура синтетического аламозита  $\text{Pb}[\text{SiO}_3]$  // Записки ВМО. 2004. Т. 133. С. 70–76.
2. Day M.C., Hawthorne F.C. A structure hierarchy for silicate minerals: chain, ribbon, and tube silicates // Mineral Mag. 2020. V. 84. P. 165–244.
3. Nozik Y.Z., Maksimov B.A., Fykin L.E., Dudarev V.Y., Garashina L.S., Gabrielyan V.T. Neutron diffraction study of lead germanate  $\text{PbGeO}_3$  // J. Struct. Chem. 1979. V. 19. P. 628–630.

## МИНЕРАЛОГИЯ ЧЕРНОГО И СЕРОГО НЕФРИТА КАВОКТИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ, СРЕДНЕ-ВИТИМСКАЯ ГОРНАЯ СТРАНА

Кислов Е. В.

Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, Россия, evg-kislov@ya.ru

Кальцит-тремолитовые скарны с телами нефрита белой, зеленой, коричневой окраски развиты на контакте доломита и эпидот-тремолитового скарна по амфиболиту в ксеноблоках метаморфитов в гранитах. Серый и черный нефрит не описан, хотя используется ООО «Ориентал Вэй» для производства изделий.

Юго-восточная часть. Изучен белый нефрит с черными прожилками, точками, зернами; серый нефрит неоднородной окраски; обр. 596803 с белыми, серыми, черными полосами, пятнами; обр. 565901 светло-зеленый с субпараллельными извилистыми черными прожилками. В tremolite содержание FeO ниже предела обнаружения, редко до 0.49 вес. %. В обр. 565901 0.50–0.87 вес. % FeO. В обр. 596803 тонкозернистые прослои белого диопсида. В других образцах изометричные или корродированные зерна диопсида с включениями графита, срастаниями с tremolитом, кварцем, графитом. В обр. 596803 хлорит образует прослои, интерстиции, в других он редок. Графит обнаружен во всех образцах, кроме 596803 – уплощенные кристаллы, прожилки, включения в диопсиде, кварце, содержит включения кальцита. Кварц в трех образцах образует зерна, пятнообразные агрегаты с включениями графита. Кальцит в двух образцах и обильный фторапатит в восьми образцах ассоциируют с графитом. Отмечены хлорапатит, пренит, циркон, бадделеит, тальк и барит. Обычны халькозин и галенит, а молибденит, пирит, гетит и сульфат Bi и Pb редки.

Серая окраска обр. 596803 объясняется агрегатами хлорита. Серый до черного цвет остальных образцов юго-восточной части месторождения объясняется наличием графита. Мелкие редкие зерна сульфидов не влияют на окраску. Графит ассоциирует с кварцем, апатитом и кальцитом. Кварц не характерен для нефрита Кавоктинского месторождения, кальцит и апатит обычно образуют единичные мелкие зерна. Наличие кварца объясняется терригенной примесью в исходном доломите, а апатита – органикой животного происхождения. Реликтовый кальцит

отражает не столь значительную переработку исходных доломитов. Графит мог образоваться в результате метаморфизма растительной органики в доломите: аналогичная осадочным породам морфология слоев, обогащенных графитом, наличие его включений в ранних диопсиде и кварце. Другое объяснение – участие в образовании графита водорода, поступавшего по глубинному разлому. Водород мог вступать в реакцию с CO<sub>2</sub>, выделяющейся при замещении доломита силикатами с образованием H<sub>2</sub>O и графита. В результате анализа обр. 585901 получен изотопный состав δ<sup>13</sup>C –14.2‰. Сделан вывод о сочетании двух источников углерода графита в нефrite – захороненной органике и разложенной водородом CO<sub>2</sub>.

Северо-западная часть. В одном обр. 916202 из 16 изученных выявлен переход от серо-зеленого до черного цвета. В tremolite 12 образцов FeO не обнаружено, в остальных максимально 4.64 вес. %. Содержание FeO в обр. 916202 0.82–3.91 вес. %, в черной части до 14.23 вес. %, что отвечает актинолиту, только в нем обнаружены титанит и хроммагнетит. Черная окраска нефрита обр. 916202 объясняется высоким содержанием железа из-за близкого контакта с эпидот-тремолитовым скарном по амфиболиту.

Таким образом, причины черной и серой окраски нефрита различны: включения графита или хлорита, либо повышенное содержание железа в tremolite до актинолита.

Автор признателен АО «ЗГРП», персонально А. П. Сузdalницкому, С. А. Халтанову, Е. В. Раевской, Д. Б. Шаракшиновой, аналитикам И. Ю. Котовой, В. Ф. Посохову, Е. А. Хромовой и Е. В. Ходыревой. Анализы выполнены за счет гранта РНФ № 22-27-20003 с использованием оборудования ЦКП «Геоспектр» ГИН СО РАН (Улан-Удэ). Тезисы и доклад подготовлены в рамках темы НИР AAAA-A21-121011390003-9.

## ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА $\text{Ca}_{0.1}\text{Bi}_{0.883}\text{Mo}_{0.15}\text{V}_{0.85}\text{O}_4$ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ ПОЛУЧЕНИЯ ФОТОКАТАЛИЗАТОРА

Климова А.В.<sup>1,2</sup>, Михайловская З.А.<sup>1</sup>, Буянова Е.С.<sup>2</sup>

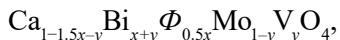
<sup>1</sup> Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия, klimova@igg.uran.ru

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России

Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, elena.buyanova@urfu.ru

Большое внимание в литературе отведено шеелитоподобным твердым растворам на основе молибдата кальция  $\text{CaMoO}_4$ , кристаллизующимся в тетрагональной структуре (пр. гр.  $I4_1/a$  ( $Z = 4$ )). Материалы со структурой шеелита применяются в качестве фотокатализаторов, сцинтилляторов, люминофоров, электрохимических устройств и др. Физические и химические характеристики шеелитоподобных сложных оксидов зависят не только от их состава, в частности, от замещения позиций  $A$  и/или  $B$ , но и от условий синтеза таких соединений.

Исследование посвящено фотокаталитическим свойствам  $\text{CaMoO}_4$ , модифицированного висмутом и ванадием с общей формулой:



где  $\Phi$  – вакансия. Ранее было установлено, что молибдаты кальция и ванадаты висмута обладают хорошей фотокаталитической активностью. С точки зрения эффективности фотокатализатора, наилучшие свойства будут проявляться у составов, активных в видимом свете, то есть у твердых растворов с минимальным значением запрещенной зоны  $E_g$ . В ходе исследования было выявлено, что минимальной шириной запрещенной зоны  $E_g = 2.62$  эВ обладает состав

$\text{Ca}_{0.1}\text{Bi}_{0.883}\text{Mo}_{0.15}\text{V}_{0.85}\text{O}_4$ , демонстрирующий поглощение в синей области видимого спектра.

Сложный оксид состава  $\text{Ca}_{0.1}\text{Bi}_{0.883}\text{Mo}_{0.15}\text{V}_{0.85}\text{O}_4$  синтезирован методом соосаждения при  $\text{pH} = 4, 5, 6$  и температурах сушки осадка 25, 230 и 500 °C. Выявлено, что осадки, полученные при 25 и 230 °C имеют выраженную аморфную структуру. После отжига при 500 °C образцы кристаллизуются в шеелитоподобной тетрагональной структуре (пр. гр.  $I_4/a$ ).

Оптические свойства исследуемых сложных оксидов аттестованы методом диффузного отражения, методом Кубелки-Мунка рассчитана ширина запрещенной зоны. Показано, что с увеличением температуры синтеза  $E_g$  уменьшается. Для образца, синтезированного при  $\text{pH} = 4$ , соответствующие значения  $E_g$  составляют 3.28, 2.69, 2.61 эВ. Такие значения запрещенных щелей соответствуют краям поглощения излучения в ~410 нм, т.е. образцы способны эффективно поглощать ближний УФ-свет.

Фотокаталитическая активность  $\text{Ca}_{1-1.5x-y}\text{Bi}_{x+y}\Phi_{0.5x}\text{Mo}_{1-y}\text{V}_y\text{O}_4$  была оценена на примере окисления 10 ppm метиленового синего (МВ) в водном растворе под воздействием УФ-LED-источника света с максимумом излучения при 405 нм. Образцы реакционной смеси объемом 10 мл отделяли через 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 часов от начала внесения источника света в фотокаталитический реактор, смеси фильтровали и снимали спектры поглощения, рассчитывали степень превращения (рис. 1). Выявлено, что максимальная степень превращения соответствует составу  $\text{Ca}_{0.1}\text{Bi}_{0.883}\text{Mo}_{0.15}\text{V}_{0.85}\text{O}_4$  ( $\text{pH} 6, 230$  °C) и составляет 80% через час облучения, составы, синтезированные при 25 °C предсказуемо проявили в основном адсорбционную активность при такой длине волны. Полученные результаты подтверждают потенциал использования данных соединений в качестве агентов для очистки сточных вод.

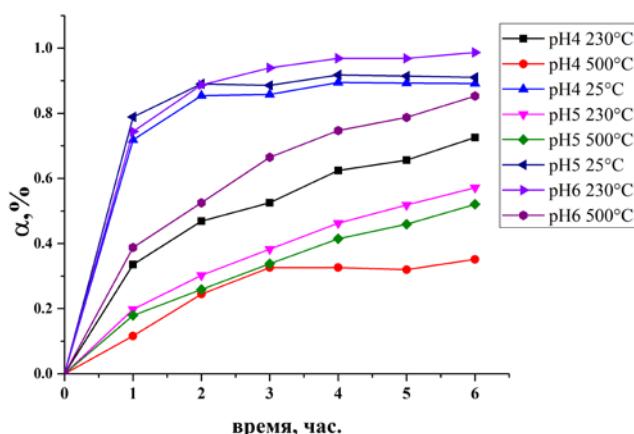


Рис. 1. Влияние условий синтеза  $\text{Ca}_{0.1}\text{Bi}_{0.883}\text{Mo}_{0.15}\text{V}_{0.85}\text{O}_4$  на степень превращения МВ от времени реакции

Работа выполнена в рамках ГБ темы ИГГ УрО РАН №124020300057-6.

## ТЕРМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ $\text{Ca}_2\text{B}_2\text{O}_5$

**Копылова Ю.О.<sup>1,2,3</sup>, Волков С.Н.<sup>1</sup>, Кржижановская М.Г.<sup>2,3</sup>, Юхно В.А.<sup>3</sup>,**  
**Аксенов С.М.<sup>1</sup>, Бубнова Р.С.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Кольский научный центр Российской академии наук, Апатиты, Россия, *yuliua.kopylova@gmail.com*

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Институт химии силикатов им. И.В. Гребеницкого, Санкт-Петербург, Россия

На сегодняшний день идентифицировано несколько полиморфных модификаций  $\text{Ca}_2\text{B}_2\text{O}_5$ : низкотемпературная  $\gamma$ -фаза [Hart, Brown, 1962; Ji et al., 1993], промежуточная  $\beta'$ -фаза и высокотемпературная  $\alpha$ -фаза [Yukhno et al., 2021]. Известна также модификация, встречающаяся в природе, — минерал шимазакиит [Kusachi et al., 2013]. В настоящей работе представлен анализ термической эволюции кристаллической структуры  $\text{Ca}_2\text{B}_2\text{O}_5$  методом монокристальной и порошковой рентгеновской дифракции. Полиморфные модификации  $\text{Ca}_2\text{B}_2\text{O}_5$  описаны с использованием суперпространственного подхода, что позволяет использовать единое описание для всех фаз, используя одинаковую элементарную ячейку.

При нагревании в кристаллической структуре  $\text{Ca}_2\text{B}_2\text{O}_5$  наблюдаются ориентационные фазовые переходы типа порядок-беспорядок:  $\gamma \leftrightarrow$  (при 784 К)  $\beta' \leftrightarrow$  (при 860 К)  $\alpha$ . Данные переходы сопровождаются изменением степени упорядоченности пироборатных групп  $\text{B}_2\text{O}_5$ . В то время как низкотемпературная lock-in  $\gamma$ -фаза содержит группы с левой и правой ориентацией, промежуточная несоразмерно модулированная  $\beta'$ -фаза содержит левоориентированные, правоориентированные и ориентационно неупорядоченные группы, что приводит к их сложному упорядочению. Левоориентированные группы заменяются правоориентированными, образуя линейные зоны шириной  $\sim 6 \text{ \AA}$ , с ориентационно неупорядоченными группами между этими зонами. В структуре высокотемпературной  $\alpha$ -фазы пироборатные группы ориентационно неупорядочены. При нагревании

координационный полиэдр стремится принять форму правильного октаэдра, в то время как седьмой атом кислорода становится более удаленным от кальция.

Тепловое расширение  $\text{Ca}_2\text{B}_2\text{O}_5$  сильно анизотропно и обусловлено сдвиговыми деформациями в плоскости моноклинности, перпендикулярно борокислородным треугольникам, и увеличением координационного полиэдра кальция. Наибольшее сжатие наблюдается для  $\beta'$ -фазы [Yukhno et al., 2021].

*Работа выполнена за счет гранта Российского Научного Фонда № 23-73-10078.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Hart P.B., Brown C.S. The synthesis of new calcium borate compounds by hydrothermal methods // J. Inorg. Nucl. Chem. 1962. V. 24. P. 1057–1065.
2. Ji Y., Liang J., Xie S., Zhu N., Li Y. Structure of  $2\text{CaO}\cdot\text{B}_2\text{O}_3$  // Acta Crystallogr. C. 1993. V. 49. P. 78–79.
3. Kusachi I., Kobayashi S., Takechi Y., Nakamuta Y., Nagase T., Yokoyama K., Momma K., Miyawaki R., Shigeoka M., Matsubara S. Shimazakiite-4M and shimazakiite-4O,  $\text{Ca}_2\text{B}_2\text{O}_5$ , two polytypes of a new mineral from Fuka, Okayama Prefecture, Japan // Mineral. Mag. 2013. V. 77. P. 93–105.
4. Yukhno V., Volkov S., Bubnova R., Povolotskiy A., Ugolkov V. High-temperature  $\gamma \leftrightarrow \beta' \leftrightarrow \alpha$  phase transitions in  $\text{Ca}_2\text{B}_2\text{O}_5$ : Thermal expansion and crystal structure of  $\alpha$ -phase // Solid State Sci. 2021. V. 121. P. 106726.

## СВЯЗЬ МЕЖДУ ВРЕМЕНЕМ КОСМИЧЕСКОГО ОБЛУЧЕНИЯ ЛУННЫХ ПОРОД НА ПОВЕХНОСТИ РОДИТЕЛЬСКОГО ТЕЛА И ДИФФУЗИОННОЙ ПОТЕРЕЙ НАКОПЛЕННЫХ ГАЗОВ

Корочанцева Е.В., Буйкин А.И., Корочанцев А.В.

*ГЕОХИ РАН, Москва, Россия, kpv-life@mail.ru*

В работе дан сравнительный анализ наших хронологических данных (включая радиационные и  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  возрасты низкотемпературных фракций) и содержания  $^{36}\text{Ar}_{\text{солн.}}$  в 9 лунных метеоритах, вещество которых находилось на родительском теле на разной глубине. Этот анализ показывает, что метеориты Dhofar 025, 1436, 1442, NWA 6888 с высокой концентрацией  $^{36}\text{Ar}_{\text{солн.}}$  ( $(270\text{--}4600) \times 10^{-8} \text{ см}^3 \text{ STP/g}$ ) имеют длительную ( $>50 \text{ Ma}$ ) экспозицию на поверхности родительского тела. В таких лунных породах наблюдается значительная потеря (до 35%)  $\text{Ar}_{\text{косм.}}$ . Для образцов Dhofar 309, 730, 733 из относительно глубоких слоев лунной коры [напр., Nishiizumi et al., 2004; Foreman et al., 2008] с низкими концентрациями  $^{36}\text{Ar}_{\text{солн.}}$  ( $<4 \times 10^{-8} \text{ см}^3 \text{ STP/g}$ ), такие параметры как радиационный возраст и потеря  $\text{Ar}_{\text{косм.}}$  меньше ( $<20 \text{ Ma}$  и  $<18\%$ , соответственно). Это может отражать тот факт, что длительное нахождение на поверхности усиливает диффузионную потерю газов, вызванную небольшими ударами и/или солнечным нагревом [напр., Turner et al., 1971; Shuster and Cassata, 2015]. Такая интерпретация подтверждается относительно молодыми  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  возрастами ( $<1 \text{ Ga}$ ), полученными для плохо удерживающих Ar низкотемпературных фаз. Более древние  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  возрасты получены для метеоритов относительно глубинного происхождения, в которых потеря  $\text{Ar}_{\text{косм.}}$  низкая, а радиационный возраст небольшой. Исключением является гранулитовая брекчия Dhofar 733 с близким к нулевому возрастом низкотемпературных фракций. Этот метеорит имеет очень небольшой радиационный возраст (0.5 млн лет), отражающий время его доставки с Луны на Землю; его вещество не подвергалось облучению на поверхности Луны. SaU 449 и Dhofar 280 содержат промежуточные количества  $^{36}\text{Ar}_{\text{солн.}}$  ( $(36\text{--}47) \times 10^{-8} \text{ см}^3 \text{ STP/g}$ ) по сравнению с обозначенными двумя группами метеоритов и имеют

вышеупомянутые характеристики обеих групп. В случае Dhofar 280, это может быть связано с влиянием нескольких интенсивных ударных событий и сложной термальной историей [Korochantseva et al., 2016].

Таким образом, сравнение радиационных возрастов, содержания  $\text{Ar}_{\text{солн.}}$  и степени потерь космогенного и радиогенного Ar лунных брекчий показывает, что длительное пребывание материала на поверхности родительского тела благоприятствует как накоплению имплантированных солнечным ветром благородных газов, в частности,  $^{36}\text{Ar}$ , так и диффузионной потере газов из пород в результате поверхностных тепловых эффектов, таких как солнечный и/или ударный нагрев.

*Исследование выполнено по теме Госзадания  
ГЕОХИ РАН.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Foreman A. B. et al. Petrography and geochemistry of Dhofar 733 – An unusually sodic, feldspathic lunar meteorite // *Lunar Planet. Sci.* 39th. 2008. #1853 pdf.
2. Korochantseva E.V. et al. Thermal and irradiation history of lunar meteorite Dhofar 280 // *Meteorit. Planet. Sci.* 2016. V. 51. P. 2334–2346.
3. Nishiizumi K. et al. Exposure and terrestrial histories of new lunar and martian meteorites // *Lunar Planet. Sci.* 35th. 2004. #1130 pdf.
4. Shuster D.L. and Cassata W.S. Paleotemperatures at the lunar surfaces from open system behavior of cosmogenic  $^{38}\text{Ar}$  and radiogenic  $^{40}\text{Ar}$  // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2015. V. 155. P. 154–171.
5. Turner G. et al.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages and cosmic ray exposure ages of Apollo 14 samples // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1971. V. 12. P. 19–35.

## ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ СИСТЕМЫ 603, 700, 787 нм В ПРИРОДНОМ АЛМАЗЕ

**Лепеха С.В.<sup>1</sup>, Васильев Е.А.<sup>2</sup>, Зедгенизов Д.А.<sup>1</sup>, Богданова Л.И.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия, Lepetka@igg.uran.ru*

<sup>2</sup>*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*

Оптически активные центры (ОАЦ) в спектрах природного алмаза являются индикаторами ростовой среды, природного облучения и деформации кристаллов. Тем не менее, достоверно неизвестна природа и слабо изучены оптические характеристики для многих ОАЦ, наблюдаемых в спектрах природного алмаза. Одной из таких ОАЦ является фотолюминесцентная (ФЛ) система бесфонаных линий (БФЛ) 603, 700, 787 нм, приуроченная к никельсодержащим дефектам кристаллической структуры (ДКС) в природном алмазе [Tretiakova, 2009]. Оптические свойства системы 603, 700, 787 нм частично представлены в работах [Плотникова, 1980; Степанов, 2019]. Ранее мы рассмотрели структуру фононных спектров и спектров возбуждения, а также температурные зависимости БФЛ 603, 700, 787 нм и представили схему энергетических уровней системы [Лепеха и др., 2024]. Для БФЛ 603 и 700 нм наблюдается расщепление возбуждённого состояния, которое можно объяснить моделью спин-разрешённых и спин-запрещённых переходов. Механизм люминесценции центра 787 нм остаётся неизвестным и представляет интерес для исследований.

Изучение термостимулированной люминесценции проводили на спектрометре Horiba Lab RAM HR 800 Evolution в ИГГ УрО РАН. Изменение температуры кристалла природного алмаза проводили с помощью системы Linkam THMS 600 в диапазоне от 80 до 450 К. Процессы ионизации и рекомбинации носителей заряда отслеживали, регистрируя ФЛ спектры с лазерным возбуждением  $\lambda_{ex} = 488$  нм.

При облучении пластиинки алмаза с системой 603, 700, 787 нм при  $T=80$  К диодным источником с  $\lambda_{ex} = 365$  нм и мощностью 3 Вт, происходит снижение интенсивности центра 787 нм; за 55 мин засветки интенсивность снижается в 3 раза. Появления

дополнительных линий в ФЛ спектре после засветки не наблюдается. Изменение интенсивности БФЛ 787 нм после засветки с ростом температуры не подчиняется закону Мотта. После 210 К интенсивность БФЛ 787 нм плавно увеличивается до температуры 270 К, затем происходит медленное плавное тушение до 450 К.

Поведение БФЛ 787 нм указывает на ионизацию ДКС с последующим захватом носителей заряда ловушками с низкой глубиной и рекомбинацией центров при комнатной температуре. БФЛ 603 и 700 нм системы устойчивы к облучению с  $\lambda_{ex} = 365$  нм.

*Работа выполнена в рамках темы №123011800012-9 государственного задания ИГГ УрО РАН.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Лепеха С.В., Васильев Е.А., Зедгенизов Д.А., Савченко С.С., Вайнштейн И.А. Энергетические уровни люминесцентной системы 603/700/787 nm в природном алмазе //Оптика и спектроскопия. 2024. Т. 132 (7). С. 733–739.
2. Плотникова С.П., Клюев Ю. А., Парфианович И.А. Длинноволновая фотолюминесценция природных алмазов // Минералогический журнал. 1980. Т. 2(4). С. 75–80.
3. Степанов Ф.А., Емельянова А.С., Ракевич А.Л. и др. Особенности температурных зависимостей спектров красной фотолюминесценции алмазов // Известия РАН. Серия физическая. 2019. Т. 83 (3), С. 371–375.
4. Tretiakova L., Spectroscopic methods for the identification of natural yellow gem-quality diamonds // Eur. J. Mineral. 2009. Vol. 21. P. 43–50.

## СРАВНЕНИЕ ТЕКТИТОВ И ИРГИЗИТОВ ПО ДАННЫМ ИК, ЭПР И МЁССБАУЭРОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Лысюк А.Ю.

*Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия*

Природные силикатные стёкла зачастую формируются в экстремальных условиях кратковременного высокоэнергетического воздействия на кристаллические породы. Выброшенные ударной волной в атмосферу фрагменты расплава, приобретают застывшие аэродинамические формы со структурами закалки, известные как тектиты. Мы провели сравнительные исследования тектитов (австралиты) – ТК1, ТК2 и иргизита – Ж-1 по единой схеме на одном спектроскопическом оборудовании методами инфракрасной спектроскопии с Фурье-преобразованием (ИКС), электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и Мёссбауэрской спектроскопии. Изученные образцы содержат от 60–70 мас. %  $\text{SiO}_2$ , от 10–13 мас. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , около 5%  $\text{FeO}$ .

**ИК-спектроскопия.** В ИК-спектрах всех образцов стёкол зарегистрированы интенсивные полосы поглощения в области 900–1200 и 400–600  $\text{cm}^{-1}$ , а также слабое поглощение или его следы в области 900–700  $\text{cm}^{-1}$ . Даные полосы поглощения характерны для всех силикатных стёкол, их относят к валентным и деформационным колебаниям кремнекислородного каркаса. Доминирующая полоса поглощения в области 900–1200  $\text{cm}^{-1}$  относится к валентным колебаниям O-Si связей кремнекислородного каркаса. Полоса 700–900  $\text{cm}^{-1}$  возникает за счёт колебаний кремнекислородных тетраэдров друг относительно друга, симметричных колебаний Si – O – Si связей. Полоса поглощения в области 400–600  $\text{cm}^{-1}$  связана с деформационными колебаниями связей внутри кремнекислородных группировок и их сочленения. Максимум полосы валентных O-Si колебаний в спектрах ТК1, ТК2, Ж-1 находится в диапазоне 1075–1079  $\text{cm}^{-1}$ , полоса симметричных валентных колебаний Si-O-Si хорошо проявлена и имеет максимум при 795–800  $\text{cm}^{-1}$ .

**Спектры ЭПР.** Основные компоненты спектров ЭПР природных стёкол связаны с наличием в его составе ионов  $\text{Fe}^{3+}$  в растворенной форме или в виде включений железистых фаз. В спектрах ЭПР почти симметричная полоса шириной  $\Delta B_{pp} = 50–70$  мТ и g-фактором 2.08 (обр Ж-1, ТК1) или 2.01 (ТК2), предположительно обусловлена кластерами трехвалентного железа в каркасе стекла (ТК1, ТК2) или железооксидными включениями (Ж-1).

Мёссбауэрские спектры  $^{57}\text{Fe}$  позволяют получить количественные характеристики распределения железа по различным структурным позициям. Мессбауэрский спектр иргизита (Ж-1) хорошо воспроизводятся суммой трех дублетов. Дублет  $\text{Fe}^{2+}_{VI}$  (I) с IS = 1.12, QS = 2.1–2.2 мм/с соответствуют октаэдрической позиции ионов. Второй дублет имеет меньшее квадрупольное расщепление (1.6–1.8 мм/с) и изомерный сдвиг. Изомерный сдвиг 0.4 мм/с дублета  $\text{Fe}^{3+}$  соответствует октаэдрической позиции, а большая величина QS (1.3 мм/с) и ширина пиков (0.94 мм/с) отражают широкий диапазон вариаций степени ее искажения. В тектитах, в отличие от иргизита, практически все железо находится в двухвалентном состоянии. Такое аномально низкое значение доли трехвалентного железа является надежно установленным характеристическим признаком тектитов. Тогда как для иргизитов характерна повышенная [Русаков, и др., 2007] степень окисления железа.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Русаков В.С., Воловецкий М.В., Луканин О.А. Мёссбауэрские исследования природных стёкол ударного и вулканического происхождения // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2007. № 3. С. 57–62.

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА МЕТОДОМ ОСАЖДЕНИЯ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ, СТРУКТУРУ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА $\text{LaPO}_4$

Мандрыгина Д.А., Михайловская З.А., Щапова Ю.В.

Институт геологии и геохимии имени академика А.Н. Заваруцкого  
УрО РАН, Екатеринбург, Россия, roxyshinoda@gmail.com

Ортофосфат лантана со структурой монацитита является подходящим материалом-хозяином редкоземельных элементов для высокоэффективных люминофоров с настраиваемой многоцветной эмиссией. Условия растворных методов синтеза, в которых главным промежуточным продуктом является гидратированная форма фосфатов  $\text{LaPO}_4 \times 0.5\text{H}_2\text{O}$  со структурой рабдофана, могут оказывать заметное влияние на люминесцентные свойства получаемых люминофоров.

В настоящей работе методами рентгеновской дифракции, инфракрасной спектроскопии, комбинированного рассеяния света и катодолюминесценции (КЛ) определено влияние pH осаждения и температуры отжига ( $\text{pH} = 2-3$ ,  $T = 200-1000^\circ\text{C}$ ) на структуру и люминесцентные свойства продуктов и промежуточных соединений в процессе синтеза  $\text{LaPO}_4$  методом соосаждения. Высокотемпературный ( $T=1000^\circ\text{C}$ ) отжиг приводит к образованию кристаллической однородной на микроуровне моноклинной монацитовой фазы с широкой полосой собственной катодолюминесценции  $\sim 440\text{ нм}$  (2.6 и 2.9 эВ), обусловленной вакансиями кислорода. На промежуточной стадии синтеза ( $T = 800^\circ\text{C}$ ) в продуктах присутствуют следы полифосфатов  $\text{LaP}_3\text{O}_9$  и  $\text{La}_7\text{P}_3\text{O}_{18}$ , и в спектрах люминесценции, наряду с полосой  $\sim 440\text{ нм}$ , наблюдается полоса  $\sim 713\text{ нм}$  ( $\sim 1.75\text{ эВ}$ ). На начальных этапах синтеза ( $T < 800^\circ\text{C}$ ) в спектрах присутствует слабая УФ-полоса эмиссии при  $\sim 345\text{ нм}$  ( $\sim 3.6\text{ эВ}$ ), относительная интенсивность которой существенно зависит от величины pH. УФ-полосу  $\sim 345\text{ нм}$  можно рекомендовать в качестве индикатора незавершенного процесса синтеза.

Результаты могут быть использованы для разработки материалов с регулируемой люминесценцией на основе допированного  $\text{LaPO}_4$ , получаемого методом соосаждения. Полученная информация полезна также для анализа метастабильных природных фосфатов РЗЭ, образующихся в гидротермальных процессах.

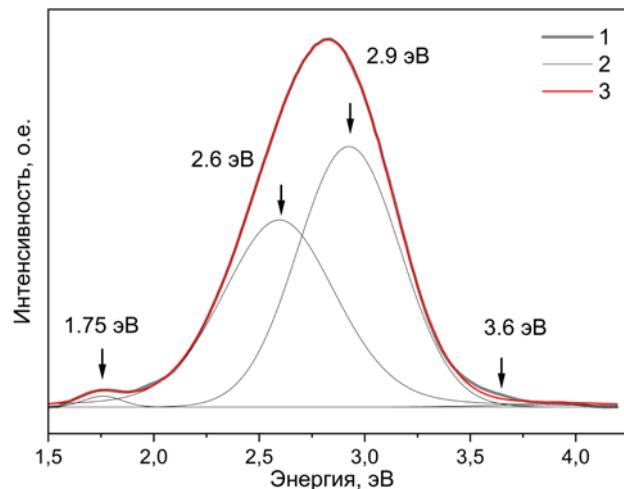


Рис. 1. Спектр КЛ  
образца LP3-1000 ( $\text{pH} = 3$ ,  $T = 1000^\circ\text{C}$ )

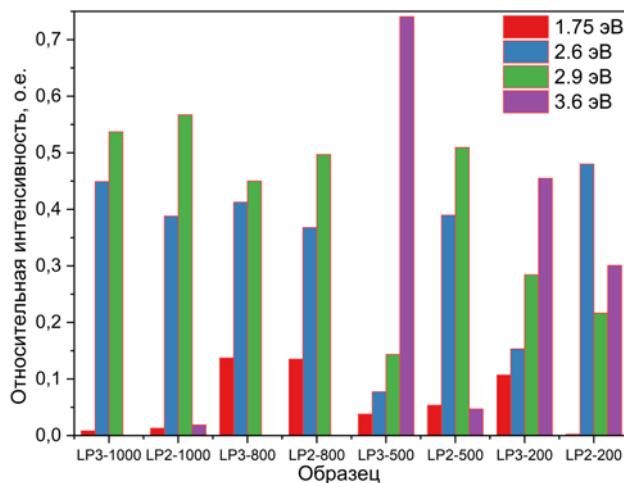


Рис. 2. Диаграммы относительной интегральной интенсивности максимумов КЛ 1.75, 2.6, 2.9 и 3.6 эВ в зависимости от условий синтеза образцов LP i-j (где i – значение pH синтеза, j – значение температуры отжига)

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН в рамках Государственного задания ИГГ УрО РАН по теме № 124020300057-6.

## БИОГЕННЫЕ АГРЕГАТЫ

**Машина Е.В.**

*ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, Россия, mashina@geo.komisc.ru*

В область исследования биоминералогии входят агрегаты, формирующиеся в организме человека в результате патологических процессов [Кораго, 1992]. К одним из таких агрегатов относятся холелиты (желчные камни). Механизмы их образования недостаточно еще изучены. По данным современных исследований происходит неуклонный рост холелитиаза среди населения. Изучение вещественных и структурных особенностей холелитов необходимы для выявления механизма их формирования в организме человека и в целях профилактики камнеобразования.

Целью работы явилось исследование холелитов с использованием широкого комплекса методов традиционных для минералогии. Объектами послужили холелиты жителей Республики Коми. В ходе исследования применялись методы: рентгенофазный (Shimadzu XRD-6000), ИК-спектроскопия поглощения (ИнфраЛюм ФТ-02), термический (TGA/DSC 3+). Сколы образцов изучены с помощью аналитического сканирующего электронного микроскопа VEGA3 TESCAN с энергодисперсионной приставкой X-Max.

**Холестериновые холелиты.** Агрегаты имеют различные оттенки от молочно-белого до бежевого цвета, размеры от 1 до 4 см. Исследования методом рентгенофазного, ИК-спектроскопии и термического анализа показали, что кристаллические холелиты сложены моногидратом холестерина. В образцах холестерин имеет пластинчатый облик кристаллов, а также образует структуры в виде дендритов и сферолитов. Помимо холестерина, в некоторых холелитах установлена минеральная компонента – карбонат кальция (кальцит, ватерит, арагонит) и фосфат кальция. Арагонит и кальцит присутствуют в виде игольчатых и таблитчатых кристаллов, ватерит имеет окружную форму. Арагонит образует наслоения на кристаллическом холестерине. Ватерит в объеме холелитов распределен неравномерно. Фосфат кальция установлен в центре образцов и выступал

ядром для отложения холестерина. Данные анализов свидетельствуют, что фосфат кальция, является нестехиометрическим карбонатгидроксилапатитом (замещение В-типа). В холестериновых агрегатах микрозондовым анализом установлены микроминеральные фазы представленные классами оксидов, хлоридов, сульфатов и силикатов. Также обнаружены включения различных металлов – цинка, свинца и др.

**Пигментные холелиты.** Агрегаты имеют черный цвет и размеры до 2 см. Исследования методом рентгенофазного анализа показали, что вещество пигментных холелитов рентгеноаморфно. Для некоторых образцов регистрируются отражения, соответствующие минеральной компоненте – арагониту и кальциту. Согласно данным ИК-спектроскопии в состав всех образцов входит билирубинат кальция, в отдельных отмечен фосфат кальция. В агрегатах фосфат кальция выступает в качестве ядра, а карбонат кальция образует зональность вокруг органического пигментного вещества или чередуется с ним. Данные анализов свидетельствуют, что фосфат кальция, является нестехиометрическим карбонатгидроксилапатитом (замещение В-типа). В результате исследования пигментных агрегатов микрозондовым анализом в них установлены различные микроминеральные фазы (оксиды, хлориды, сульфиды, силикаты, оксалаты) и металлические соединения.

Таким образом, холелиты представляют собой сложноорганизованные агрегаты, состоящие из кристаллического (моногидрат холестерина) или аморфного (билирубинат кальция) органического вещества и различной неорганической минеральной компоненты.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Кораго А.А. Введение в биоминералогию. Санкт-Петербург: «Недра». 1992. 279 с.

## ПОСТМАГМАТИЧЕСКИЕ МИНЕРАЛЫ АПАТИТ-НЕФЕЛИНОВЫХ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЯ КУКИСВУМЧОРР

Мирсаяпова И.Ф., Ситдикова Л.М.

Казанский (Приволжский) Федеральный Университет, Казань, Россия,  
*ilnaraillnarochka@gmail.com, sitdikova8432@mail.ru*

Тектонические процессы формирования апатит-нефелиновых рудных тел месторождения Кукисвумчорр подразделяются на этапы: дорудный, внутрирудный и пострудный. Дорудный этап – формирование конических разломов, во втором – пластические деформации с первичной расслоенностью, пологой складчатости, сопровождавшийся появлением нарушений взбросо-надвигового типа. В заключительной части второго этапа формировались рудные брекчии. В пострудный этап – внедрение даек и образование зоны гипергенеза. Апатит-нефелиновые руды подразделяются на структурно-вещественные типы: пятнистые, линзовидно-полосчатые, блоковые, сетчатые, вкрапленные, массивные, брекчевые. Особая группа – «окисленные» апатит-нефелиновые руды с процессами поздней переработки – шпруштейнизации, в результате которого происходит замещение нефелина полупрозрачным пелитоподобным агрегатом группы вторичных минералов: натролитом, цеолитом, гидрослюдами, лимонитом и др. при уменьшении процента в руде количества нефелина [Арманд и др., 1972].

Изучение комплекса вторичных минералов связано с трудностью их выделения и анализа только классическими оптико-петрографическими методами. Для изготовления петрографических шлифов был использован метод, который используется для минералов группы солей, т. к. эти минералы легко растворяются в воде. Для исследования постмагматических минералов был использован комплекс физических методов: рентгенофазовый анализ, рамановская спек-

троскопия, ИК-спектроскопия, изучение отдельных минералов под ультрафиолетовым облучением.

Полученные результаты свидетельствуют, что в апатит-нефелиновых рудах наибольший интерес представляют следующие постмагматические минералы, охарактеризованные по температурам их образования и месту локализации: по отдельным прожилкам – формируются титанит, пирротин. Виллиомит и минералы группы цеолитов, такие как натролит, пектолит, больше приурочены к кавернозным участкам породы. Минералы: натрофосфат совместно с нахпоитом и мелкие агрегаты виллиомита больше локализованы в более крупных секущих прожилках. Участками натрофосфат в породе может замещаться нахпоитом и дорфманитом.

Изученная группа натриевых минералов образуется в условиях низких температур и высокого содержания натрия, что характерно для гидротермально-метасоматических процессов. Образование этих минералов связаны с процессами выщелачивания и образования карбонат содержащих минералов, таких как, пектолит и др. при воздействии натриевых растворов, что также оказывается на качестве апатитового сырья данных участков рудного тела месторождения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Арманд А.Л., Зак С.И., Каменев Е.А., Минаков Ф.В., Михеичев А.С., Петерсилье И.А. Хибинский щелочной массив. Л., «Недра», 1972. 176 с.

## ТВЕРДОФАЗНЫЙ СИНТЕЗ КАЛЬЦИЙ МАГНИЕВЫХ СИЛИКАТОВ ИЗ ЦЕОЛИТ -КРЕМНИСТОЙ ПОРОДЫ

Мишагин К.А.<sup>1</sup>, Дутова В.С.<sup>2</sup>, Шакиров Т.Р.<sup>3</sup>, Готлиб Е.М.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> ВИАМ, Москва, mishagin\_krill@gmail.com

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «КНИТУ -КАИ», Казань, Россия, vary43791@yandex.ru

<sup>3</sup> ФГБОУ ВО «КНИТУ», Казань, Россия, egotlib@yandex.ru, timurtnvm@yandex.ru

Импортозамещение в производстве кальциймагниевых силикатов (КМС), как востребованных минеральных наполнителей, может значительно снизить зависимость от зарубежных поставок и способствовать развитию отечественной промышленности и строительства. Перспективным сырьем для их синтеза, вследствие своего минерального состава, является цеолит -кремнистая порода (ЦКП).

КМС синтезировали твердофазным методом при температурах 1100 °С из ЦКП, как источника аморфного диоксида кремния и оксида кальция, и кальцита или доломита, как природных карбонатов. Рентгенографический количественный фазовый анализ проводился с использованием дифрактометра настольного типа POWDIX 600. Пористость определялась на анализаторе «TOP 200» (Altamira Instruments, LLC) статическим волюметрическим методом низкотемпературной адсорбции азота, общий объем и средний диаметр пор рассчитывались по методу BJH.

Достаточно высокие показатели удельной площади поверхности пор, как по методу БЭТ (87,7 см<sup>2</sup>/г), так и динамического рассеивания света (6070 см<sup>2</sup>/см<sup>3</sup>) должны обеспечить высокую реакционно-способность ЦКП в процессе силикатообразования.

Наибольшее содержание волластонита (до 75%) в продуктах твердофазной реакции достигается при молярном соотношении SiO<sub>2</sub> : CaO равным 1 : 0,8–0,9. При этом, основной примесью является ларнит, концентрация которого достигает до 20%. При избытке ЦКП в шихте, в составе напол-

нителя много не прореагировавшего оксида кальция (до 22%), а при недостатке кремний содержащего компонента – кристобалита (до 25%)

Максимальное содержание диопсида (до 84%) в КМС также достигается при избытке в исходной смеси ЦКП, те при соотношении ЦКП: доломит 1 : 680,8. При этом основным примесным компонентом является не прореагировавший доломит. Однако при недостатке кремний содержащего компонента (ЦКП: доломит 0,8:1) продукт реакции содержит только 24% диопсида, 51% акерманита и 25% форстерита.

Общий объем пор КМС с максимальным содержанием волластонита – 0,0018, диопсида – 0,017 м<sup>3</sup>/г, а их средний диаметр 4,1 и 12,9 нм, т. е волластонит содержащий наполнитель более пористый.

Полученные волластонит и диопсид содержащие наполнители практически не имеют частиц с игольчатой структурой [Мишагин и др. 2023], они характеризуются малым соотношением сторон и неправильной формой частиц, размер которых у диопсида меньше.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Мишагин К.А., Ямалеева Е.С., Готлиб Е.М., Хацринов А.И. Получение волластонита из цеолитсодержащей породы методом твердофазного синтеза // Вестник ВГУИТ. 2023. Т. 85. № 3. С. 101–106.

## ИЗМЕНЕНИЕ ОКРАСКИ МАЛОМЕДИСТОГО БОРНИТА ВОЛКОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ В ДИНАМИКЕ

Морохин А.И.<sup>1</sup>, Королева М.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, Россия, alexey.morokhin@gmail.com

<sup>2</sup> ИХ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, Россия, marikorolevas@gmail.com

Борнит – важный промышленный минерал, изменение (окисление) его поверхности имеет первостепенное значение на эффективность переработки медных руд. Согласно опубликованным данным борнит может иметь разную окраску. В порядке увеличения содержания меди различают борниты оранжевой и розовой, вплоть до фиолетовой окраски [Large et al., 1995].

Большая часть работ, посвященных свойствам борнита выполнена на основе изучения стехиометрического минерала [Mikhlin et al., 2005]. Поверхностные свойства маломедистого борнита остаются неясными ввиду его сильной изменчивости, затрудняющей процесс его изучения с применением разных методов.

На Волковском месторождении (Средний Урал) встречаются 3 разновидности борнита с дефицитом меди в составе ( $\text{Cu}_{4.62-4.83}\text{Fe}_{1.01}\text{S}_4$ ) – фиолетовый, розовый и оранжевый, название которых связывают с измененной (конечной) окраской поверхности [Морохин, Шумилова, 2024]. В данной работе приводятся результаты изучения изменения окраски маломедистого розового борнита Волковского месторождения.

Методом исследований является оптическая спектроскопия, выполненная на спектрофотометре Schimadzu UV 2600i, оснащенном интегрирующей сферой ISR-2600. Съемка оптических спектров отражения производилась при комнатной температуре, влажность воздуха 20–25%, спектры снимались начиная со свежеполированной поверхности до окончательного изменения окраски борнита. Отсчет времени производился с момента полировки поверхности, далее через 6, 30, 48, 72 часа, между съемками соблюдались стабильные условия хранения образцов. Спектры диффузного отражения получены в диапазоне длин волн 200–900 нм с шагом 0.5 нм. По спектрам диффузного отражения выявлена динамика изменения окраски поверхности розовой разновидности борнита [Морохин и др., в печати].

Изначально минимум отражения находится при 450 нм и постепенно в течение 3 суток смещается в длинноволновую область до 465 нм, что свидетельствует об изменении оранжево окраски до розовой, указывающем на скорость окисления поверхности борнита. Результаты исследования могут быть использованы для разработки независимого критерия выделения разновидностей борнита и прогнозирования технологических показателей переработки медных руд.

*Авторы выражают благодарность Т.Г. Шумиловой за научные консультации.*

*Работа проведена в рамках темы НИР ГР № 122040600009-2.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Морохин А. И., Шумилова Т. Г. Особенности минералогии разновидностей борнита Волковского месторождения (Средний Урал, Россия) // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: XVIII Геологического съезда Республики Коми. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2024. Т. III. С. 284.
2. Морохин А.И., Королева М.С., Шумилова Т.Г., Исаенко С.И. Свойства поверхности маломедистого борнита в динамике // Литосфера (в печати).
3. Large D.J., MacQuaker J., Vaughan D.J., et al., Evidence for Low-Temperature Alteration of Sulfides in the Kupferschiefer Copper Deposits of Southwestern Poland // Econ. Geol. 1995. V. 90. P. 2143–2155.
4. Mikhlin Y., Tomashevich Y., Tauson V., Vyalikh D., Molodtsov S., & Szargan R. A comparative X-ray absorption near-edge structure study of bornite, Cu<sub>5</sub>FeS<sub>4</sub>, and chalcopyrite, CuFeS<sub>2</sub> // Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena. 2005. V. 142(1). P. 83–88.

## ДАТАСЕТ СПЕКТРОВ СРАВНЕНИЯ ПОЛИАРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ ДЛЯ ПОИСКА В МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЕ

Накибов Р.С., Картеева В.М., Ожиганов М.Э., Медведев М.Г., Васюнин А.И.

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия, nakibov.ruslan@urfu.ru

Формирование и химия полиароматических углеводородов (ПАУ) является одной из наиболее активно развивающихся тем в современной астрохимии. Лабораторными методами исследуются новые пути формирования, приводящие, в конечном счёте, к образованию более сложных углеродных молекул. Эта информация используется в моделях, способных рассчитывать эволюцию распространённости тех или иных веществ. Последним компонентом является анализ наблюдательных данных, где можно было бы использовать лабораторные данные и тестировать модельные гипотезы о формировании молекул. Несмотря на то, что ПАУ распространены на межзвездной пыли и дают ощутимый вклад с выделенными полосами испускания, конкретные молекулы обнаружить сложно – вклад в излучение дают

обширные структуры – связанные ароматические кольца, покрывающие пыль.

Для поиска небольших простейших ПАУ (бензол, толуол, и т. д.) нами на сверхвысоковакуумной криогенной установке ISEAge был подготовлен датасет спектров, содержащий чистые полиароматические углеводороды и их водные смеси с соотношением 1 к 20 в пользу воды. Предполагается, что данные с космического телескопа James Webb Space Telescope (JWST) и полученный нами датасет спектров сравнения позволят найти или хотя бы ограничить верхний предел распространённости ПАУ.

*Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-12-00315.*

## ПРИРОДА ОКРАСКИ ТУРМАЛИНОВ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПАПРОК (АФГАНИСТАН)

Нафигуллина Е.Р.<sup>1</sup>, Николаев А.Г.<sup>2</sup>, Аксенов С.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Лаборатория арктической минералогии и материаловедения

ФИЦ Кольский научный центр РАН, г. Анадырь, Россия, E-mail: Nalera@list.ru

<sup>2</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

E-mail: Anatolij-nikolaev@yandex.ru

Минералы группы турмалина (МГТ) с общей формулой  $XY_3Z_6[T_6O_{18}] [BO_3]_3V_3W$  ( $X=Na, K, Ca, \square; Y=Li, Mg, Fe^{2+}, Mn^{2+}, Cu^{2+}, Al, V^{3+}, Cr^{3+}, Fe^{3+}, Mn^{3+}, Ti^{4+}; Z=Mg, Fe^{2+}, Al, V^{3+}, Cr^{3+}, Fe^{3+}; T=Si, B, Al; V=OH, O; W=OH, F, O$ ) характеризуются большим разнообразием цветов, охватывающих всю гамму спектра. Широкие вариации окраски кристаллов делают МГТ популярным ювелирным сырьем, а их разнообразие связано с особенностями химического состава и распределением микропримесей по ключевым позициям кристаллической структуры. В настоящей работе изучена природа окраски МГТ из месторождения Папрок (Афганистан) и выявлены локальные особенности их строения по данным оптической спектроскопии. Все образцы МГТ имели яркий желтый, зеленый и голубой цвет с вариацией различных оттенков.

Оптические спектры поглощения получены на стандартизированном спектрофотометре МСФУ-К. Регистрация производилась в интервале длин волн 400–800 нм, с шагом 1 нм. Все колориметрические результаты по интерпретации оптических спектров поглощения минералов были нанесены на стандартный цветовой треугольник международной комиссии по освещению. Колориметрические параметры исследуемых минералов рассчитывались с использованием специализированной программы «Спектр».

Общей особенностью оптических спектров поглощения турмалинов является наличие двух широких интенсивных полос поглощения в видимой области на длине волны 715 нм [Платонов и др., 1984; Бахтин, 1985]. Конфигурация спектров поглощения и значение энергий позволяет приписать наблюдаемые полосы электронным переходам в ионах  $Fe^{2+}$  [Свиридов и др., 1976], которые изоморфно входят в октаэдрические

$Y$ -позиции. Полосы поглощения, связанные с ионами  $Fe^{2+}$  в спектрах обусловлены разрешенными по спину переходами с основного состояния терма  $^5T_{2g}$  на более высокий энергетический уровень  $^5E_g$  соответственно. Низкая локальная симметрия  $Y$ -позиции способствует расщеплению и вырождению  $^5E$ -уровня кристаллическим полем, что в свою очередь дает в спектрах две полосы поглощения в области 715 нм. Полоса поглощения в районе 510–530 нм связана по своему характеру и положению в спектре с ионами  $Mn^{3+}$  в  $Y$ -позиции, в которых разрешены по спину ионные  $d-d$  переходы  $^5E_g \rightarrow ^5T_{2g}$ .

В зависимости от вариации двух этих центров окраски в изучаемых турмалинах происходит изменения цвета. В голубых турмалинах присутствует исключительно полоса поглощения на длине волны 715 нм. В розовых турмалинах присутствует только полоса на длине волны в районе 510–530 нм, а в желтых образцах присутствуют обе вышеописанные полосы поглощения.

## ЛИТЕРАТУРА

- Бахтин А.И. Породообразующие силикаты: Оптические спектры, кристаллохимия, закономерности окраски, типоморфизм. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1985. 192 с.
- Платонов А.Н., Таран М.Н., Балицкий В.С. Природа окраски самоцветов. М.: Изд-во Недра, 1984. 196 с.
- Свиридов Д.Т., Свиридова Р.К., Смирнов Ю.Ф. Оптические спектры ионов переходных металлов в кристаллах. М.: Изд-во Наука, 1976. 266 с.

## СЕРТИФИКАЦИЯ ДРАГОЦЕННЫХ КАМНЕЙ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

**Николаев А.Г.<sup>1</sup>, Попов М.П.<sup>2</sup>, Нуриева Е.М.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия,  
*Anatolij-nikolaev@yandex.ru*

<sup>2</sup> Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия,  
*popovm1@yandex.ru*

Эффективность использования камнесамоцветного сырья во многом зависит от всесторонней изученности свойств драгоценных камней, прежде всего которые определяют их красоту и ювелирные характеристики. Важнейшее из характеристик – цветовая окраска, особенности которой положены в основу деления драгоценных камней ювелирные и торговые сорта. Экспериментальное изучение природы и особенности окраски драгоценных камней имеет важное значение для объективного понимания причин, которые привели к возникновению у них различных оттенков и цветовых тонов. Важнейшее в исследование природы окраски драгоценных камней является объективного измерения и регистрация цветовых координат. Этот аспект имеет особое практическое значение для сортировки драгоценных камней по цветовым характеристикам [Платонов, 1984].

Целью данной работы заключалось в исследование драгоценных камней 1 класса и выявления природы их окраски и сертификации по цвету по существующим стандартам РФ. В работе использовалась представительная коллекция алмазов (бриллиантов), рубинов, сапфиров, изумрудов, александритов. Перед исследованиями цвета, изучаемые драгоценные камни проходили визуальную сертификацию по цветовым группам.

Основной метод исследования в данной работе – оптическая абсорбционная спектроскопия. Оптические спектры поглощения записывались на специализированном спектрофотометре МСФУ – К. Регистрация оптических спектров поглощения производилась в интервале длин волн 380–800 нм, с шагом 1 нм. Все колориметрические результаты по интерпретации оптических спектров поглощения минералов были вынесены на стандартный цветовой треугольник международной комиссии по освеще-

нию (МКО-1931). Колориметрические параметры исследуемых минералов (x, y, z – коэффициенты цветности:  $\lambda$  – длина волны, p – густота, L – яркость основного цветового тона) рассчитывались с использованием специализированной программы «Спектр». Дополнительно оптические спектры записывались на стандартизированном спектрофотометре SHIMADZU UV-3600 в диапазоне длин волн 185–3300 нм.

В природных алмазах за окраску отвечает различные оптические центры N и B, в рубинах ионы Cr<sup>3+</sup>, в сапфирах ионы и комплексы хромофоров Ti<sup>4+</sup>, Fe<sup>2+</sup> и Fe<sup>3+</sup>, в изумрудах и александритах Cr<sup>3+</sup>, Fe<sup>2+</sup> и Fe<sup>3+</sup>. Эти центры окраски создают основные цветовые тона и в зависимости от их соотношения в изучаемых драгоценных камнях появляются различные дополнительные оттенки. Измерения параметров цветовой окраски, которые связаны с цветовыми координатами хорошо фиксируются по оптическим спектрам поглощения. Данная методика позволит выделять цвета у различных природных минералов и послужить для создания цифровых эталонов для сертификации цвета у драгоценных камней.

Оптическая спектроскопия остается незаменимым инструментом в геммологии, обеспечивая точную и объективную сертификацию драгоценных камней. Развитие технологий и применение новых методик усилит её роль в борьбе с фальсификациями и стандартизации рынка.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Платонов А.Н., Таран М.Н., Балицкий В.С. Природа окраски самоцветов. М.: Изд-во Недра, 1984. 196 с.

## КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД ПРИ ИЗУЧЕНИИ КРИСТАЛЛОВ $MIn_5S_8$ ( $M = K, Rb, Cs$ ): РАМАНОВСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ, КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

Панкрушина Е.А.<sup>1</sup>, Рогинский Е.М.<sup>2</sup>, Печурин М.С.<sup>1</sup>, Чареев Д.А.<sup>3</sup>, Вотяков С.Л.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заваруцкого

УрО РАН, Екатеринбург, Россия, lizaveta.94@list.ru

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Институт экспериментальной минералогии им. академика Д.С. Коржинского РАН, Черноголовка, Россия

Теплопроводность, обусловленная решеточными колебаниями,— одна из ключевых характеристик, которая определяет область технических применений материалов. Перенос тепла фононами зависит, в том числе, от их взаимодействия между собой, последнее определяется ангармонизмом колебаний решетки; известно [Heremans, 2015], что за счет усиления ангармонизма для ряда соединений можно значительно уменьшить их теплопроводность  $\kappa_L$ .

С целью определения механизмов ангармонизма на микроскопическом уровне этот эффект активно изучается в рамках нового научного направления «инженерии ангармоничности» [Heremans, 2015] с применением различных расчетных и экспериментальных методик, разрабатываются подходы для получения материалов с заданными термическими характеристиками. Соединения халькогенометаллатов 13 группы и щелочных металлов – перспективные функциональные материалы [Winkler et al., 2015]. Слоистые щелочные тиоиндаты  $MIn_5Q_8$  рассматриваются нами как модельные примеры для изучения ангармонизма с использованием рамановской *in situ* спектроскопии и *ab initio* расчетов.

В настоящей работе в рамках квазигармонического приближения (QHA) для  $MIn_5S_8$  ( $M=K, Rb, Cs$ ) выполнены расчеты коэффициентов термического расширения и объемного модуля упругости: при 300 К они составляют 3.90, 3.08 и  $5.09 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  и 37.23, 37.10 и 40.54 ГПа, соответственно.

Установлено, что для соединения  $RbIn_5S_8$  характерен незначительный температурный диапазон 0–20 К с отрицательным тепловым расширением. С использованием феноменологического подхода получены значения для теплопроводности  $\kappa_L$ , обусловленной

фонон-фононным взаимодействием, составляющие 0.41, 0.27, 0.93 Вт/ (м·К) для  $KIn_5S_8$ ,  $RbIn_5S_8$ ,  $CsIn_5S_8$ , соответственно; температура Дебая  $\Theta_D$ , определенная подгонкой зависимости теплоемкости  $C_V(T)$ , составляет 82.5, 60.0, 140.9 К; параметр Грюнайзена  $\gamma=0.90$ , 0.67, 1.30. Минимальные значения  $\kappa_L$  и  $\gamma$  характерны для  $RbIn_5S_8$ , что косвенно указывает на более сильную ангармоничность его решетки.

На основе анализа экспериментальных термо- и барорамановских данных по тиоиндатам с использованием подхода, основанного на представлении общего ангармонизма (сдвига частоты фона при повышении температуры) как объемного расширения (неявного вклада) и фонон-фононного взаимодействия (явного вклада) показано, что для большинства раманактивных фононных мод явный вклад преобладает над объемным во всех изученных соединениях  $MIn_5S_8$  ( $M=K, Rb, Cs$ ).

Полученные данные существенно расширяют представление о слоистой структуре тиоиндатов и позволяют продвинуться в понимании основных принципов инженерии ангармоничности.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ, проект №24-73-00009.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Heremans J.P. The anharmonicity blacksmith. // Nature Physics. 2015. V. 11. No 12. P. 990–991.
2. Winkler V., Schlosser M., Pfitzner A. Synthesis and Crystal Structures of  $Rb_4A_{12}S_5$  and  $Cs_4In_2S_5$  // Z. fur Anorg. Allg. Chem. 2015. V. 641. №. 3-4. P. 549–556.

## ОЦЕНКИ ВОЗРАСТА ПАР АСТЕРОИДОВ СЕМЕЙСТВА EMILKOWALSKI НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЕРОЯТНОСТНОЙ ЭВОЛЮЦИИ ОРБИТ

Перминов А.С., Кузнецов Э.Д., Сафонова В.С.

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия,  
*alexander.perminov@urfu.ru, eduard.kuznetsov@urfu.ru, v.s.safronova@urfu.ru*

Молодое семейство астероидов Emilkowalski расположено в средней части Главного пояса (большая полуось орбиты 2.60 а. е., эксцентриситет 0.15, наклон 17.75°). В настоящее время известно 13 членов семейства [Kuznetsov et al., 2025a]. Анализ схождений линий узлов и апсид на основе результатов численного моделирования динамической эволюции номинальных орбит позволил оценить возраст пар и построить предварительный сценарий формирования семейства Emilkovalski [Kuznetsov et al., 2025b].

Полученные оценки возраста пар существенно зависят от начальных значений элементов орбит и скорости дрейфа больших полуосей орбит вследствие влияния эффекта Ярковского. Для уточнения оценок возраста пар в рамках построенного сценария формирования семейства Emilkowalski было выполнено исследование вероятностной эволюции орбит. Использовалась программа Orbit9, входящая в комплекс программ OrbFit (<http://adams.dm.unipi.it/~orbmaint/orbfit/>). Элементы орбит астероидов и ковариационные матрицы были взяты из базы данных AstDyS (<https://newton.spacedys.com/astdys/>). При моделировании учитывались возмущения от восьми больших планет, карликовой планеты Плутон, сжатия Солнца, релятивистских возмущений и влияние эффекта Ярковского. Действие эффекта Ярковского учитывалось в форме векового дрейфа большой полуоси орбиты. Для астероидов (14627) Emilkowalski, (126761) 2002 DW10, (224559) 2005 WU178, (256124) 2006 UK337, (434002) 2000 SM320 известно положение оси вращения, поэтому для них использовалось одно значение скорости дрейфа большой полуоси орбиты.

Для остальных астероидов рассматривались три варианта скорости дрейфа большой полуоси, соответствующие наклонам оси вращения к нормали к плоскости орбиты: 0°, 90° и 180°. Соответствующие

значения скоростей дрейфа определены в работе [Kuznetsov et al., 2025b]. Для каждого астероида моделировалась динамическая эволюция 250 клонов на интервале времени 2 млн лет, существенно превышающем предварительную оценку возраста семейства 1.5 млн лет [Kuznetsov et al., 2025b]. Оценка возраста пар выполнялась на основе анализа моментов схождения линий узлов и апсид, а также по достижению минимума метрики Холшевникова [Kholshevnikov et al., 2016]. Оценки возраста пар показывают, что семейство Emilkowalski сформировалось в результате разрушения родительского тела семейства с последующим каскадным распадом образовавшихся фрагментов около 900, 700, 500 и 200 тыс. лет назад.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-00143, <https://rscf.ru/project/24-22-00143/>.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Kholshevnikov K.V., Kokhirova G.I., Babadzhanyan P.B., Khamroev U.H. Metrics in the space of orbits and their application to searching for celestial objects of common origin // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2016. V. 462. P. 2275–2283.
2. Kuznetsov E.D., Vasileva M.A., Perminov A.S., Safronova V.S. Search for new members of young asteroid families // Sol. Syst. Res. 2025a. V. 59(1). Id. 8. 12 p.
3. Kuznetsov E.D., Safronova V.S., Vasileva M.A., Perminov A.S. Constructing a Scenario for the Formation of the Emilkowalski Family Based on Modeling the Evolution of Nominal Orbits of Asteroids // Sol. Syst. Res. 2025b. V. 59(1). Id. 10. 9 p.

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ПРОБОПОДГОТОВКИ СОВРЕМЕННЫХ ГОРОДСКИХ ПЫЛЕ-ГРЯЗЕВЫХ ОСАДКОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ В НИХ МИКРОПЛАСТИКА

Перковая Е.Н.<sup>1</sup>, Селезнев А.А.<sup>1</sup>, Пестов А.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> Институт органического синтеза УрО РАН, Екатеринбург, Россия

perkovakatya02@mail.ru

Микропластик – это частицы полимерных веществ размером < 5 мм, он бывает первичным, т. е. производится промышленным способом и вторичным, является следствием деградации пластиковых предметов за счет внешних воздействий. Современные пыле-грязевые отложения городских территорий являются одним из перспективных компонентов для экологической оценки жилых территорий. Объектом опробования являются различные типы современных поверхностных депонированных отложений: дорожная пыль и отложения в локальных понижениях микрорельефа [Seleznev, 2019].

Инфракрасные спектры регистрировали на ИК-Фурье спектрометре “SpectrumOne” фирмы “PerkinElmer” (США) в лаборатории спектральных методов исследования ИОС УрО РАН.

Проба отбиралась на территории города Екатеринбурга. Для разделения минеральной матрицы пробы и полимерного вещества использовалось три способа:

- 1) дистиллированная вода;
- 2) раствор соли NaCl с концентрацией 120 г/л [Thakur, 2023];
- 3) раствор соли NaCl с концентрацией 240 г/л. Для каждой параллели фильтровали отдельно флотат (часть пробы, которая всплыла) и отдельно минеральную матрицу (часть пробы, которая осела).

Сухие пробы ситовали через сито с размером ячейки 100 мкм. Фракцию меньше 100 мкм для флотата и минеральной матрицы анализировали на ИК-Фурье спектрометре.

По результатам анализа полученных ИК-спектров, были идентифицированы пики в области волновых числе 2800–2900 см<sup>-1</sup> и 1400 см<sup>-1</sup>. Преобладающим полимерным веществом в пробах является полиэтилен

[Тарасевич, 2012]. Минеральная матрица городских пыле-грязевых наносов представлена связью Si-O (Наибольший пик поглощения с длиной волны 980 см<sup>-1</sup>) [Тарасевич, 2012].

Вода и раствор соли NaCl 240 г/л не позволяют разделить полимерное вещество и матрицу, спектры легкой и тяжелой фракций не отличаются по своей интенсивности.

Раствор соли NaCl с концентрацией 120 г/л разделяет матрицу и полимерное вещество, спектры флотата и матрицы значительно отличаются по интенсивности, однако часть полимерного вещества остается в матрице.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 24-17-20036) и Правительства Свердловской области (проект 24-17-20036).*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Тарасевич Б.Н ИК спектры основных классов органических соединений: справочные материалы. Москва: Изд-во МГУ имени М.В. Ломоносова, 2012. 55 с.
2. Seleznev A. et al. Mineral phase composition of the surface dirt sediment in an urban environment // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2019.– Т. 317.– №. 1.– С. 012009. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/317/1/012009>
3. Thakur B. et al. Identification and characterization of extracted microplastics from agricultural soil near industrial area: FTIR and X-ray diffraction method // Environmental Quality Management. 2023. Vol. 33, No. 1. P. 173–181. <https://doi.org/10.1002/tqem.22035>

## СРАВНЕНИЕ СОСТАВОВ МЕТЕОРИТОВ, КОРЫ ПЛАВЛЕНИЯ И СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ИХ БОЛИДОВ

**Петрова Е.В.<sup>1</sup>, Гроховский В.И.<sup>1</sup>, Попов А.А<sup>1</sup>., Карташова А.П.<sup>2</sup>, Горячко Ю.А.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия,

<sup>2</sup> Институт Астрономии РАН, Москва, Россия,

<sup>3</sup> Белорусская метеорная сеть, Минск, Беларусь

*evgeniya.petrova@urfu.ru, grokh47@mail.ru*

Воздействие атмосферы Земли на вещество метеороида приводит к фрагментации, абляции, значительной потере массы и свечению плазмы в видимой области спектра. Регистрация спектров – это уникальный инструмент экспресс-характеризации состава метеороидов, однако возможность точной классификации вещества пока не достигнута.

При падении метеорита Smalyavichy H6 25 декабря 2024 года, был зарегистрирован спектр. В нем удалось распознать химические элементы: Mg, Fe, Na, Ca, Cr, K, Li, Mn, что соответствует химическому составу внутренней части вещества метеорита [Met. Bulletin]. При наблюдении падения астероида 2024 BX1 (метеорит Ribbeck) и болида Kindberg были зарегистрированы спектры, в которых наблюдались линии Mg, Na, Ca, K, Li, Mn, Cr, и Ti [Spurný et al., 2024]. При этом недостаток Fe в спектре болида Ribbeck показал, что вещество этого метеорита богато энстатитом, что подтвердилось составом образцов.

На поверхности фрагментов метеоритов в процессе падения формируется кора плавления. Сравнительные исследования внутреннего вещества метеоритов Челябинск LL5, Озерки L6, Kemer L4 и Calama 009 L6 и их коры плавления показали, что в коре уменьшается количество клинопироксена, троилита, ортопироксена, фазы Fe (Ni, Co), но также и образуется новая фаза магнезиоферрита [Oshtrakh et al., 2023; Petrova et al., 2024].

При экспериментальном моделировании процессов абляции метеороидов хондритового состава с помощью плазмотрона, удалось зафиксировать спектральные линии Cu, Fe, N, и O [Wang et al., 2024]. Учитывая это, и результаты наших лабораторных экспериментов с плазмотроном по моделированию плазмохимических реакций медленных метеороидов, было замечено, что элементы тяжелее Ni и Co могут накапливаться в коре плавления обычновенных хон-

дриотов. Это также согласуется с находками глобул, обогащенных элементами платиновой группы в коре плавления метеорита Челябинск LL5 [Sharygin, 2019], хотя их не обнаруживали во внутреннем веществе.

*Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 24-27-00392.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Meteoritical Bulletin Database: Smalyavichy.
2. Oshtrakh M.I., Maksimova A.A., Petrova E.V., Chukin A.V., Felner I. Comparison of bulk interior and fusion crust of Chelyabinsk LL5, Ozerki L6 and Kemer L4 ordinary chondrite fragments using X-ray diffraction and Mössbauer spectroscopy // Hyperfine Interact., 2023. V. 224 Nr.22.
3. Petrova E.V., Chukin A. V., Varga G., Dankházi Z., Leitus G., Felner I., Kuzmann E., Homonnay Z., Grokhovsky V.I., OshtrakhM. I. Characterization of bulk interior and fusion crust of Calama 009 L6 ordinary chondrite// Meteoritics & Planet. Sci., 2024. V. 59 Nr.10 P. 2865-2879.
4. Spurný P., Borovička J., Shrbený L., Hankey M., Neubert R. Atmospheric entry and fragmentation of the small asteroid 2024 BX1: Bolide trajectory, orbit, dynamics, light curve, and spectrum // Astronomy & Astrophysics, 2024. 49735.
5. Sharygin V. V. Nickel-Rich Metal-Sulfide Globules in Fusion Crust of Chelyabinsk Meteorite // Meteorit. & Planet. Sci., 2019. 54, V. S1. A6363
6. Wang L., Dang L., Yang L. W., Liu J. B., Huang J., Huang Z.J., Yang J.K., Luo Y. Study of Iron and Stony Meteorite Ablation Based on Simulation Experiments in an Arc Heater // The Astrophysical Journal, 2024. V. 962:23 (16pp).

## СИНТЕЗ И ТЕРМОРАМАНОВСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ИЗОКУБАНИТА $\text{CuFe}_2\text{S}_3$

Печурин М.С.<sup>1</sup>, Панкрушина Е.А.<sup>1</sup>, Пузанова И.А.<sup>2</sup>, Чареев Д.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заваруцкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия, *Mikhail.Pechurin@urfu.ru*

<sup>2</sup> Институт экспериментальной минералогии им. академика Д.С. Коржинского РАН, Черноголовка, Россия

Понимание структуры и термодинамических свойств сульфидов важно как для изучения парагенезиса их образования на Земле и в космосе, так и для анализа технологических вопросов переработки руд и концентратов полисульфидного продукта, основанных на окислении пород при отжиге на воздухе. Экспериментальные исследования сульфидных систем, в частности Cu-Fe-S, встречаются с определенными сложностями; часто результаты не имеют однозначного толкования. Несмотря на длительную историю изучение фазовых отношений в системе Cu-Fe-S [Merwin, Lombard, 1937], для многих ее представителей и в настоящее время отсутствуют экспериментальные и расчетные модельные данные.

Изокубанит  $\text{CuFe}^2\text{S}_3$  (пр. гр.  $F-43m$ ) имеет разупорядоченную структуру; в его кубической решетке атомы S заполняют высокосимметричную позицию Уайкофа 4a, а Cu и Fe – позицию 4d в соотношении 2 : 1. В настоящей работе изокубанит синтезирован раствор-расплавным методом в стационарном температурном градиенте в вакуумированных запаянных ампулах из кварцевого стекла. Использовалось два вида ампул длиной 110 и 200 мм. Температурный режим при использовании ампул длиной 200 мм задавался таким, что температура на холодном конце была приближена к температуре кристаллизации солевой смеси. Ампулы заполнялись шихтой и солевой смесью  $\text{RbCl-LiCl}$  эвтектического состава; вакуумировались; запаивались; помещались в кварцевые (керамические) стаканы; для создания температурного градиента стаканы помещались в трубчатые печи так, чтобы концы ампул с шихтой располагались ближе

к центру печи, а противоположные концы ближе к краю [Пузанова и др., 2024].

Образцы были аттестованы по данным монокристалльной рентгеновской дифракции, СЭМ, рамановской и терморамановской спектроскопии в диапазоне 83–773 К. Данные при 83 К получены для изокубанита впервые; они демонстрируют наличие низкочастотного спектрального пика  $\sim 107 \text{ cm}^{-1}$ , напоминающего по своему поведению «мягкую» моду, значимо смещающуюся при повышении температуры. Под действием нагревания до  $T > 583 \text{ K}$  и лазерного облучения кубический  $\text{CuFe}_2\text{S}_3$  окисляется до оксидов [Pankrushina et al., 2023].

Рамановская спектроскопия выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект №24-73-00009.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Пузанова, И.Г., Панкрушина, Е.А., Печурин, М.С., & Чареев, Д.А. (2024). Синтез кристаллов сульфидных минералов инконгруэнтными методами на примере систем Cu-Fe-S и Cu-Fe-Se. Литосфера, 24(2), 406–415.
2. Merwin, H.E., & Lombard, R.H. (1937). the system Cu-Fe-S. Economic Geology, 32 (2\_Suppl), 203–284.
3. Pankrushina E.A., Votyakov S.L., Aksenov S.M., Komleva E.V., Uporova N.S., Vaitieva Y.A. In situ thermo-Raman spectroscopy and ab initio vibrational assignment calculations of cubanite  $\text{CuFe}^2\text{S}_3$  //Journal of Raman Spectroscopy. 2023. Т. 54. № 7. С. 769–780.

## ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ ДЛЯ НЕЙРОСЕТЕВОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В АРИДНЫХ ЗОНАХ

**Пилицына Т.А.<sup>1</sup>, Ковальский А.М.<sup>1</sup>, Силаев М.В.<sup>1</sup>, Юсуф Таки<sup>2</sup>**  
**Pilitsyna Tatiana<sup>1</sup>, Kovalskii Andrey<sup>1</sup>, Silaev Makar<sup>1</sup>, Yousuf Taqi Y.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Aramco Innovations LLC, Moscow, Russia

<sup>2</sup> GTD at EXPEC ARC, Dhahran, Saudi Arabia

*tatiana.pilitsyna@aramcoinnovations.com*

При поисках месторождений рудных полезных ископаемых на территориях с аридным климатом опробование потоков рассеяния существенно затруднено в связи с отсутствием гидросети. В таких областях наиболее перспективными для регионального геохимического исследования площадей являются технологии дистанционного зондирования Земли в сочетании с нейросетевым анализом, использующим дополнительно геофизические данные и данные рельефа местности.

На примере геохимических поисков золота нами представлен подход, основанный на адаптации архитектуры нейросетевой модели, обучающейся не только распознавать общие признаки минерализации, но и точно определяющей границы перспективных участков. Все данные, использованные в работе, опираются на открытые литературные источники.

Особенностью применения здесь геопространственных данных является их разномасштабность. Модель рельефа с разрешением 500 м/пиксель и спутниковые снимки Landsat-9 с разрешением 15 м/пиксель требуют тщательного предварительного согласования. На этапе подготовки данных все цифровые модели были приведены к единому разрешению – 500 м/пиксель с использованием билинейной интерполяции.

На территории Аравийского полуострова были собраны и обобщены данные по 593 месторождениям и проявлениям золота [Workman et al., 2016], которые использовались в качестве эталонных объектов. Стоит отметить, что объекты не были разделены по геологово-промышленным типам, а оценивались как общий минерагенический потенциал золотоносности

территории. В результате обработки было получено поле вероятности Au-минерализации, основанное на нейросетевом анализе данных 7 спектральных каналов спутниковых снимков Landsat-9, магнитного и гравитационного полей, глубины залегания границы Мохоровича и рельефа, обработанных в едином геопространственном разрешении. Большинство ранее известных золоторудных объектов попали в поле вероятности от 70%, что указывает на то, что нейросеть весьма корректно идентифицировала параметры моделирования. На основе такого моделирования возможно выделение новых перспективных площадей, требующих постановки детальных поисковых работ.

Таким образом, разработанное комплексное решение, включающее дистанционное зондирование и применение нейросетевых технологий, позволяет сделать первый значительный шаг для локализации руд повышенных концентраций, и тем самым существенно упростить проведение поисковых геохимических работ. Значительная степень воспроизводимости разработанной методики, показанная в работе на примере золотоносной минерализации, служит подтверждением высокой эффективности и перспективности развивающегося комплексного подхода.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Workman A., Hawke D., Kuehnbaum B. et al. Minerals Inventory and Potential Assessment Report // Ministry of Petroleum and Mineral Resources, Kingdom of Saudi Arabia. 2016. V.1.

## НЕДАВНО ОБРАЗОВАННЫЕ КРАТЕРЫ НА МАРСЕ

Подобная Е.Д., Попова О.П., Иванов Б.А., Глазачев Д.О.

*Институт динамики геосфер РАН им. академика М.А. Садовского,  
Москва, Россия, epodobnaya@idg.ras.ru*

Метеороиды, входящие в атмосферы Земли и Марса, относятся к одной популяции малых космических тел (КТ) Солнечной системы, существующие оценки ее состава заметно расходятся.

К лету 2023 года на Марсе найдено более 1400 свежих мест падения КТ [Daubar et al., 2022; Podobnaya et al., 2025]. Около 60% соответствующих им ударников разрушились в атмосфере и образовали кратерные кластеры. Изучение кластеров на Марсе позволяет независимо оценить параметры КТ, анализировать процесс разрушения для различных тел и исследовать плохо различимые на Земле детали их взаимодействия с атмосферой.

Для описания недавних кластеров на Марсе использовались эллипсы рассеяния. Предполагается, это позволит оценить углы траектории КТ (угол входа и азимут). На Земле, из-за атмосферной сортировки, крупные кратеры/фрагменты расположены в голове поля рассеяния [Frost, 1969], его поперечный размер определяется взаимодействием фрагментов [Passey, Melosh, 1980], мелкие фрагменты подвержены влиянию ветра. На Марсе скорость фрагментов при ударе слишком велика для заметного влияния ветра на поле рассеяния, размер эллипса должен определяться взаимодействием фрагментов и влиянием атмосферной сортировки. Полученные оценки углов траектории плохо согласуются с данными о земных болидах. На Марсе наблюдается дефицит углов входа, близких к вертикальным, что кажется маловероятным.

Выбросы из кратера (и след ударной волны) в ряде случаев дают возможность независимо оценить направление полета. Для 130 кластеров кратерные выбросы позволили оценить азимуты. Полученные

оценки коррелируют с оценками, полученными по эллипсу рассеяния для примерно трети кластеров. Еще в трети случаев направление полета не совпадает. В остальных случаях выбросы направлены поперек поля рассеяния.

Численное моделирование различных кластеров позволит определить наиболее подходящие параметры КТ и соответствующие особенности фрагментации, подтвердит или опровергнет выводы о влиянии атмосферной сортировки и оценке параметров траектории.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 125012200624-5.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Daubar I.J. and 17 coauthors. New Craters on Mars: An Updated Catalog // J. Geophys. Res. (Planets). 2022. V.127. P. e2021JE007145.
2. Frost M.J. Size and spacial distribution in meteoritic showers // Meteorit. 1969. V.4(3). P. 217–232.
3. Passey Q.R., Melosh H.J. Effects of atmospheric breakup on crater field formation // Icarus. 1980. V. 42(2). P. 211–233.
4. Podobnaya E., Glazachev D., Popova O., Ivanov B. Classification of craters clusters in the expanded catalog of fresh impact sites on Mars. Solar Syst. Res. 2025. V. 59. (in print).
5. Shuvalov V. Ejecta deposition after oblique impacts: An influence of impact scale // Meteorit. & Plan. Sci. 2011. V.46(11). P. 1713–1718.

## ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ВОСПРОИЗВЕДЕНИЮ АБЛЯЦИИ МЕТЕОРОИДОВ В НАЗЕМНЫХ УСТАНОВКАХ

Попов А.А., Кокорин А.Ф.

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия,  
*aa.popov@urfu.ru*

Процессы, происходящие с метеороидами при их падении в атмосфере Земли, остаются не до конца изученными и представляют актуальное направление для изучения. Для получения новых данных используются разные подходы. Однако, особенно информативными могут быть эксперименты по воссозданию условий падения метеороида в наземных установках. Подобные эксперименты позволяют воссоздать условия в потоке плазмы, воздействующей на метеороид при его падении в атмосфере Земли в лабораторных условиях, что дает возможность использования лабораторных средств для изучения процесса абляции метеороидов.

В данной работе рассматриваются некоторые публикации последних лет, в которых описываются эксперименты по исследованию абляции метеороидов в лабораторных условиях. Многие из представленных публикаций относятся к проекту MetSpec [Tóth et al. 2024]. В анализируемых работах раскрываются: параметры абляции в установках с высокой энталпийей [Helber et al. 2019], петрографический и геохимический анализ образцов после абляции [Pittarello et al. 2019], анализ эмиссии CN как маркера органических соединений в метеороидах [Pisarčíková et al. 2023], различия в абляции образцов железных и каменных метеоритов [Wang et al. 2024], визуальные наблюдения абляции образцов метеоритов [Grigat et al. 2024], особенности оптических спектров абляции образцов метеоритов разных типов [Matlovič et al. 2024], спектральный анализ абляции с высокой частотой фиксации кадров [Ravichandran et al. 2024], спектроскопия абляции в УФ диапазоне [Vaubaillon et al. 2024]. В работе сопоставляются параметры потока плазмы в анализируемых публикациях и получаемые в плазмотроне ФТИ УрФУ.

*Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 24-27-00392.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Grigat F., et al. Visual observation of meteorite ablation in plasma wind tunnel experiments // Icarus. 2024. V. 422. 116249.
2. Helber B., et al. Analysis of Meteoroid Ablation Based on Plasma Wind-tunnel Experiments, Surface Characterization, and Numerical Simulations // The Astrophysical Journal. 2019. V. 876, I 2, P. 120–134.
3. Matlovič P., et al. Spectral properties of ablating meteorite samples for improved meteoroid composition diagnostics // Astronomy & Astrophysics. 2024. V. 689, A323, P. 1–19.
4. Pisarčíková A., et al. Analysis of CN emission as a marker of organic compounds in meteoroids using laboratory simulated meteors // Icarus. 2023. V. 404. 115682.
5. Pittarello L., el al. Meteoroid atmospheric entry investigated with plasma flow experiments: Petrography and geochemistry of the recovered material // Icarus. 2019. V. 331, P. 170–178.
6. Ravichandran R., et al. Emission spectroscopy at high frame rates during ablation tests of meteorite samples in plasma wind tunnel // Icarus. 2024. V. 407. 115818.
7. Tóth J., et al. Overview of the MetSpec project – Artificial meteors in ground testing // Icarus. 2024. V. 407. 115791.
8. Vaubaillon J., et al. UV spectroscopy of artificial meteors (200–400 nm) // Icarus. 2024. V. 410. 115906.
9. Wang L., et al. Study of Iron and Stony Meteorite Ablation Based on Simulation Experiments in an Arc Heater // The Astrophysical Journal. 2024. V. 962, I. 1, P. 23–39.

## СПЕКТРЫ МЕТЕОРОИДОВ

Попова О.П.

*Институт динамики геосфер РАН им. академика М.А. Садовского, Москва, Россия,  
olga@idg.ras.ru*

Большинство космических тел (КТ) не достигает поверхности Земли, и их свойства определяются косвенным образом погенерируем пролетом КТ эффектам. Регистрируемые спектры метеороидов дают возможность получить некоторое представление о химическом составе КТ и их разнообразии. Маленькие (размером менее сантиметра) и большие метеороиды выделяют свою энергию на разных высотах, и их взаимодействие с атмосферой происходит в разных режимах. Физические условия при пролете

метеороида через атмосферу значительно меняются с высотой, и различные процессы ответственны за ablацию на разных стадиях пролета, что сказывается и на наблюдаемых спектрах метеороидов.

В докладе будут обсуждаться условия формирования спектров для маленьких и больших тел, численное и лабораторное моделирование и существующие ограничения в используемых подходах. Будут представлены оценки химического состава, которые можно сделать при анализе спектров.

## ПОЛУЧЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ АНАЛОГОВ ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ МИНЕРАЛОВ В СОЛЕВЫХ РАСПЛАВАХ НА ОСНОВЕ ГАЛОГЕНИДОВ ЛИТИЯ

Пузанова И.Г., Попов Е.А., Чареев Д.А.

*Институт экспериментальной минералогии им. Д.С. Коржинского РАН, Черноголовка, Россия  
Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия  
Air4a@yandex.ru*

Развитие методов синтеза кристаллов является неотъемлемой частью решения новых задач в области экспериментальной минералогии и создания функциональных материалов. В материаловедческих исследованиях особое внимание уделяется индивидуальному подходу к получению соединений или их смесей, поскольку нет универсального метода, который бы позволял реализовать все возможные необходимые физико-химические условия эксперимента.

Применение раствор-расплавного метода в условиях стационарного температурного градиента позволяет зафиксировать температуру роста кристаллов и минимизировать изменение активности компонентов расплава. Температура в одной части ампулы выше, чем температура в другой части. В горячей части находится шихта, которая постепенно растворяется в легкоплавком солевом расплаве [Chareev et al., 2016]. При уменьшении температуры постепенно уменьшается растворимость компонентов в расплаве, что, в свою очередь, приводит к образованию кристаллов, состав которых не совпадает с составом расплава.

Для получения кристаллов аналогов ртутных сфalerитов  $(\text{Hg}, \text{Zn})\text{S}$ , гроховскиита  $\text{CuCrS}_2$ , минералов

систем  $\text{Pb}-\text{Bi}-\text{S}$ ,  $\text{K}-\text{Fe}-\text{S}$  и  $\text{Cu}-\text{Fe}-\text{S}$  [Пузанова и др., 2024], а также соединений  $\text{Fe}(\text{Se}, \text{Te})$  и  $\text{Fe}(\text{Se}, \text{Te}, \text{S})$  (рис. 1) в качестве ростовой среды использовались расплавы на основе галогенидов лития. Температура горячего конца обычно составляла 500–400 °C, а холодного конца, на котором росли кристаллы – 400–320 °C.

Для некоторых из полученных и охарактеризованных кристаллов были проведены измерения электропроводности, магнитной восприимчивости и теплоемкости при низких температурах.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РНФ, проект №24-72-00166.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Chareev D. A. et al. Synthesis of chalcogenide and pnictide crystals in salt melts using a steady-state temperature gradient // Crystallography reports. 2016. V. 61. P. 682–691.
2. Пузанова И. Г. и др. Синтез кристаллов сульфидных минералов инконгруэнтными методами на примере систем  $\text{Cu}-\text{Fe}-\text{S}$  и  $\text{Cu}-\text{Fe}-\text{Se}$  // Литосфера. 2024. Т. 24. №. 2. С. 406–415.

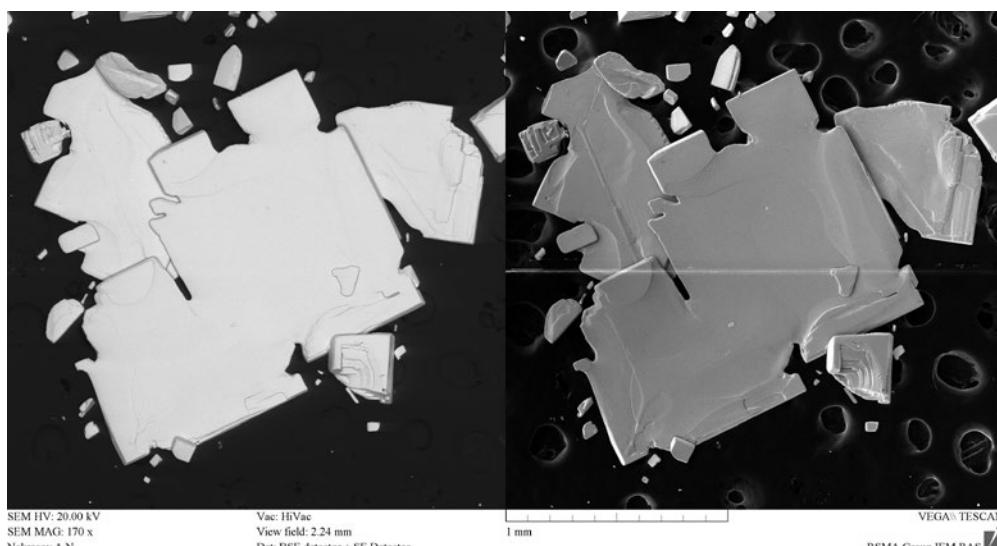


Рис. 1. Электронное изображение образца 4359 ( $\text{FeSe}_{0.6}\text{Te}_{0.4}$ ) в режиме отраженных (слева) и вторичных (справа) электронов

## ОПИСАНИЕ ИК-РЕГИОНА 2.65–2.80 МКМ И ПОИСКИ МОЛЕКУЛЯРНОГО АЗОТА В МЕЖЗВЁЗДНЫХ ЛЬДАХ НА ОСНОВАНИИ ПОСЛЕДНИХ ДАННЫХ ТЕЛЕСКОПА JWST

Сапунова У.А., Ожиганов М.Э., Петрашкевич И.В., Медведев М.Г., Васюнин А.И.

*ИЕНиМ УрФУ, Екатеринбург, Россия, uliana.sapunova@urfu.ru*

Долгое время значительная доля ближнего ИК-диапазона оставалась неисследованной в силу недостаточной разрешающей способности космических обсерваторий предыдущих поколений. Так, более коротковолновый регион, расположенный за полосой, вызванной валентными колебаниями в молекулах воды межзвёздного льда (3 мкм), становится объектом пристальных исследований только сейчас, с выходом в космос телескопа JWST и получением множества спектров холодных объектов – протозвёздных систем и плотных дозвёздных облаков [Brunkens et al., 2024; Noble et al., 2024]. Выясняется, что область спектра в диапазоне 2.65–2.80 мкм интересна наличием множества линий поглощения, связанных с колебаниями различных молекул, представляющих твёрдую фазу в вышеупомянутых космических объектах. В частности, это комбинационные полосы CO<sub>2</sub> (2.7 мкм) и свободные валентные колебания H<sub>2</sub>O и других частиц, содержащих гидроксильные группы. Последние играют значительную роль в определении состава и структуры льдов межзвёздной среды. В отличие от полос связанных валентных колебаний воды, вызванных растяжением O – H связи молекулы, находящейся в тетраэдрическом окружении четырёх таких же молекул, полоса свободных колебаний связана с аналогичным растяжением в молекуле, окружённой только тремя или двумя сходными с ней частицами. Такая молекула может колебаться либо в вакуум, либо в неполярную среду, которая в межзвёздных льдах представлена CO, CO<sub>2</sub>, что достоверно известно, а также, вероятно, N<sub>2</sub> и O<sub>2</sub>.

В ходе экспериментов, проведённых в лаборатории астрохимических исследований УрФУ на сверхвысоковакуумной установке, были получены инфракрасные спектры аналогов межзвёздных льдов составом H<sub>2</sub>O: CO<sub>2</sub>: CH<sub>3</sub>OH: NH<sub>3</sub>: CH<sub>4</sub> с переменным

содержанием N<sub>2</sub> и CO. В результате фиттинга линейной комбинацией полученных спектров данных JWST для протозвёздных систем EDJ183, S68N и TMC-1 было установлено, что основной вклад в наиболее интенсивную и широкую полосу свободных валентных колебаний H<sub>2</sub>O вносят гидроксильные группы, взаимодействующие с CO, и собственно свободные колебания воды в вакуум. В то же время, не было выявлено заметного вклада от O – H групп, колеблющихся в комплексах с CO<sub>2</sub> и предсказанным по множеству моделей N<sub>2</sub>.

На основании этого можно сделать вывод о том, что в слое водяного льда неполярные молекулы находятся в виде агломератов, а значит только крайне незначительная их часть, расположенная на поверхности этих агломератов, оказывает эффект на колебания молекул H<sub>2</sub>O. В то же время взаимодействие с CO остаётся значительным, вероятно, в силу расположения CO на поверхности водяного слоя с полным его покрытием.

*Работа выполнена за счет гранта Российского Научного Фонда № 23-12-00315 и госзадания FEUZ-2025-0003.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Brunkens N.G.C., van Dishoeck E.F., Slavicinska K. JOYS+ study of solid-state <sup>12</sup>C/<sup>13</sup>C isotope ratios in protostellar envelopes-Observations of CO and CO<sub>2</sub> ice with the James Webb Space Telescope // A&A. 2024. V. 691. P. 162–180.
2. Noble J. A., Fraser H. J., Smith Z. L. Detection of the elusive dangling OH ice features at ~2.7 μm in Chamaeleon I with JWST NIRCam // Nat.Astron. 2024 V. 8. P 1169–1180.

## ГЛИНИСТЫЕ МИНЕРАЛЫ ЛИНЕЙНЫХ КОР ВЫВЕТРИВАНИЯ ФУНДАМЕНТА ЮЖНО-ТАТАРСКОГО СВОДА (ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКАЯ ПЛАТФОРМА)

Сидорова Е.Ю., Ситдикова Л.М.

*Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия, lena353@list.ru*

Известно [Лапинская, Журавлев, 1967; Ситдиков, 1968], что в пределах Волго-Уральской антеклизы, в том числе и на территории Южно-Татарского свода, широко развиты додевонские коры выветривания (КВ) по архей-протерозойским породам фундамента. Типизация данных кор выветривания проводилась по некоторым параметрам (возраст, морфология, минералого-geoхимический состав и др.). По исследованиям кернового материала установлено, что линейный (трещинный) и линейно-площадной типы КВ являются менее распространенными (до 10% изученных скважин) по сравнению с площадным типом. Линейные КВ характеризуются развитием в зонах тектонических нарушений фундамента, увеличением мощностей (до 40–50 м и более), плохо выраженной зональностью профиля и наличием только двух зон: дезинтеграции и гидратации-выщелачивания. При этом, состав глинистых минералов и смена их ассоциаций по профилю являются определяющими факторами при установлении зон КВ.

Примером развития линейной (линейно-площадной) КВ является скважина 405, расположенная в северной части Южно-Татарского свода вблизи Камско-Кинельской системы прогибов. Мощность КВ по керну составляет 49,8 м, возраст определяется как доживетский (согласно покрывающим отложениям). Породы фундамента, подвергшиеся изменению, представлены силлиманит-кордиерит-мусковитовыми сланцами и биотит-силлиманитовыми гнейсами. По разрезу скважины выявлено несколько наклонных трещин, чередование зон разной степени выветрелости пород, при чем наибольшие изменения приурочены к центральным частям трещиноватых участков (зона гидратации-выщелачивания). Состав глинистой компоненты КВ изменчив по профилю: в зоне

дезинтеграции более развита смешанослойная фаза иллит-смектит (до 60%), в качестве второстепенных содержатся каолинит и хлорит; зона гидратации-выщелачивания отличается преобладанием каолинита (до 75–80%) и снижением доли смектитовой фазы. Кристаллохимические параметры каолинита в выделенных зонах различны. По данным вычислений индексов «кристалличности» каолинита по рентгенограммам (НІ, AGFI, IK и др.) [Aparicio et al., 2006; Сидорова и др., 2023] выделены его различные типы по степени дефектности. Наилучшими структурно-морфологическими характеристиками будет обладать каолинит зоны гидратации-выщелачивания (среднедефектный каолинит), тогда как в зоне дезинтеграции преобладает высоко-дефектный тип.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Лапинская Т.А., Журавлев Е.Г. Погребенная кора выветривания фундамента Волго-Уральской газонефтеносной провинции и ее геологическое значение. М.: Недра, 1967. 174 с.
2. Сидорова Е.Ю., Ситдикова Л.М., Хасанова Н.М. Гипергенный каолинит Южно-Татарского свода: структурно-морфологическая характеристика и генетические особенности // Глины и глинистые минералы – 2023. VI Российское Совещание по глинам и глинистым минералам «ГЛИНЫ-2023». М.: ИГЕМ РАН, 2023. С. 160–162.
3. Ситдиков Б.С. Петрография и строение кристаллического фундамента Татарской АССР. Казань: Изд-во КГУ, 1968. 436 с.
4. Aparicio P., Galan E., Ferrell R.E. A new kaolinite order index based on XRD profile fitting // Clay Minerals. 2006. V. 41. P. 811–817.

## ИНДЕКС КРИСТАЛЛИЧНОСТИ КВАРЦА И СТРУКТУРНО-МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

Ситдикова Л.М., Полянская М.В.

Казанский (Приволжский) Федеральный Университет, Казань, Россия,  
Sitdikova8432@mail.ru, marinaolyan2002@gmail.com

В связи с актуальностью проблемы изучения объектов различных типов кварца, этот вопрос требует детальной характеристики условий его кристаллизации, структурно-морфологических особенностей и примесного состава. Объектом исследования были образцы с различных месторождений жильного кварца, ориентированных на поиск различных металлов, а также концентрат образцов мелко-друзовидно-кристаллического кварца.

Методы изучения: оптико-петрографические, рентгеноструктурный анализ, электронная парамагнитная резонанс (ЭПР). Большинство месторождений жильного кварца связаны с дайковыми комплексами диоритового состава. Кварц кристаллизовался в зонах тектонических напряжений, что вызывало появление различных механических деформаций: развитие разнонаправленных микротрещин кварца, появление волнистого и блочного типа погасания. Усиление деформационных процессов при кристаллизации кварца вызывало появление механического двойникования кварца, вплоть до смещения атомов кристаллической решетки, образования дислокаций и зон локального разупорядочивания структуры, что создает частично аморфные области. Нами были выявлены участки механического двойникования кварца. Двойники, хоть и не являются аморфными, но создают границы раздела между различно ориентированными кристаллами. На таких границах возникают дефекты структуры (дислокации, вакансии), которые могут нарушать периодичность решётки и снижающие степень кристалличности кварца.

Методом рентгеноструктурного анализа изучались образцы жильного кварца с двух месторождений, получены различные значения индекса кристалличности (Kci) на месторождении № 1 Kci = 2,2

(сульфиды в ассоциации с Au), на месторождении № 2 – 5,52 (поиск Au). Индекс кристалличности кварца связан с механическими и структурными дефектами. Были проанализированы также образцы кварца из кварцевого концентрата (экзогенного генезиса), значения Kci соответствуют 7,03 и более.

По данным изучения образцов кварца методом ЭПР среди изоморфных примесей в кварце наиболее часто встречаются Al, Ge, Ti и Fe [Раков, 2010]. Результаты ЭПР-исследований – в образцах кварца со низким индексом кристалличности (месторождение № 2) выявлены изоморфные примеси Al, Ge. В образцах концентрата фиксируются широкие линии спектра не структурного парамагнитного иона  $Fe^{3+}$  в различных фракциях магнитного, ферромагнитного вещества, которые были удалены обработкой слабого раствора HCl. По спектру ЭПР установили, что произошло удаление  $Fe^{3+}$  в виде механической примеси и в самой структуре кварца, что свидетельствует о том, что парамагнитный ион  $Fe^{3+}$  не входит в структуру кварца, находится в дисперсном состоянии. Можно предположить, что данный концентрат является ценным сырьем для производства высококачественного сырья. Изучение индекса кристалличности кварца, изоморфных примесей могут помочь в решении вопросов генезиса кварца и соответствующего типа оруденения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Раков Л.И. Научные основы применения структурных дефектов в кварце в качестве индикатора минералообразования // ФГУП «ВИМС» им. Н.М. Федоровского – М. -2007. 46 с.

## СИНТЕЗ И СВОЙСТВА ЭШИНИТ-ПОДОБНЫХ СЛОЖНЫХ ОКСИДОВ СЕРИЙ $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Ti}_{1-x}\text{Nb}_{1+x}\text{O}_6$ И $\text{La}_{1-x}\text{Bi}_x\text{TiNbO}_6$

Соломатов В.О.<sup>1</sup>, Михайловская З.А.<sup>1,2</sup>, Желуницын И.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Керамика на основе  $\text{LnNbTiO}_6$  ( $\text{Ln} = \text{РЭ}$ ) представляет интерес благодаря широкому спектру потенциальных применений: в микроволновых устройствах, в качестве матриц для иммобилизации U- и Th- содержащих радиационных отходов; в качестве матрицы для люминофоров [Surendran et al., 2003, Zhang, 2017].

В настоящей работе представлены результаты исследования систем  $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Ti}_{1-x}\text{Nb}_{1+x}\text{O}_6$  и  $\text{La}_{1-x}\text{Bi}_x\text{TiNbO}_6$  ( $x = 0 \dots 0.2$ ), полученных методом пиролиза жидких прекурсоров, и изучены их свойства. По результатам анализа рентгенографических данных синтеза  $\text{LaTiNbO}_6$  (дифрактометр XRD-7000 Shimadzu) установлено, что оптимальной температурой синтеза является  $1100^\circ\text{C}$ , а время отжига – около 25 часов. Составы  $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Ti}_{1-x}\text{Nb}_{1+x}\text{O}_6$  и  $\text{La}_{1-x}\text{Bi}_x\text{TiNbO}_6$

( $x = 0 \dots 0.2$ ) были получены по такой же технологии отжига. Для составов  $x \geq 0.2$  обнаружены пики примесной фазы, связанные с образованием моноклинной модификации, что может быть вызвано стерическими напряжениями при замене ионов  $\text{La}^{3+}$  (рис. 1). Элементный состав полученных образцов подтвержден с помощью рентгенофлуоресцентного анализа (EDX8000 Shimadzu). Из порошков оксидов были получены образцы плотной керамики, методом гидростатического взвешивания измерена их плотность, проведен анализ микроструктуры керамики методом СЭМ, получены результаты Рамановской спектроскопии, электропроводящие свойства керамики аттестованы методом импедансной спектроскопии. Также с помощью спектроскопии диффузионного рассеяния для серии образцов определена ширина запрещенной зоны.

Работа выполнена в ЦКП «Геоаналитик» ИГТ УрО РАН в рамках тем № 123011800012-9 и 124020300057-6 государственного задания ИГТ УрО РАН.

### ЛИТЕРАТУРА

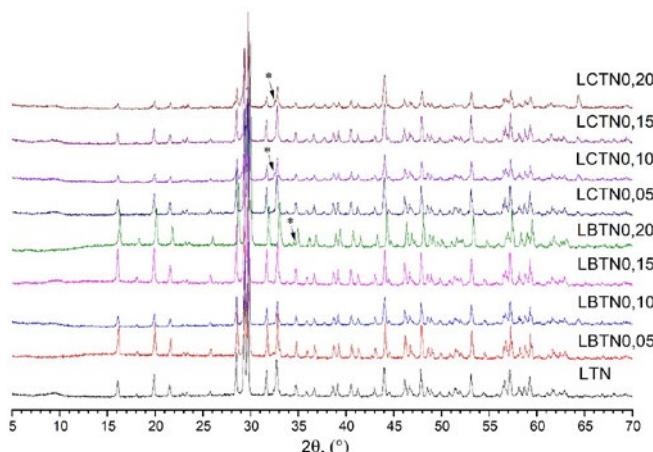


Рис. 1. Рентгенограммы образцов состава LTN:

$\text{LaTiNbO}_6$ ; LBTNx:  $\text{La}_{1-x}\text{Bi}_x\text{TiNbO}_{6-\delta}$ ;

LCTNx:  $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Ti}_{1-x}\text{Nb}_{1+x}\text{O}_{6-\delta}$ , где  $x = 0,05; 0,10; 0,15; 0,20$ , полученные при  $1100^\circ\text{C}$  с временем отжига в 24 часа.

Символом «\*» обозначены примесные пики

1. Surendran K.P. Microwave Dielectric Properties of  $\text{RE}_{1-x}\text{RE}'_x\text{TiNbO}_6$  [ $\text{RE} = \text{Pr, Nd, Sm}; \text{RE}' = \text{Gd, Dy, Y}$ ] Ceramics / K. P. Surendran [et al.] // Journal of the American Ceramic Society. – 2003. – Т. 86. – № 10. – Р. 1695–1699.
2. Zhang J. Sintering behavior, structural phase transition, and microwave dielectric properties of  $\text{La}_{1-x}\text{Zn}_x\text{TiNbO}_{6-x/2}$  ceramics / J. Zhang, R. Zuo // Journal of the American Ceramic Society. – 2017. – Т. 100. – № 9. – Р. 4362–4368.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВА СФЕРУЛ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ЖЕЛЕЗА В ЧАСТИЦАХ ЛУННОГО ГРУНТА МИССИИ ЧАНЬЕ-5 И СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

**Сорокин Е.М.<sup>1</sup>, Герасимов М.В.<sup>2</sup>, Шкловер В.Я.<sup>3</sup>, Бондарев А.В.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup> ООО “Системы для микроскопии и анализа” (СМА), Москва, Россия

Наносферулы металлического железа ( $\text{prFe}^0$ ) являются существенным компонентом реголита Луны и других безатмосферных тел. Происхождение и механизмы формирования таких сферул окончательно не выяснены. Изначально нанофазные частицы рассматривались как практически чистое металлическое железо. В частности, субмикронные железные глобулы (диаметром менее 1 мкм), характерные для лунных образцов, были охарактеризованы как состоящие из  $\text{Fe}^0$  без заметных посторонних примесей (Pieters et al., 2016, Pang et al., 2024). Тем не менее, исследователи находили среди продуктов космического выветривания такие объекты как силициды железа (например, Хапкеит  $\text{Fe}_2\text{Si}$  и другие) (Anand et al., 2004, Nazarov et al., 2012, Gopon et al., 2017), а также наносульфиды железа (Noguchi et al., 2014). В силицидах отмечались примеси как Ni, так и P, а также, Ti.

Методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии были исследованы наносферулы из агглютината частицы лунного реголита, доставленного на Землю миссией Чанье-5. Стекло, вмещающее сферулы  $\text{prFe}^0$ , было существенно восстановлено по сравнению с окружающими нерасплавленными минералами, что свидетельствует о заметной потере кислорода при его формировании. Дефицит кислорода в стекле способствует формированию частиц  $\text{prFe}^0$  и восстановлению элементов, имеющих низкое сродство к кислороду, в частности, сидерофильных элементов. Исследованные сферулы имели повышенное содержание по сравнению с вмещающим стеклом таких сидерофильных элементов, как Ni, S, P. Повышенные содержания сидерофильных

элементов, по-видимому, обеспечиваются сорбцией их восстановленных форм нарождающимися железными сферулами из окружающего стекла. Зона питания в стекле, из которой происходит сорбция этих элементов оценивается до 3–4 радиусов самих сферул. Сферулы  $\text{prFe}^0$ , таким образом, могут выступать неким хранилищем сидерофильных элементов.

### ЛИТЕРАТУРА

- Pieters C.M., Noble S.K. Space weathering on airless bodies, *J. Geophys. Res.: Planets* 121 (10), 1865–1884, (2016).
- Pang R et al. Redox condition changes caused by impacts: Insights from Chang'e-5 lunar glass beads, *Science Bulletin*, Volume 69, Issue 10, 2024, P 1495–1505.
- Anand M., Taylor L.A., Nazarov M.A., Shu J., Mao H., Hemley R.J. Space weathering on airless planetary bodies: Clues from the lunar mineral hapkeite, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 101 (18) 6847–6851, <https://doi.org/10.1073/pnas.0401565101> (2004).
- Nazarov M.A., Demidova S.I., Anosova M.O., Kostitsyn Y.A., Ntaflos T. 2012. Native silicon and iron silicides in the Dhofar 280 lunar meteorite. *Petrology* 20: 506–519.
- Gopon P., Spicuzza M., Thomas F.K., Reinhard D., Prosa Ty J., Fournelle J. Ultra-reduced phases in Apollo 16 regolith: Combined field emission electron probe microanalysis and atom probe tomography of submicron Fe-Si grains in Apollo 16 sample 61500. *Meteoritics & Planetary Science* 1–22 (2017).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ ДОЛОМИТА С КЛИНОПИРОКСЕНОМ В СИСТЕМАХ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 \pm \text{NaAlSi}_2\text{O}_6 \pm \text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ ПРИ 3–6 ГПа

Степанов К.М., Шацкий А.Ф.

*ГЕОХИ РАН, Москва, Россия, stepanov.km@geokhi.ru*

Транспорт углерода в мантию Земли осуществляется посредством субдукции карбонатов в составе гидротермально измененных океанических плит. Частичное плавление этих плит определяет количество и глубину погружения углерода и сопровождается образованием карбонатных расплавов. Предполагается, что эти расплавы играли важную роль в мантийном метасоматозе и генерации кимберлитовых магм, а также обеспечивали образование природных алмазов. Вместе с тем, существующие экспериментальные данные имеют значительные расхождения по температурам солидуса системы эклогит- $\text{CO}_2$  [Yaxley,

Brey 2004; Dasgupta et al. 2004], достигающие нескольких сотен градусов при 3–7 ГПа. Возможно, что эти расхождения связаны с различием в концентрациях натрия в исследованных системах. Чтобы это выяснить, в данной работе были изучены системы  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 \pm \text{NaAlSi}_2\text{O}_6 \pm \text{CaMgSi}_2\text{O}_6$  при 3–6 ГПа, в диапазоне температур от 850 до 1700 °C (рис. 1).

В результате были определены реакции плавления, составы карбонатных расплавов и температуры их образования. На основании этих данных сделаны выводы о реакциях плавления в сложных эклогитовых системах и о влиянии натрия на эти реакции.

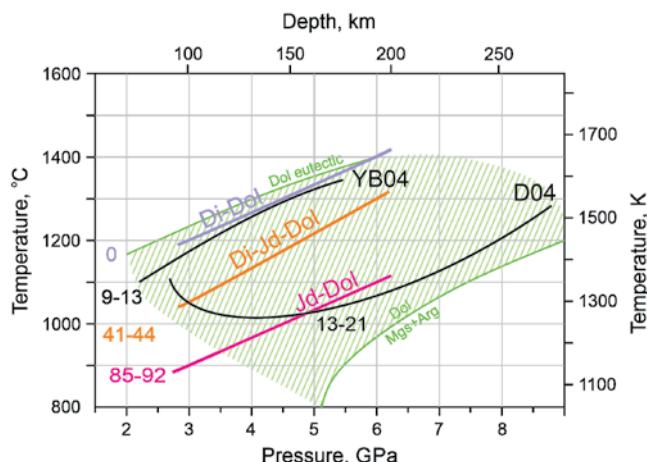


Рис. 1. Солидусы системы карбонатизированного эклогита из работ [Yaxley, Brey, 2004] (YB04) и [Dasgupta et.al., 2004] (D04) в сравнении с солидусами данной работы (Di-Dol, Di-Jd-Dol, Jd-Dol). Зелёным обозначена область устойчивости доломита [Buob et.al., 2006; Shatskiy et.al., 2018]. Цифрами обозначены концентрации жадеитового минерала в солидусном клинопироксене, мол%.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Buob A, Luth RW, Schmidt MW, Ulmer P (2006) Experiments on  $\text{CaCO}_3$ - $\text{MgCO}_3$  solid solutions at high pressure and temperature. American Mineralogist. 2006. V.91(2–3). P. 435–440.
2. Dasgupta R., Hirschmann M.M., Withers A.C. Deep global cycling of carbon constrained by the solidus of anhydrous, carbonated eclogite under upper mantle conditions // Earth and Planetary Science Letters. 2004. Vol. 227 (1-2). P. 73–85.
3. Shatskiy A., Podborodnikov I.V., Arefiev A.V., Minin D.A., Chanyshhev A.D., Litasov K.D. Revision of the  $\text{CaCO}_3$ - $\text{MgCO}_3$  phase diagram at 3 and 6 GPa // American Mineralogist, 2018. V. 103 (3). P. 441–452.
4. Yaxley G.M., Brey G.P. Phase relations of carbonate-bearing eclogite assemblages from 2.5 to 5.5 GPa: implications for petrogenesis of carbonatites// Contributions to Mineralogy and Petrology. 2004. V. 146 (5). P. 606–619.

## К ТЕОРИИ МОДУЛЯРНОГО СТРОЕНИЯ ЛОВОЗЕРИТОВЫХ СТРУКТУР: НОВЫЕ ДАННЫЕ О ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ СОЧЛЕНИЯ S6R-БЛОКОВ

Степенщиков Д.Г.<sup>1,2</sup>, Аксенов С.М.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Лаборатория арктической минералогии и материаловедения ФИЦ

КНЦ РАН, Анадырь, Россия, d.stepenschikov@ksc.ru

<sup>2</sup> Геологический институт ФИЦ КНЦ РАН, Анадырь, Россия

Природные и синтетические представители группы ловозерита характеризуются общей формулой  $A_3B_3C_2\{M[Si_6O_{18}]\}$ , где  $A=Na, Ca$ ;  $B=Na, Ca$ ;  $C=Mn, Ca, Fe, Na$ ;  $M=Zr, Ti, Ca$  [Pekov et al., 2009]. В качестве фундаментального строительного блока кристаллической структуры может быть выделен псевдокубический S6R-блок состава  $|C_2MSi_6O_{18}|$  и параметром  $a \sim 7.5 \text{ \AA}$  [Кривовичев, 2015].  $M$ -катионы располагаются в вершинах блока, атомы Si в центрах шести октантов, а оставшиеся два центрированы  $C$ -катионами. При этом, разбиение пространства блоками обладает рядом свойств.

I. Разбиения изоэдральны, т. е. все блоки S6R являются симметрично эквивалентными относительно пространственных групп соответствующих кристаллических структур.

II. Соседние блоки S6R могут объединяться как целыми гранями, так и прямоугольными половинами граней.

III. При любом объединении блоков  $v$ -октанты соседних блоков объединяются общими вершинами, но никогда общими ребрами или гранями.

Таким образом, всего существует десять возможных типов разбиений пространства [Кривовичев, 2015]. Вместе с тем остается интересным вопрос – какими принципиально могут быть разбиения пространства при несоблюдении первого свойства. Анализ показывает, что многообразие таких разбиений хотя и более обширно, но тем не менее подчиняется ограниченному набору принципов построения [Степенщиков, Аксенов, 2022].

Отойдем от метода построения первой обклейки отдельного блока и будем рассматривать разбиения послойно [Степенщиков, Аксенов, 2022]. При этом, будем различать белые блоки, соединяемые на одном уровне и серые блоки, находящиеся выше слоя белых

блоков на половину длины ребра блока. Если блокистыкуются только по полным граням, то возможен единственный тип слоя. Если в таком слое хотя бы одна пара блоков стыкуется по половине грани, то каждый блок из этой пары порождает бесконечные параллельные цепочки блоков. К этим цепочкам могут примыкать другие бесконечные цепочки, стыкуемые с данными по целым или по половине граней. Структура второго и всех последующих слоев разбиения пространства также подчиняется вполне определенным принципам, при котором расположение серых блоков задается структурой первого слоя.

Таким образом, нами выполнен детальный анализ разбиения пространства кубическими S6R-блоками ловозеритового типа, что существенно расширяет подход, предложенный ранее [Кривовичев, 2015].

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ (№ 20-77-10065-П) и в рамках темы Госзадания № 124020100059-2.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Кривовичев С.В. Локальный подход и теория ловозеритовых структур // Труды Математического института им. В.А.Стеклова. 2015. Т. 288. С. 120–132.
2. Степенщиков Д.Г., Аксенов С.М. Полиморфизм каркасов ловозеритового типа: особенности сочленения S6R-блоков и принципы генерации новых структур // Сб. статей ... XXVIII Всероссийской научной конференции «Уральская минералогическая школа – 2022». 2022. С. 146–149.
3. Pekov I.V., Krivovichev S.V., Zolotarev A.A. et al. Crystal chemistry and nomenclature of the lovozerite group // European Journal of Mineralogy. 2009. V. 21. P. 1061–1071.

## ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ: ПРИРОДА ЭФФЕКТА И ФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ

**Упоров С.А.<sup>1</sup>, Евдокимов И.В.<sup>1</sup>, Сидоров В.А.<sup>2</sup>, Щелкачев Н.М.<sup>2</sup>, Быков В.А.<sup>1</sup>,  
Котенков П.В.<sup>1</sup>, Черепанова Л.А.<sup>1</sup>, Балякин И.А.<sup>1</sup>, Рыльцев Р.Е.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> ИМЕТ УрО РАН, Екатеринбург, e-mail: segga@bk.ru

<sup>2</sup> ИФВД РАН, Троицк, Москва

Обширные исследования различных аспектов концентрированных многокомпонентных металлических твердых растворов, именуемых как высокоЭнтропийные сплавы (ВЭС), продолжают оставаться одним из ключевых направлений современного материаловедения и технологии. ВЭС демонстрируют уникальное сочетание прочности и пластичности, высокую износостойкость и сопротивление усталости, а также необычный электронный транспорт. Последний пункт представляет наибольший интерес с точки зрения возможных перспектив применения этих материалов для разработки пассивных компонентов электроники (прецзионных резисторов, электрических преобразователей / детекторов механического воздействия).

Большинство сплавов этого класса обладают высоким электрическим сопротивлением, которое практически не зависит от температуры. Это свойство является одним из важнейших технических требований к металлическим материалам при проектировании различных прецизионных резисторов и электромеханических преобразователей, таких как датчики давления или тензодатчики. Недавние исследования, проведенные на некоторых ВЭС, показали, что их электрическое сопротивление сильно зависит как от давления, так и от приложения одноосной механической деформации по сравнению с аналогичными эффектами в обычных сплавах, применяемых в качестве соответствующих датчиков [Uporov et al, 2022; Uporov et al, 2024]. Самым интригующим открытием является то, что тензочувствительность или коэффициент электромеханического преобразования в жаропрочных ВЭС может достигать значений до 5.17, что более чем в два раза превышает

показатели для константана (2.1–2.0), коммерческого тензометрического сплава.

Разработка новых сенсорных материалов требует детального понимания природы физических механизмов, лежащих в основе высокой тензочувствительности в этих системах.

Это исследование сосредоточено на всестороннем анализе эффектов одноосного механического напряжения на электрическое сопротивление в серии эквиатомных твердых растворов на основе элементов подгруппы титана (TiZrHf). Здесь мы обсуждаем электрические, магнитные и теплофизические свойства новых многокомпонентных систем с привлечением результатов *ab initio* моделирования электронной структуры и упругих констант.

Полученные результаты позволяют сформировать научные основы для построения адекватной количественной физической модели для интерпретации аномального тензометрического эффекта в металлических системах данного класса.

*Работа выполнена за счет гранта Российского Научного Фонда № 23-13-00162.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Uporov S.A., Ryltsev R.E., Sidorov V.A. et al. Pressure effects on electronic structure and electrical conductivity of TiZrHfNb high-entropy alloy // Intermetallics, 2022. V. 140. P. 107394.
2. Uporov S.A., Evdokimov I.V., Ryltsev R.E. et al. High entropy alloys as strain-sensitive materials // Intermetallics, 2024. V. 170. P. 108334.

## ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА МАГНИТНЫХ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ ОКСИДОВ СО СТРУКТУРОЙ ШПИНЕЛИ

**Упорова Н.С.<sup>1</sup>, Бубнова П.О.<sup>1,2</sup>, Михайловская З.А.<sup>1</sup>, Петрова С.А.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет, Екатеринбург

<sup>3</sup> Институт Металлургии УрО РАН, Екатеринбург

*bubpolina@yandex.ru, nipurrova84@yandex.ru*

Разработка функциональных материалов с улучшенными свойствами, меньшей стоимостью и экологичностью стала основной необходимостью эволюции продуктов и технологий. В этом направлении керамические материалы играют решающую роль во многих приложениях. Среди них высокоэнтропийные оксиды (ВЭО), представляют собой новые категории керамики, которые обладают многообещающими уникальными, но еще изученными не до конца свойствами. Впервые, высокоэнтропийные оксиды были представлены в работе [Rost et al., 2015]. ВЭО – это класс материалов, в состав которых входит пять или более катионов, находящихся в эквимолярных соотношениях, и имеющих тенденцию к формированию единой кристаллической структуры за счет стабилизации высокой конфигурационной энтропией. На сегодняшний день существует несколько видов однофазных структурных ВЭО, среди них структуры каменной соли, флюорита, пирохлора, перовскита и шпинели. Структура шпинели привлекает наибольшее внимание из-за ее магнитных свойств, а также из-за потенциального применения в электродных материалах для литий-ионных батарей, суперконденсаторов, реакций расщепления воды, каталитических и электрокатализических реакций [Mao et al., 2019].

В настоящей работе были получены высокоэнтропийные оксиды состава  $(\text{Co}_{0.2} + \text{nNi}_{0.2} - \text{nCr}_{0.2} \text{Mn}_{0.2} \text{Fe}_{0.2})_3\text{O}_4$ , где  $n=0, 0.01, 0.02, 0.04, 0.1$ , и изучена их морфология, определены магнитные свойства. Были приготовлены керамические образцы вышеперечисленных ВЭО, определены их плотности, исследована электропроводность при отрицательных температурах. Синтез ВЭО осуществляли глицин-нитратным методом из кристаллогидратов  $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ , а также  $\text{MnO}_2$ , предварительно переведенного в раствор с помощью концентрированной

азотной и щавелевой кислот. Однофазность образцов подтверждена методом рентгенофазовым методом с использованием дифрактометра ДРОН-3 (Россия). ВЭО состава  $(\text{Co}_{0.2} + \text{nNi}_{0.2} - \text{nCr}_{0.2} \text{Mn}_{0.2} \text{Fe}_{0.2})_3\text{O}_4$ , где  $n=0, 0.01, 0.02, 0.04, 0.1$ , имеют структуру шпинели и характеризуются кубической сингонией с пространственной группой Fd-3m. Электропроводность образцов измеряли методом электрохимического импеданса (Z-1000P, Elins, Россия) в частотном диапазоне 100 Гц – 1 МГц в интервале температур -95–30 °C. Установлено, что значения общей электропроводности закономерно снижаются с уменьшением температуры, а энергия активации проводимости составляет ~0.21 эВ для изученных образцов. Магнитные свойства были изучены вибрационным методом в интервале температур 5–300 К. Согласно полевым зависимостям намагниченности, для всех образцов, кроме  $\text{Co}_{0.3}\text{Ni}_{0.1}(\text{CrMnFe})_{0.2}$ , обнаружен магнитный порядок при комнатной температуре, который усиливается при охлаждении. Для единственного образца  $\text{Co}_{0.3}\text{Ni}_{0.1}(\text{CrMnFe})_{0.2}$  намагниченность при уменьшении температуры изменяется по нелинейному закону с плавным перегибом вблизи температуры 150 К, вероятнее связаны с магнитным фазовым переходом «порядок-беспорядок».

*Работа выполнена в рамках Госзадания ИГГ УрО РАН, тема № 124020300057-6.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Rost C.M. et al. Entropy-stabilized oxides // Nat. Commun. 2015. V. 6. P. 8485.
2. Mao A., Quan F., Xiang H.Z., Zhang Z.G., Kuramoto K., Xia A.L. Facile synthesis and ferrimagnetic property of spinel  $(\text{CoCrFeMnNi})_3\text{O}_4$  high-entropy oxide nanocrystalline powder. // J. Mol. Struct. 2019. V. 1194. P. 11–18.

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСТРАКЦИИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ХВОСТОВ ЛОВОЗЕРСКОГО ГОКА С ПОМОЩЬЮ СМЕСИ ХЛОРИД ХОЛИНА + ЛИМОННАЯ КИСЛОТА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

**Филин О.Ю.<sup>1</sup>, Домбровский И.М.<sup>2</sup>, Цветов Н.С.<sup>1</sup>, Аксенов С.М.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Федеральный исследовательский центр Кольский научный  
центр РАН, Анадырь, Россия, s.aksenov@ksc.ru*

<sup>2</sup> *ФГБОУ ВО Мурманский Арктический Университет, Анадырь, Россия, Ivan7952dombr@gmail.com*

Одним из перспективных направлений в области «зеленой химии» является применение глубоких эвтектических растворителей (ГЭР) для различных экстракционных процессов. ГЭР состоят из органических соединений, имеющих низкую токсичность, биоразлагаемых и нелетучих. Существуют данные о достаточно высокой эффективности ГЭР при экстракции металлов. Это делает ГЭР потенциально применимыми для процессов кучного выщелачивания или иных процессов обработки минерального сырья. Однако в зависимости от состава ГЭР, природы входящих в них компонентов (органические многоосновные кислоты, сахара, гликоли и т.д.), а также от дополнительных воздействий (например, микроволновое излучение или ультразвук) может меняться и эффективность ГЭР в отношении экстракции целевых элементов.

В Мурманской области имеется достаточно большое количество отходов горнодобывающей и горноперерабатывающей промышленности, в частности хвостов Ловозерского ГОКа, которые содержат в себе редкоземельные элементы (РЗЭ). В то же время, для извлечения РЗЭ часто требуются агрессивные растворители, такие как концентрированные серная, соляная или азотная кислоты. Поэтому поиск возможных экологически чистых аналогов кислот остается актуальным.

В работе представлены данные об оценке эффективности экстракции некоторых РЗЭ из хвостов Ловозерского ГОКа с помощью смеси – хлорид холина + лимонная кислота + вода (в молярном соотношении 1 : 2 : 10) под воздействием ультразвука и при нагревании до 60 °C. Обработка проводилась 1–4 часа. Полученные растворы выщелачивания были проанализированы методом атомно-абсорбционной спектроскопии с индуктивно связанный плазмой с использованием масс-спектрометра ELAN 9000 (PerkinElmer, США).

Показано, что концентрация лантана, церия, празеодима и неодима в первые 3 часа монотонно возрастает, а затем резко падает, что, возможно, связано с образованием нерастворимых соединений. При этом было замечено, что для указанной смеси, степень извлечения этих элементов оказывается в пределах всего лишь 3–5%. Однако, эти данные могут быть использованы для дальнейшего поиска более эффективных составов ГЭР, способов обработки и предобработки сырья, а также комбинированных процессов извлечения.

*Работа выполнена при финансовой поддержке  
Минобрнауки России (соглашение о предостав-  
лении гранта №075-15-2024-534).*

## МИКРОСТРУКТУРА И СОСТАВ КОСМИЧЕСКИХ И ЗЕМНЫХ МАГНИТНЫХ МИКРОМЕТЕОРИТОВ ИЗ АНТАРКТИДЫ

**Цельмович В.А.<sup>1</sup>, Кузина Д.М.<sup>2</sup>, Муфтахетдинова Р.Ф.<sup>3</sup>, Яковлев Г.А.<sup>3</sup>,  
Ежов В.Ф.<sup>4</sup>, Четвериков Ю.О.<sup>4</sup>, Булат С.А.<sup>3,4</sup>**

<sup>1</sup> ГО «Борок» ИФЗ РАН, Москва, Россия, tselm@mail.ru,

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО КФУ, Казань, Россия

<sup>3</sup> ФГАОУ ВО УрФУ, Екатеринбург, Россия

<sup>4</sup> НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

Лучшим местом для оценки количества и состава поступающего на Землю космического вещества считается Антарктида. Отбор проб и определение в них типа и количества космических и иных микро-частиц, попавших в пробу за время отбора, в условиях Антарктиды представляет мультидисциплинарный интерес. Эти исследования могут пролить свет на природу межзвёздных облаков, через которые регулярно проходит Солнечная система [Maconi et al., 2025]. Космическая пыль (КП) непрерывно падает на Землю.

Результат сбора пыли зависит от конструкции ловушки, от условий и времени сбора. Сбор пыли при помощи ловушки из NdFeB магнитов на станции «Восток» был проведен с 27.12.2023 по 23.01.2024 г. Микроструктура и состав 132 частиц проанализированы в ГО «Борок», УрФУ, КФУ. В пробах обнаружены железосодержащие (магнитные) частицы КП или микрометеоритов, схожие с такими же частицами, ранее найденными многими авторами, выделившими их из различных объектов [Бадюков и др., 2015; Цельмович и др., 2019]. Особенностью частиц, обнаруженных в одной из проб, было содержание в них олова (Sn) (в металлической и оксидной формах) и (металлической) меди (Cu).

Выделены следующие компоненты собранной пыли:

1. Микрометеориты: частицы Fe-Ni сплавов в виде тонкозернистых шлаковидных и непереплавленных частиц (аналогичных найденным в Арктике [Бадюков и др., 2015]).
2. Компонента редкого метеорита, или техногенная, частицы Sn и Cu, сплава Fe-Ti.
3. Терригенная компонента: частицы NaCl, предположительно компонент аэрозолей морской соли; частицы алюмосиликатов, кальцитов, магнетита, кварца.

4. Фоновая космическая компонента [Цельмович и др., 2019]: пластинки чистого самородного Fe. Карты распределения в характеристическом рентгеновском излучении Fe, Ni, Si, Al, Mg, K, Ca показали, что пластинка Fe размером 250 x 50 мкм покрыта частицами микронного размера различного состава. Отмечены частицы тэнита, камасита, алюмосиликатов, железоалюмомагниевых силикатов, калиевых шпатов, кальцитов.

*Работа выполнена в рамках госзаданий ИФЗ РАН и НИЦ КИ-ПИЯФ, а также при поддержке Миннауки РФ в рамках Программ развития УрФУ и КФУ в соответствии с программой стратегического академического лидерства «Приоритет-2030»*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Бадюков Д.Д., Брандштеттер Ф., Топа Д. Тонкозернистые шлаковидные и непереплавленные микрометеориты: их источники и связь с космическими сферулами // Геохимия. 2015. № 11. С. 1026–1039.
2. Цельмович В.А., Куражковский А.Ю., Казанский А.Ю., Щетников А.А., Бляхарчук Т.А., Филиппов Д. А. Исследования динамики поступления космической пыли на земную поверхность по торфяным отложениям // Физика Земли. 2019. № 3. С. 150–160.
3. Maconi E., Alves J., Swiggum C., Ratzenbock S., Grosschedl J., Kohler P., Miret-Roig N., Meingast S., Konietzka R., Zucker C., Goodman A., Lombardi M., Knorr G., Lohmann G., Forbes J. C., Burkert A., and Opher M. The Solar System's passage through the Radcliffe wave during the middle Miocene. A&A. 2025. 694, A167.

## ИЗУЧЕНИЕ ФАЗОВЫХ ОТНОШЕНИЙ В ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМАХ С УЧАСТИЕМ ПЛАТИНОИДОВ И ХАЛЬКОГЕНОВ

Чареев Д.А.

Институт экспериментальной минералогии им. академика Д.С. Коржинского РАН,  
Черноголовка, Россия, charlic@mail.ru

Построение фазовых диаграмм многокомпонентных систем и поиск новых химических соединений представляет интерес для различных прикладных применений – в минералогии, химической технологии, материаловедении, технологии материалов. Для понимания условий формирования месторождений необходимо знание физико-химических параметров образования соединений и фазовых отношений в соответствующих термодинамических системах. Новые обнаруженные химические соединения могут впоследствии быть найдены в виде минералов в природе.

В докладе рассказано про изучение фазовых отношений в трехкомпонентных системах с участием платиноидов и халькогенов, иногда с участием других переходных металлов, пниктогенов и металлоидов. Обычно строились изотермические сечения

при 350–650 °C с помощью изучения продуктов закалки комбинацией методов РФА и РСМА. Синтез проводился «сухим» методом в ампулах из кварцевого стекла.

Для доказательства прихода систем к равновесию применялся метод подхода с двух сторон: иногда синтез и долговременный отжиг проводился из элементов, а иногда – из однофазного закаленного расплава. Основными сложностями при интерпретации данных РСМА является отсутствие общего равновесия (существуют только локальные равновесия), наличие фаз размером меньше, чем зона возбуждения РСМА, и образование структур распада.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РНФ, проект № 25-77-20013.*

## АНИЗОТРОПИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ В ОЦК-ФАЗАХ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ СПЛАВОВ

Черепанова Л.А., Хазиева Е.О., Рыльцев Р.Е., Упоров С.А.

ИМЕТ УрО РАН, Екатеринбург, freefly88@mail.ru

Композиционно сложные металлические твердые растворы с ОЦК структурой на основе элементов подгруппы титана (TiZrHf) обладают специфическим электронным транспортом в условиях одноосной упругой механической деформации. Недавние исследования показали, что существует практически линейная корреляция между коэффициентами тензометрической чувствительности ( $GF$ ) и параметром анизотропии Зенера ( $Az$ ), т. е.  $GF$  в рассматриваемом классе систем представляет собой некоторую функцию тензора упругих констант [Uporov et al, 2022; Uporov et al, 2024]. Однако количественное описание результатов тензометрии в рамках предложенной концепции представляет собой сложную задачу в силу в силу того факта, что имеющиеся экспериментальные и расчетные данные для компонент тензора упругости выявляют существенную неопределенность (более 200%) для сдвиговых модулей и констант анизотропии.

Поиск возможных путей разрешения этой проблемы является одной из первостепенных задач для адекватной интерпретации тензометрического эффекта и последующего построения эффективных алгоритмов дизайна новых сенсорных сплавов. В данном исследовании предлагается нестандартный подход к определению констант кристаллической анизотропии неупорядоченных ОЦК твердых растворов посредством анализа тензора термического расширения методами дифракционных картин. Некоторые ОЦК-фазы сложного химического состава проявляют аномальное поведение теплового расширения вследствие сильной анизотропии коэффициента Пуассона, что свидетельствует об очевидном противоречии с классическими представлениями об отсутствии анизотропии термического расширения в кубических кристаллах [Gong et al., 2021].

Имеющиеся в литературе экспериментальные наблюдения указывают на перспективность обо-

значенного анализа для выявления эффектов кристаллической анизотропии в многокомпонентных твердых растворах с кубической решеткой.

В данной работе проведен комплексный анализ термической эволюции ОЦК структуры высокoenтропийных сплавов TiZrHfNb и TiZrHfNbTa с привлечением экспериментальной высокотемпературной рентгеновской дифракции и результатов *ab initio* моделирования. Полученные результаты выявляют качественное и количественное согласие для коэффициентов термического расширения и его ориентационного поведения по кристаллографическим плоскостям в соответствии со спецификой анизотропии упругих констант.

В рамках используемого подхода обсуждаются вероятные причины анизотропного поведения теплового расширения в этом классе металлических материалов и вопросы количественных оценок констант кристаллической анизотропии.

*Работа выполнена за счет гранта Российского Научного Фонда № 23-13-00162.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Uporov S.A., Ryltsev R.E., Sidorov V.A. et al. Pressure effects on electronic structure and electrical conductivity of TiZrHfNb high-entropy alloy // Intermetallics, 2022. V. 140. P. 107394..
2. Uporov S.A., Evdokimov I.V., Ryltsev R.E. et al. High entropy alloys as strain-sensitive materials // Intermetallics, 2024. V. 170. P. 108334.
3. Gong D. L. et al. Tuning thermal expansion by a continuing atomic rearrangement mechanism in a multifunctional titanium alloy // Journal of Materials Science & Technology, 2021. V. 80. P. 234–243.

## НОВЫЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫЕ ОКСИДЫ СО СТРУКТУРОЙ ПЕРОВСКИТА ДЛЯ ЗЕЛЕНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

**Черепанова Л.А., Эстемирова С.Х., Печищева Н.В., Бурдина Л.Г.**

*Институт металлургии им. Н.А. Ватолина УрО Российской академии наук, Россия, freefly88@mail.ru*

Высокоэнтропийные оксиды (ВЭО) – это новый класс материалов с уникальной структурой и мультикомпонентным составом, которые представляют собой неупорядоченные твердые растворы. В основе стабилизации однофазной кристаллической структуры лежит повышенная конфигурационная энтропия системы (Сконф) с эквимолярным или почти эквимолярным катионным составом [Sarkar, et al. 2020].

Наиболее популярными для создания новых ВЭО являются структуры каменной соли, флюорита, перовскита, пирохлора и шпинели [Liu et al. 2023]. Для перовскитов характерно разнообразие элементного состава и электронных конфигураций, а также структурная стабильность, что делает их привлекательным материалом для сорбционных и каталитических технологий.

В данной работе мы получили два однофазных ВЭО составов Ca<sub>(Ti<sub>0.25</sub>Sn<sub>0.25</sub>Nb<sub>0.125</sub>Ta<sub>0.125</sub>Me<sub>0.25</sub>)O<sub>3</sub></sub> (Me=Fe (далее ВЭО-Fe), Zr (далее ВЭО-Zr)) с перовскитоподобной структурой простым одностадийным синтезом T=1400 °C в течение 12 часов. Элементный состав был подобран исходя из электронной конфигурации, обеспечивающей фотокаталитические свойства. РДА показал, что исходные ВЭО были однофазными с орторомбической структурой, пространственная группа *Pbnm*.

Методом сканирующей электронной микроскопии изучены карты распределения элементов и подтверждено, что элементы распределены в образцах однородно. Параметры элементарной ячейки для ВЭО-Fe имеют более низкие значения, чем для ВЭО-Zr. Различие параметров связано с различными радиусами катионов железа и циркония. Для обоих составов значения толерантного фактора ( $f_{tol}$ ), характеризующего устойчивость перовскитной структуры, были близки к единице и мало отличались друг от друга.

Большая разница катионов в В-позиции (18–19%) АВО<sub>3</sub> перовскитной структуры не послужила препятствием к образованию твердых растворов ВЭО-Fe и ВЭО-Zr.

Для перевода порошков в высокодисперсное состояние была использована высокоэнергетическая планетарная мельница. Механоактивационное воздействие привело к фазовому расслоению на орторомбическую и тетрагональную фазы, причем более высокую устойчивость показал состав ВЭО-Zr. Исследование фотокаталитических и сорбционных свойств показали, что оба состава продемонстрируют способность к восстановлению Cr (VI) при освещении УФ-светом. Экотоксикант – Cr (VI) – при освещении в присутствии ВЭО превращается в менее вредную для окружающей среды форму хрома – Cr Я(III). Оба образца продемонстрировали высокую сорбционную активность по отношению к красителю метиленовый синий – оба практически полностью сорбируют краситель.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИМЕТ УрО РАН на оборудовании центра коллективного пользования «Урал-М».*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Liu Z.-Y., Liu Y., Xu Y., Zhang H., Shao Z., Wang Z., Chen H. Novel High-Entropy Oxides for Energy Storage and Conversion: From Fundamentals to Practical Applications // Green Energy Environ. 2023. V. 8. P. 1341–1357.
2. Sarkar A., Breitung B. Hahn H. High entropy oxides: The Role of Entropy, Enthalpy and Synergy // Scripta Mater. 2020. V. 187. P. 43–48.

## ГЕНРИМЕЙЕРИТ В КАРБОНАТИТАХ МАССИВА СРЕДНЯЯ ЗИМА, ВОСТОЧНЫЙ САЯН

Шарыгин В.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ИГМ им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия, sharygin@igm.nsc.ru

<sup>2</sup> Физико-технологический институт, УрФУ, Екатеринбург, Россия

Генримейерит Ba  $(\text{Ti}^{4+}, \text{Fe}^{2+}) \text{O}_{16}$ , представитель надгруппы голландита, был обнаружен в качестве акцессорного минерала в карбонатитах массива Средняя Зима, Восточный Саян [Пожарицкая, Самойлов, 1972]. Карбонатиты, содержащие генримейерит, представлены среднезернистыми клинопироксен-кальцитовыми разновидностями. Количество кальцита – до 50% от объема породы. Меланократовые минералы представлены Mg-Fe-силикатами (клинопироксены, амфиболы, слюды, Fe-хлорит и серпентин). Фторапатит, титанит, полевые шпаты и сульфиды являются обычными составляющими этих карбонатитов.

Редкие Ba-Se-REE-карбонаты, монацит – (Ce), барит, Ti-оксиды, циркон, баотит и чевкенит – (Ce) присутствуют как акцессории. Генримейерит был выявлен в ассоциации с титанитом, баотитом, ильменитом и рутилом на контакте зерен породообразующих минералов и в виде включений в раннем Na-Сa-клинопироксene ( $\text{Ae}_{44-47}\text{Di}_{27-28}\text{Hd}_{24-27}$ ). Предполагается, что в карбонатитах Средней Зимы этот минерал имеет магматическое происхождение. Он кристаллизовался после раннего клинопироксена и слюды, а его взаимоотношения с другими Ti-минералами указывают на следующую последовательность их формирования: генримейерит → титанит → ильменит → рутил, баотит. При этом в породах наблюдаются четкие признаки замещения (обрастания) генримейерита титанитом и ильменита генримейеритом. В качестве главных компонентов минерал содержит  $\text{TiO}_2$  (67.8–71.6 мас.%),  $\text{BaO}$  (18.3–18.9 мас.%) и  $\text{FeO}_{\text{total}}$  (9.4–11.6 мас.%). Концентрации второстепенных компонентов не высоки (в мас. %):  $\text{CaO}$  и  $\text{V}_2\text{O}_3$  – 0.2–0.4;  $\text{K}_2\text{O}$  – 0.0–0.1;  $\text{MnO}$  – 0.0–0.3; и только для  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  характерны существенные вариации (0.4–2.9 wt. %). Согласно КР-спектроскопии генримейерит не содержит  $\text{H}_2\text{O}$ . В целом, минерал сильно отклоняется

в сторону гипотетического состава Ba  $(\text{Ti}_6\text{Fe}^{3+}) \text{O}_{16}$  (до 28.4 мол. %), а содержание собственно генримейеритового минала Ba  $(\text{Ti}^{4+}, \text{Fe}^{2+}) \text{O}_{16}$  составляет 65.5–94 мол. %. Именно по этим химическим параметрам генримейерит Средней Зимы немного отличается от голотипа с Kovdorского массива [Mitchell et al., 2000] и этого минерала с других проявлений мира [Cegiełka et al., 2022 и ссылки здесь]. Следует отметить еще одну особенность для генримейерита Средней Зимы: в случаях, когда он замещает (обрастает) ильменит или сам замещается титанитом, замещаемый минерал обычно наследует содержания  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  от предшественника.

*Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 23-17-00098, сканирующая микроскопия) и государственного задания ИГМ СО РАН (FWZN-2022-0035, № 122041400312) и Минобрнауки РФ в рамках Программы развития УрФУ в соответствии с программой «Приоритет-2030».*

### ЛИТЕРАТУРА

- Пожарицкая Л.К., Самойлов В.С. Петрология, минералогия и геохимия карбонатитов Восточной Сибири. Москва: Наука, 1972. 270 с.
- Mitchell R.H., Yakovenchuk V.N., Chakhmou-radian A.R., Burns P.C., Pakhomovsky Y.A. Henrymeyerite, a new hollandite-type Ba-Fe titanate from the Kovdor Complex, Russia // Can. Mineral. 2000. V. 38. P. 617–626.
- Cegiełka M., Bagiński B., Macdonald R., Marcinia-k-Maliszewska B., Stachowicz M. Ba-Fe titanates in peralkaline granite of the Ilímaussaq Complex, South Greenland // Acta Geol. Polonica. 2022. V. 72 (1). P. 1–8.

## Ва-Фе-титанаты в сидеритовых породах массива Томтор

Шарыгин В.В.<sup>1,2</sup>, Лазарева Е.В.<sup>1</sup>, Ращенко С.В.<sup>1</sup>, Нигматулина Е.Н.<sup>1</sup>, Жмодик С.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ИГМ им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия, sharygin@igm.nsc.ru

<sup>2</sup> Физико-технологический институт, УрФУ, Екатеринбург, Россия

Ва-Фе-титанаты были выявлены в сидерит-гирослюдистой породе в пределах сидеритового горизонта, который располагается ниже богатых REE-Y-Nb-Sc руд, участок Южный, месторождение Томтор, Полярная Сибирь, Республика Саха (Якутия) [Лазарева и др., 2015]. Сидерит, гидрослюдя (Al-глауконит – иллит ?), каолинит и горсейксит являются главными минералами породы, второстепенными - Ва-Фе-титанаты, рутил, циркон, монацит-(Ce) и др. Непрозрачные Ва-Фе-титанаты, хромит и циркон - это, скорее всего, реликты щелочных пород массива Томтор. Все они содержат большое количество субмикронных минеральных включений, представленных брэдлиитом и фторапатитом, реже встречаются ханнешит и флогопит. Доминирующий Ва-Фе-титанат (tomtorite, IMA 2025-020) относится к группе кричтонита [Расцветаева, 2020], а второй – к группе прайдерита, надгруппа голландита [Biagioni et al., 2013]. Оба минерала образуют ограниченные зерна (до 50–100  $\mu\text{m}$ ), часто – срастания между собой, при этом прайдеритовая фаза более ранняя, чем томторит.

Идеальная формула томторита –  $\text{BaMnFe}^{2+}_2(\text{Fe}^{3+}_4\text{Ti}_2)\text{Ti}_{12}\text{O}_{38}$  (пространственная группа  $R\bar{3}$ , параметры ячейки:  $a = 10.447$  (2) Å,  $c = 20.882$  (4) Å;  $V=1973.8$  (7) Å<sup>3</sup>;  $Z = 3$ ), минерал является Ва-аналогом кричтонита  $\text{SrMnFe}^{2+}_2(\text{Fe}^{3+}_4\text{Ti}_2)\text{Ti}_{12}\text{O}_{38}$ . Расшифровка его кристаллической структуры показала наличие шести доминантных позиций  $M0$ - $M5$  и четырех позиций  $X1$ - $X4$ , которые заполнены лишь на 10%. Между позициями  $M$  и  $X$  происходит обмен катионами, что приводит к появлению вакансий в  $M$  позициях, прежде всего в  $M2$ . Состав существенно варьирует (в мас.%,  $n=562$ ): BaO – 3.7–4.4, TiO<sub>2</sub> – 58.3–62.4, FeO<sub>tot</sub> – 20.5–24.6, MnO – 3.8–5.3, ZrO<sub>2</sub> – 0.4–2.4, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 1.5–4.5, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0.2–1.5, ZnO – 0.1–0.9, SrO и PbO – 0.1–0.7, Na<sub>2</sub>O – 0.3–0.6, K<sub>2</sub>O – 0.2–1.0. Иногда в кристаллах фиксируется зональность с чередованием зон, обогащенных Nb, Nb+K, K, K-Fe-Nb и Cr. В целом, концентрации гипотетических K- и Na-

минералов могут достигать 25–30 мол. % (каждый), а усредненный состав томторита близок к  $(\text{Ba}_{0.5}\text{Na}_{0.25}\text{K}_{0.25})\text{Mn}(\text{Fe}^{2+}_{1.5}\text{Fe}^{3+}_{0.5})(\text{Fe}^{3+}_4\text{Ti}_2)\text{Ti}_{12}\text{O}_{38}$ .

Вторая фаза имеет идеальную формулу Ва ( $\text{Fe}^{3+}_2\text{Ti}_6$ ) O<sub>19</sub> и является Fe<sup>3+</sup>-аналогом генримейерита Ва ( $\text{Fe}^{2+}\text{Ti}_7$ ) O<sub>16</sub> [Mitchell et al., 2000] и Ва-аналогом прайдерита К ( $\text{Fe}^{3+}\text{Ti}_7$ ) O<sub>16</sub>. Иногда проявляется зональность: центр обогащен Cr, а край – K. Вариации состава (в мас.%,  $n=112$ ): TiO<sub>2</sub> – 61.9–67.9, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и PbO – 0.0–0.6, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0.4–4.5, V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0.4–2.2, FeO<sub>tot</sub> – 11.6–14.6, BaO – 12.0–17.5, K<sub>2</sub>O – 0.6–2.5. В миналах (в мол. %): Ва ( $\text{Fe}^{3+}_2\text{Ti}_6$ ) O<sub>19</sub> – 51.8–70.0, прайдерит – 10.3–39.8, генримейерит – 0.0–9.9, редледжент – 1.2–20.7, маннардит – 1.4–9.9.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 23-63-10017, полевые исследования, сканирующая микроскопия, микрозонд), гос. задания ИГМ СО РАН (FWZN-2022-0035; -0033; № 122041400312, № 122041400193-7) и Минобрнауки РФ в рамках Программы развития УрФУ в соответствии с программой «Приоритет-2030».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лазарева Е.В., Жмодик С.М., Добрецов Н.Л. и др. Главные рудообразующие минералы аномально богатых руд месторождения Томтор (Арктическая Сибирь) // Геология и геофизика. 2015, Т. 56, № 6, С. 1080–1115.
2. Расцветаева Р.К. Кричтонит и его семейство: история открытия двух новых минералов // Природа. 2020. № 8. С. 39–47.
3. Biagioni C., Capalbo C., Pasero M. Nomenclature tunings in the hollandite supergroup // Eur. J. Mineral. 2013. V. 25 (1), P. 85–90.
4. Mitchell R.H., Yakovenchuk V.N., Chakhmouradian A.R. et al. Henrymeyerite, a new hollandite-type Ba-Fe titanate from the Kovdor Complex, Russia // Can. Mineral. 2000. V. 38. P. 617–626.

## МИНЕРАЛЬНЫЕ АССОЦИАЦИИ МЕТЕОРИТА ЧЕЛЯБИНСК: МИНЕРАЛОГИЯ КОРЫ ПЛАВЛЕНИЯ

Шарыгин В.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ИГМ им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия, sharygin@igm.nsc.ru

<sup>2</sup> Физико-технологический институт, УрФУ, Екатеринбург, Россия

При изучении метеоритов обычно очень мало внимания уделяется коре плавления, образующейся при входжении метеороида в атмосферу Земли. Однако, именно она показывает, что происходит при плавлении метеоритным веществом в условиях повышающейся  $fO_2$ .

В данном сообщении рассматривается минералогия коры плавления на примере обыкновенного хондрита LL5 Челябинск. В коре плавления (обычно – <500  $\mu\text{m}$ ) этого метеорита выявляются две зоны. Внешняя зона представлена криптокристаллическим агрегатом скелетных кристаллов зональных оливина и магнетита (до 5  $\mu\text{m}$ ) и стеклом (44–47 мас. %  $\text{SiO}_2$ ). Внутренняя зона содержит более крупные кристаллы новообразованного оливина, стекло и второстепенный магнетит. В обеих зонах обычно присутствуют окружные реликты исходного хондритового оливина и хромита, а также новообразованные высоко-Ni металл-сульфидные глобулы (до 10–20  $\mu\text{m}$ ).

Следующие фазы были выявлены в глобулах: два хизлевудитовых твердых раствора ( $\text{Hzss}1 - \text{Ni}_{3\pm x}\text{S}_2$ ,  $\text{Hzss}^2 - (\text{Ni}, \text{Fe})_{4\pm x}\text{S}_3$ ) + годлевскитовый твердый раствор ( $\text{Gdss} - (\text{Ni}, \text{Fe})_{7\pm x}\text{S}_6$ ), никель, аварийт  $\text{Ni}_3\text{Fe}$ , пентландит ( $\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$ , тетратэнит, реже тэнит, камасит (мартенсит) и обогащенный платиноидами (Os-Ir-Pt, PGE) Ni-Fe-металл. В целом, фазовый состав глобул сильно зависит от их положения в конкретной зоне коры плавления. Так ассоциация  $\text{Hzss}1 +$  никель (или аварийт)  $\pm$  PGE фаза являются доминантными в глобулах из внешней зоны, тогда как  $\text{Hzss}^2$ ,  $\text{Gdss}$ , пентландит и другие фазы, с меньшим содержанием Ni, характерны для глобул внутренней зоны. Вюстит  $\text{FeO}$  и бунзенит  $\text{NiO}$  иногда появляются в виде оторочки вокруг глобул состава  $\text{Hzss}1 +$  никель. Следует также отметить, что в коре плавления по тонкозернистому силикатному агрегату ассоциации импактного расплава постоянно присутствуют пентландит + оксидная фаза (магнетит).

Сам процесс оплавления поверхности фрагментов хондрита Челябинск происходил при  $T \approx 2000^\circ\text{C}$  при

взаимодействии с атмосферой Земли. Именно повышение  $fO_2$  способствовало появлению метастабильных вюстита/ бунзенита и PGE фазы до массовой кристаллизации магнетита. Процесс плавления приводил к частичному окислению железа в силикатном расплаве и обмену компонентами между металл-сульфидным и силикатным расплавами. При этом металл-сульфидная жидкость существенно обогащалась Ni и обеднялась S и Fe, а силикатный расплав становился более железистым. При этом PGE концентрировались в металл-сульфидной составляющей с образованием PGE фазы, несмотря на быстротечность процессов плавления и последующей кристаллизации. На данный момент помимо метеорита Челябинск PGE фазы были обнаружены в сходных условиях в метеоритах Озерки и Капустин Яр [Шарыгин, 2018; Sharygin, 2019, Grokhovsky et al., 2024].

*Работа выполнена при поддержке государственного задания ИГМ СО РАН (FWZN-2022-0035, № 122041400312) и Минобрнауки РФ в рамках Программы развития УрФУ в соответствии с программой «Приоритет-2030».*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Шарыгин В.В. Высоконикелевые металл-сульфидные глобулы в коре оплавления L6 хондрита Озерки, Липецкая область: предварительные данные // XVIII всероссийская конференция по термобарогеохимии. Москва, ИГЕМ РАН. 2018. С. 148–150.
2. Sharygin V.V. Nickel-rich metal-sulfide globules in fusion crust of Chelyabinsk meteorite // Meteoritics and Planetary Science. 2019. V. 54 (S1). 6363 pdf.
3. Grokhovsky V.I., Sharygin V.V., Yakovlev G.A., Popov A.A., Kokorin A.F. On platinoids in the fusion crust of ordinary chondrites // Meteoritics and Planetary Science. 2024. V. 59 (S1). P. 167–167 (6396. pdf).

## АНИОН-РАДИКАЛ $S_2^-$ В МИНЕРАЛАХ

**Шендрик Р.Ю.<sup>1</sup>, Радомская Т.А.<sup>1</sup>, Канева Е.В.<sup>1</sup>, Чуканов Н.В.<sup>2,3</sup>,  
Паниковский Т.Л.<sup>4</sup>, Вигасина М.Ф.<sup>3</sup>, Пеков И.В.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия r.shendrik@gmail.com,

<sup>2</sup> Федеральный исследовательский центр проблем химической физики  
и медицинской химии РАН, Черноголовка, Россия

<sup>3</sup> Московский государственный университет, Геологический факультет, Москва, Россия

<sup>4</sup>Кольский научный центр РАН, Апатиты, Россия

В докладе будут обобщены опубликованные ранее данные о  $S_2^-$ -содержащих минералах групп содалита, канкринита и скаполита, а также приведены новые данные об анион-радикале  $S_2^-$  в гаюине с соразмерно модулированной структурой и в везувиане. Показано, что анион-радикал  $S_2^-$  достаточно широко распространен в качестве примеси в этих минералах и влияет на их окраску как желтый хромофор, а также на такие физические свойства, как характер люминесценции, ЭПР-, КР- и оптические электронные спектры в видимой и близких ИК- и УФ-областях. Сделан вывод о том, что анион-радикал  $S_2^-$  играет важную роль в геохимии серы и может рассматриваться как информативный геохимический маркер.

*Минералогическое изучение везувиана из Талнахского месторождения выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова, госбюджетная тема № 121061600049-4. Спектры люминесценции и ЭПР исследовались в рамках выполнения государственного задания по Проекту № 0284-2021-0004 и частично по проекту FWME-2024-0004 (рег. номер 124031900001-9). Часть работы, связанная с минералогическим изучением остальных образцов и интерпретацией их рamanовских спектров, выполнена в соответствии с темой государственного задания (номер государственной регистрации 124013100858-3. Работы по исследованию спектров фотolumинесценции выполнены на базе Центра коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований ИГХ СО РАН».*

## ЦИРКОН И ОКСИД ЦИРКОНИЯ ИЗ ЧЕРНОБЫЛЬСКИХ «ЛАВ»: ОБРАЗОВАНИЕ И СВОЙСТВА

Ширяев А.А.<sup>1</sup>, Япаскурт В.О.<sup>2</sup>, Аверин А.А.<sup>1</sup>, Бураков Б.Е.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ИФХЭ РАН, Москва, Россия, shiryaev@phyche.ac.ru

<sup>2</sup> Геол. ф-т МГУ, Москва, Россия

<sup>3</sup> ФТИ им. А.Н. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

В ходе тяжелых реакторных аварий происходит взаимодействие ядерного топлива с конструкционными материалами. Данный процесс характеризуется температурами до 2400 °С и выше, для него характерна сложная кинетика и широкий диапазон фазового и химического разнообразия реагирующих материалов. С минералогической точки зрения одной из самых интересных фаз, возникающих в ходе реальных реакторных аварий и в некоторых экспериментах, является циркон («чернобылит») и оксид циркония, содержащие до 15 вес.% урана. Хотя существование таких минералоподобных фаз известно давно [Бураков и др., 1991], на настоящее время многие аспекты их формирования остаются недостаточно изученными.

На протяжении ряда лет нами проводится систематическое изучение структуры и свойств, в частности, спектроскопических, минералоподобных фаз образовавшихся в ходе аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г [Shiryaev et al., 2016, 2020]. В докладе будут представлены новые данные по спектроскопии агрегатов богатых ураном циркона и оксида циркония и результаты исследования их структуры. Показано существование нескольких генераций циркона, различающихся содержанием урана и ряда других элементов. Установлено присутствие трех полиморфных модификаций  $(\text{Zr},\text{U})\text{O}_2$  – моноклинной, тетрагонально-

и кубической. Стабилизация высокотемпературных модификаций достигается за счет легирования примесью урана. Исследование текстурных соотношений между  $(\text{Zr},\text{U})\text{O}_2$  ( $\text{Zr},\text{U})\text{SiO}_4$  позволяет предположить основные пути формирования циркона с беспрецедентно высокими содержаниями примеси урана в кристаллической решетке.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Бураков Б.Е., Бритвин С.Н., Михеева Е.Э., Ильинский Г.А., Андерсон Е.Б., Пазухин Э.М., Николаева Л.Д., Цирлин В.А., Богданова А.Н. Исследование техногенного циркона из Чернобыльских «лав» // Записки ВМО. 1991. Т. 120 (6). С. 39–44.
2. Shiryaev A.A., Vlasova I.E., Burakov B.E., Ogorodnikov B.I., Yapaskurt V.O., Averin A.A., Pakhnevich A.V., Zubavichus Y.V. Physico-chemical properties of Chernobyl lava and their destruction products // Progress in Nuclear energy. 2016. V. 92. P. 104–118.
3. Shiryaev A.A., Burakov B.E., Vlasova I.E., Nickol'sky M.S., Averni A.A., Pakhnevich A.V. Study of mineral grains extracted from the Chernobyl “lava” // Mineralogy and Petrology. 2020. V. 114. P. 489–499.

## НОВЫЕ ЛЮМИНОФОРЫ $\text{Y}_2(\text{SO}_4)_3:\text{Eu}^{3+}$ С ТЕРМИЧЕСКИМ АНТИ-ТУШЕНИЕМ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

Шорец О.Ю.<sup>1,2</sup>, Шаблинский А.П.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Филиал НИЦ «Курчатовский институт» ПИЯФ - ИХС, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия, olga\_frooze@rambler.ru

Новые уникальные люминофоры  $(\text{Y}_{1-x}\text{Eu}_x)_2(\text{SO}_4)_3$  ( $x = 0, 0.17, 0.33, 0.5, 0.66$ ) с термическим анти-тушением люминесценции из-за гигантского отрицательного термического расширения получены путем кристаллизации из водных растворов. Кристаллическая структура  $\text{Y}_2(\text{SO}_4)_3$  описывается как каркас, состоящий из тетраэдров  $\text{SO}_4$  и октаэдров  $\text{YO}_6$ , объединенных через общие вершины [Wickleder, 2000]. Термическое расширение сульфатов с  $x = 0, 0.17, 0.5$  было исследовано методом порошковой термопрентгенографии. Кристаллическая структура твердого раствора  $x = 0.5$  уточнена методом Ритвельда при 400 и 500 °C до  $\text{RB} = 1.7$  и 1.9%. Установлено, что незначительное смещение тетраэдров  $\text{SO}_4$  приводит к гигантскому отрицательному объемному термическому расширению: структура сжимается во всех направлениях (рис. 1)

$$(\alpha_a = -7 (3), \alpha_b = -15 (3), \alpha_c = -22 (2), \\ \alpha_v = -44 (2) \cdot 10^{-6} \text{ °C}^{-1} \text{ при } 500 \text{ °C} \text{ для } \text{YEu}(\text{SO}_4)_3).$$

Интенсивность фотолюминесценции увеличивается в 1.8 раза с ростом температуры до 500 °C. Термическое антитушение люминесценции  $\text{Eu}^{3+}$  можно описать в терминах термически усиленного переноса энергии между ионами  $\text{Eu}^{3+}$  из-за отрицательного термического расширения матрицы  $\text{Y}_2(\text{SO}_4)_3$  во всех неэквивалентных направлениях.

Работа выполнена за счет гранта Российского Научного Фонда № 22-13-00317.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Wickleder M.S. Wasserfreie Sulfate der Selten-Erd-Elemente: Synthese und Kristallstruktur von  $\text{Y}_2(\text{SO}_4)_3$  und  $\text{Sc}_2(\text{SO}_4)_3$  // Z. Fuer Anorg. Allg. Chem. 2000. V. 626. P. 1468–1472.

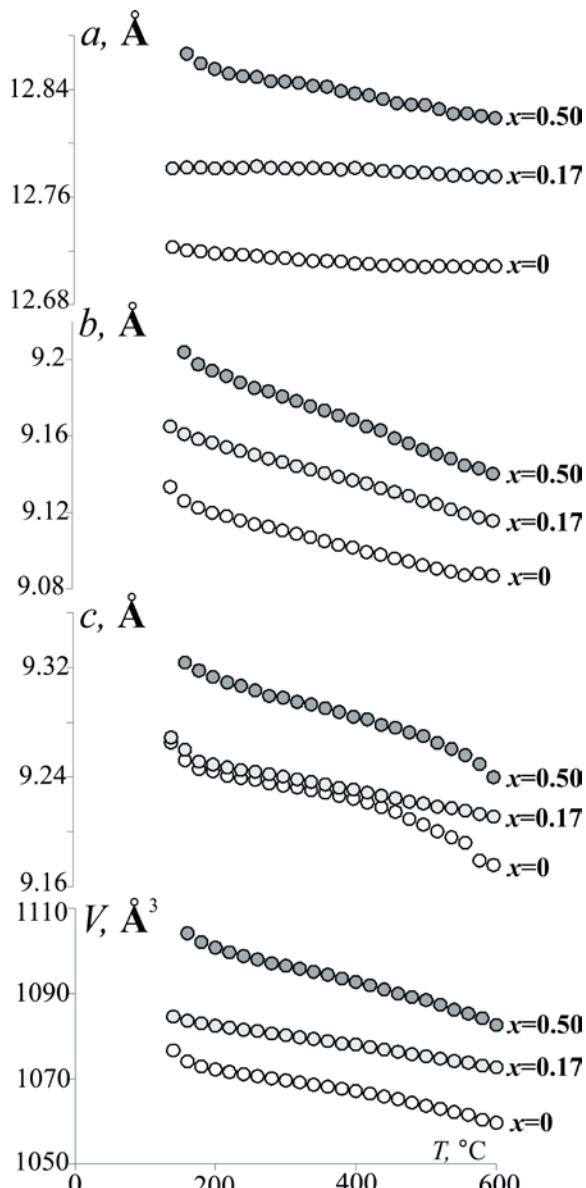


Рис. 1. Температурные зависимости параметров элементарной ячейки для твердых растворов  $(\text{Y}_{1-x}\text{Eu}_x)_2(\text{SO}_4)_3$

## ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ РЕШЕТКИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ОРТОФОСФАТОВ РЗЭ СО СТРУКТУРОЙ МОНАЦИТА

**Щапова Ю.В., Богданова Л.И., Михайловская З.А., Вотяков С.Л.**

*Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заваруцкого УрО РАН,  
Екатеринбург, Россия, bogdanovalouisa@gmail.com*

Многокомпонентные, в том числе высокоэнтропийные, оксиды в последние годы привлекают внимание исследователей в связи с их необычными свойствами, обусловленными особенностями структуры и термодинамики [Brahlek et al., 2022; Baek et al., 2023].

Термически, химически, радиационно стабильные монацитоподобные ортофосфаты редкоземельных элементов рассматриваются как перспективные материалы для термобарьерных покрытий в аэрокосмической промышленности, энергетике; эмпирическим путем была показана возможность улучшения их функциональных характеристик (снижения теплопроводности, повышения коррозионной стойкости к расплавленным солям, подстройки коэффициента термического расширения) за счет увеличения числа РЗЭ до пяти и более [Li et al., 2024; Zhao et al., 2019].

Для целенаправленной модификации состава и свойств необходима разработка физических моделей влияния типа катионов, величины конфигурационной и колебательной энтропии, степени структурного беспорядка на температурную динамику решетки многокомпонентных материалов. В настоящей работе методом химического осаждения (прекурсоры – нитраты исходных РЗЭ, дигидрофосфат аммония, pH=2) с последующим отжигом синтезированы одно- ( $\text{Ln}_1\text{PO}_4$ ) и пятикомпонентные ( $(\Sigma\text{Ln}_{i_1})\text{PO}_4$ ) ортофосфаты моноклинной структуры (*pr. gr. P2/n*), где  $\text{Ln}_i = \text{La}, \text{Ce}, \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Gd}, \text{Dy}$ . Величина конфигурационной энтропии всех пятикомпонентных керамик одинакова и невелика; энтропийная метрика, рассчитанная в соответствии с [Dippo, Vecchio, 2021], составляет  $\text{EM} = 0.8$ . Методом спектроскопии комбинационного рассеяния света получены зависимости энергии и ширины решеточных мод и характеристических мод тетраэдров  $\text{PO}_4$  от типа и набора катионов в диапазоне температур  $T=80-770$  К. Установлено уширение мод деформацион-

ных колебаний в многокомпонентных фосфатах по сравнению с однокомпонентными при одинаковой температуре. Температурная чувствительность положения колебательных мод (величина  $d\nu/dT$ , взятая при  $T=300\text{K}$ ) в многокомпонентных фосфатах снижена по сравнению с однокомпонентными. Выполнен анализ ангармонизма колебаний и оценено соотношение вкладов расширения решетки и рассеяния фононов, определяющих коэффициент термического расширения и теплопроводность соединений.

*Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН в рамках Государственного задания ИГГ УрО РАН по теме № 124020300057-6.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Brahlek M., Gazda M., Keppens V., et al. What is in a name: Defining “high entropy” oxides // 2022. APL Mater. V. 10. P. 110902.
2. Baek J., Hossain M.D., Mukherjee P., et al. Synergistic effects of mixing and strain in high entropy spinel oxides for oxygen evolution reaction // Nature Communications. 2023. V.14. P. 5936.
3. Li L., Sun J., Lu W., Xu Z. Hot corrosion behavior of multicomponent rare earth phosphate materials exposed to molten  $\text{V}_2\text{O}_5$  salt // Ceramics International. 2024. V. 50(17) B. P. 31650–31664.
4. Zhao Z., Chen H., Xiang H., et al.  $(\text{La}_{0.2}\text{Ce}_{0.2}\text{Nd}_{0.2}\text{Sm}_{0.2}\text{Eu}_{0.2})\text{PO}_4$ : A high-entropy rare-earth phosphate monazite ceramic with low thermal conductivity and good compatibility with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  // Journal of Materials Science & Technology. 2019. V. 35. P. 2892–2896.
5. Dippo O.F., Vecchio K.S. A universal configurational entropy metric for high-entropy materials // Scripta Mater. 2021. V. 201. P. 113974.

## ПОЛЯРИМЕТРИЯ В КАЧЕСТВЕ ПОДДЕРЖКИ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Щербина М.П.<sup>1</sup>, Киселев Н.Н.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт астрономии РАН, Москва, Россия, mpshcherbina@inasan.ru

<sup>2</sup> Крымская астрофизическая обсерватория РАН, пгт. Научный, Крым.

Для определения физико-химических свойств (оценки преобладающего минералогического типа поверхностного вещества) астероидов традиционно используются такие методы, как спектрофотометрия и фотометрия. На основании спектрофотометрических данных рассчитываются спектры отражения астероидов, по особенностям которых (общий градиент, полосы поглощения) оценивается приблизительный химико-минералогический состав вещества. Обычно используются также дополнительные физические параметры, если они, конечно, определены: альбедо, диаметр, период вращения, показатели цвета.

В настоящее время существуют несколько часто используемых вариантов спектральной классификации астероидов: классификация, предложенная Толеном [Tholen, 1984], классификация SMASS авторства Баса и Бинзела (а также дополнения и расширения, связанные с увеличением диапазона длин волн) [Bus, Binzel, 2002], заявившая о себе совсем недавно классификация Малке [Mahlke et al., 2022]. Все три классификации преемственны относительно друг друга, имеются различия в выбранных параметрах для разделения спектров отражения по отдельным классам, а значит, имеется некоторая вариативность результата в зависимости от выбора конкретной системы. Так, например, астероид 339 Dorothea (Доротея) имеет оценку принадлежности к S/K/B – классам по Tholen/SMASSII/ Mahlke.

Поэтому возникает идея привлечения другого вида данных для более точного определения спектрального класса, то есть преобладающего типа минералогии вещества. В качестве такого инструмента может быть успешно применены результаты

поляриметрических исследований астероидов, как независимой поддержки. Поляриметрические исследования основаны на измерении характеристик поляризованного излучения, то есть всех свойств рассеянного света (как скалярных, так и векторных), что значительно дополняет фотометрические свойства исследуемых тел. В данном исследовании рассматривается фазовая зависимость линейной поляризации астероидов.

В докладе будет показано, как возможно привлечь данные, полученные методом поляриметрии, для уточнения существующих спектральных классификаций: Tholen, SMASSII и Mahlke, а также сделана предварительная оценка каждой из них, основываясь на однородности поляриметрических свойств астероидов известных классов.

*Работа выполнена в рамках государственного задания, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 225020608981-1 Исследование объектов Солнечной системы (шифр – ABROPA).*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Bus S.J., Binzel R.P. Phase II of the small main-belt asteroid spectroscopic survey: A feature-based taxonomy // Icarus. 2002. V. 158 (1). P. 146–177.
2. Mahlke M., Carry B., Mattei P. A. Asteroid taxonomy from cluster analysis of spectrometry and albedo // Astronomy & Astrophysics. 2022. V. 665. id. A26.
3. Tholen D.J. Asteroid taxonomy from cluster analysis of photometry. The University of Arizona, 1984.

## КРИСТАЛЛОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТУРМАЛИНОВ ИЗ КОЛЛЕКЦИИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО МУЗЕЯ ИМ. А.А. ШТУКЕНБЕРГА КФУ

Ягудина Л.А., Музаров Р.Н.

*КФУ, Казань, Россия, lagudina87@gmail.com, RafNMuzafarov@kpfu.ru*

В настоящей работе приводятся результаты изучения образцов цветных разновидностей турмалинов из месторождений Среднего Урала (районы деревень Мурзинка, Сарапулка, Шайтанка), Южного Урала (приток реки Санарка река Каменка), Забайкалья (Малханского месторождения), Бразилии (Минас-Жерайс) из коллекции Геологического музея им. А.А. Штуценберга КФУ методами оптической адсорбционной спектроскопии поглощения и рентгенфлюoresцентным анализом (РФА) в лабораториях ИГиНГТ КФУ. Турмалины месторождений России и мира издавна привлекают внимание многих исследователей [Гвозденко и др., 2019; Пшеничный, 2010].

В спектрах образцов, характеризующихся переходом от розового до темно-красного цвета, хорошо выражена широкая интенсивная полоса поглощения. Она связана по своему характеру и положению в спектре с ионами  $Mn^{3+}$ , в которых разрешены по спину ионные d-d переходы  $^5E(G) \rightarrow ^5T_2(G)$ . (рис. 1). Для образцов с зонами окраски от светло-зеленой до темно-зеленой в оптических спектрах поглощения наблюдается широкая интенсивная полоса при 730 нм, которая обусловлена проявлением электронного перехода  $^5T_2(D) \rightarrow ^5E(D)$  в ионах  $Fe^{2+}$  (рис. 2). Микрорентгенфлюoresцентный анализ проводился по точкам вдоль удлинения кристаллов образцов турмалинов. В турмалинах выявлено небольшое содержание ионов марганца, железа, титана, и в отдельных точках ионов хрома, никеля, висмута и tantalа. Исследование музейных коллекций полихромных турмалинов из различных месторождений России и Бразилии современными неразрушающими методами позволило уточнить кристаллохимические особенности изученных кристаллов.

### ЛИТЕРАТУРА

- Гвозденко Т.А., Герасимова Е.И., Бакшеев И.А. Новые данные о турмалине Мурзинских

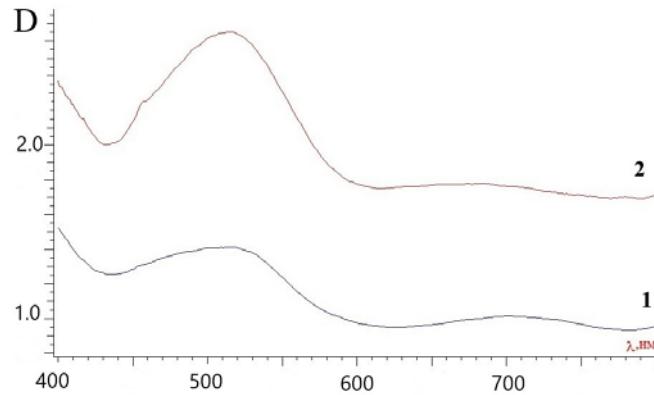


Рис. 1. Оптические спектры поглощения розово-красных турмалинов. 1 – турмалин (Забайкалье, Малхан); 2 – турмалин (Ср. Урал)

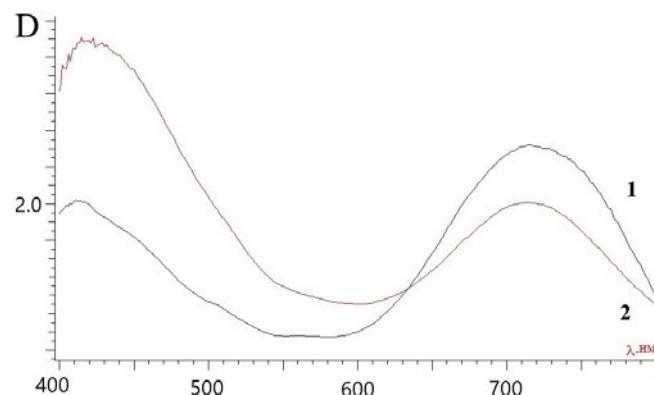


Рис. 2. Оптические спектры поглощения зеленых турмалинов. 1 – турмалин (Бразилия, Минас-Жерайс); 2 – турмалин (Ср. Урал, Мурзинка)

самоцветных копей, средний Урал // VM Novitates. Новости из Геологического музея им. В.И. Вернадского. 2019. № 16. С. 214–226.

- Пшеничный М.И. Полихромность минералов группы турмалина // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. № 2. С. 269–274.

Научное издание

**МИНЕРАЛЫ: СТРОЕНИЕ, СВОЙСТВА,  
МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

**Материалы XV Всероссийской научной конференции**

Ответственный редактор: **Вотяков С.Л.**

Оригинал-макет: Амромин И.М.  
Верстка и издание книг и журналов на заказ 2077181@mail.ru

ISBN-978-5-89516-???



Формат 60x84 1/8, объем 12.32 усл. печ. листов.

**Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН**  
620016, г. Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15.  
[www.igg.uran.ru](http://www.igg.uran.ru)

