



**Материалы XII
МЕЖДУНАРОДНОЙ
ШКОЛЫ
ПО НАУКАМ О ЗЕМЛЕ
ИМЕНИ ПРОФЕССОРА
Л.Л. ПЕРЧУКА**

**Abstract volume of
XII L.L. PERCHUK
INTERNATIONAL SCHOOL
OF EARTH SCIENCES
I.S.E.S.-2022**

7-19 сентября 2022

**Петропавловск-Камчатский
2022**



Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН
Геологический факультет МГУ



ХII МЕЖДУНАРОДНАЯ ШКОЛА ПО НАУКАМ О ЗЕМЛЕ имени профессора Л.Л. Перчука

7-19 сентября 2022

Материалы конференции

Петропавловск-Камчатский
2022



Institute of volcanology and seismology FEB RAS
Faculty of Geology, Moscow State University



XII L.L. PERCHUK INTERNATIONAL SCHOOL OF EARTH SCIENCES, I.S.E.S.-2022

7-19 September, 2022

Abstract volume

**Petropavlovsk-Kamchatsky
2022**

УДК 55

Научное издание

Материалы XII Международной школы по наукам о Земле имени профессора Л.Л. Перчука (ISES-2022), 7-19 сентября 2022 г. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2022. – 114 с.

ISBN 978-5-902424-37-6

В материалах XII Международной школы по наукам о Земле имени профессора Л.Л. Перчука (ISES-2022) представлены результаты исследований в разных дисциплинах геологии: вулканология, петрология, минералогия, геохимия, кристаллохимия, геофизика, инженерная геология, геоэкология, динамическая геология, биогеохимия. Одна из важнейших задач школы – интернационализация науки и системы обучения в университетах СНГ и доведения ее до современного международного уровня.

Материалы публикуются в авторской редакции с техническими правками зам. редактора, ответственного секретаря и редакционной коллегии.

Утверждено к печати
Ученым советом
Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

Главные редакторы:
академик РАН Когарко Л.Н., д.г.-м.н. Перчук А.Л.,
член-корреспондент РАН Озеров А.Ю.

Заместитель главного редактора:
к.г.-м.н. Житова Е.С.

Ответственный секретарь:
к.ф.-м.н. Долгая А.А.

Редакционная коллегия:
Купчиненко А.Н., Пересецкая Е.В., Швейгерт П.Е.

На обложке:
Вулканы Корякский, Авачинский и Козельский со стороны Халактырского пляжа
Фото А.С. Чемарёва

ISBN 978-5-902424-37-6

© ИВиС ДВО РАН, 2022
© Коллектив авторов, 2022

UDC 55

Scientific edition

**Abstracts of XII L.L. Perchuk International School of Earth Sciences (ISES-2022),
September 7-19 2022 r.** – Petropavlovsk-Kamchatsky: IVS FEB RAS, 2022. – 114 p.

ISBN 978-5-902424-37-6

Materials submitted to the XII L.L. Perchuk International School of Earth Sciences (ISES-2022) present the results of research in different geological disciplines: volcanology, petrology, mineralogy, geochemistry, crystal chemistry, geophysics, engineering geology, geoecology, dynamic geology, and biogeochemistry. One of the most important tasks of the school is an internationalization of science and the educational system at universities in the CIS countries and bringing it to the modern international level.

Materials are published in the author's version with technical corrections by the deputy chief editor, executive secretary and editorial team.

Approved for publishing
by the Academic council of
Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS

Chief editors:
RAS academician Liya N. Kogarko, Prof. Dr. Alexey L. Perchuk,
RAS corresponding member Alexei Yu. Ozerov

Deputy chief editor:
Dr. Elena S. Zhitova

Executive secretary:
Dr. Anna A. Dolgaya

Editorial team:
Anastasia N. Kupchinenko, Ekaterina V. Peresetskaya, Peter E. Schweigert

On the cover:
Koryaksky, Avachinsky and Kozelsky volcanoes from the side of Khalaktyrsky beach
Photo courtesy Andrey S. Chemarev

ISBN 978-5-902424-37-6

© IVS FEB RAS, 2022
© Group of authors, 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ Contents

| | |
|--|----|
| <i>Авдонцева М.С., Бражникова А.С., Золотарев А.А., Кржижановская М.Г., Бочаров В.Н., Шиловских В.В., Кривовичев С.В., Рассомахин М.А.</i> Кристаллохимическое разнообразие силикатов Горелых отвалов Челябинского угольного бассейна | 12 |
| <i>Андреева О.А., Ярмолюк В.В., Андреева И.А., Дубинина Е.О., Бычков А.Ю.</i> Эволюция толеитовых магм вулкана Ван-Тянь Чанбайшаньского ареала (Северо-Восточный Китай) | 13 |
| <i>Арискин А.А., Бармина Г.С.</i> Геохимическая термометрия изверженных пород: основы метода и примеры применения | 14 |
| <i>Бабарина И.И., Серебряков Н.С., Азимов П.Я.</i> Структурный контроль распределения аномально низких значений $\delta^{18}\text{O}$ в породах фундамента палеопротерозойского Лапландско-Кольского коллизионного орогена | 15 |
| <i>Баданина Е.В., Сырицо Л.Ф., Томас Р., Шубина Н.Е.</i> Природа минералообразующих сред «закалочных грейзенов» надкупольных зон массивов рудоносных Li-F гранитов | 16 |
| <i>Белоусов А.Б., Белоусова М.Г.</i> Крупномасштабные обрушения вулканических построек и их влияние на динамику извержений | 17 |
| <i>Бенделиани А.А., Бобров А.В., Бинди Л., Еремин Н.Н., Ирифуне Т.</i> Взаимодействие перидотита и материала океанической коры в условиях мантии Земли | 18 |
| <i>Бобров А.В.</i> Включения в алмазах – ключ к познанию состава мантии Земли | 19 |
| <i>Бобров А.В., Матросова Е.А., Бенделиани А.А., Тамарова А.П., Бинди Л.</i> Элементы-примеси в бриджманите: обзор результатов экспериментов | 20 |
| <i>Большаков И.Е.</i> Особенности формирования агатов на современных термальных полях Камчатки | 21 |
| <i>Бочаров В.Н., Азарян А.М., Баданина Е.В.</i> Физико-химические условия формирования золоторудного месторождения Кутын (Хабаровский край) | 22 |
| <i>Булатов В.А., Шапова Ю.В., Замятин Д.А.</i> Электронно-зондовый микроанализ химического состава тонких пленок шпинелевого состава (MgAl_2O_4) с разрешением по глубине | 23 |
| <i>Буханова Д.С., Жегунов П.С., Жирнова Т.С.</i> Эпитермальное золотосеребряное рудопроявление Каньон (Камчатский край): особенности строения, геолого-структурные закономерности размещения оруденения. | 24 |
| <i>Галынина О.В., Гриценко Ю.Д.</i> Особенности минералов группы блёклых руд Ni-Co месторождения Хову-Аксы, Тыва | 25 |

| | |
|---|----|
| <i>Гаранин В.К., Гаранин К.В.</i> Алмазные месторождения России | 26 |
| <i>Гирина О.А., Ладыгин В.М.</i> Активность вулкана Безымянный (Камчатка) | 27 |
| <i>Гонгальский Б.И.</i> Магматические комплексы Кодаро-Удоканского района, Северное Забайкалье | 28 |
| <i>Гордейчик Б.Н., Чурикова Т.Г.</i> Ретроспективный анализ геохимических данных для пород Толбачинского дола | 29 |
| <i>Готтман И.А., Пушкарев Е.В.</i> Смещение анкармитового и трахиандезитового расплавов (Магнитогорская зона, Южный Урал) | 30 |
| <i>Григорьева В.М., Перчук А.Л.</i> Петрология ксенолитов мафических гранулитов из кимберлитовых трубок Юбилейная и Комсомольская, Якутия | 31 |
| <i>Грошев Н.Ю., Карыковский Б.Т., Майер В.Д., Припачкин П.В., Барнс С.-Д., Савард Д.</i> Механизм формирования ЭПГ-оруденения контактового типа в Мончегорском расслоенном комплексе | 32 |
| <i>Губанов Н.В., Зедгенизов Д.А.</i> Происхождение и эволюция алмазогенерирующих флюидов/расплавов в мантии Сибирского кратона по данным изучения микровключений в алмазах в "оболочках" | 33 |
| <i>Губанов Н.В., Михайленко Д.С.</i> Термобарометрия коэсита из алмазов и эклогитов | 34 |
| <i>Давлетшина А.А., Замятин Д.А., Ковалева Е.И., Чебыкин Н.С.</i> Деформации циркона и апатита из импактного кратера Вредефорт по данным EBSD-анализа | 35 |
| <i>Давыдова В.О., Щербакоев В.Д., Плечев П.Ю., Кулаков И.Ю.</i> Эволюция магматической системы вулкана Безымянный перед извержением 20 декабря 2017 г. | 36 |
| <i>Дамдинов Б.Б., Котельников А.Р., Сук Н.И., Дамдинова Л.Б., Ахмеджанова Г.М.</i> Экспериментальные свидетельства совместного переноса силикатного и рудного вещества при метаморфизме сульфидных руд | 37 |
| <i>Дамдинова Л.Б., Дамдинов Б.Б., Юдин Д.С.</i> Результаты ⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar датирования и условия формирования миларит-бавенит-флюоритовых руд Ермаковского F-Ве месторождения (Западное Забайкалье) | 38 |
| <i>Житова Е.С., Исмагилова Р.М., Золотарев А.А., Нурдаев А.А.</i> Кристаллическая структура галотрихита FeAl ₂ (SO ₄) ₄ (H ₂ O) ₂₂ | 39 |
| <i>Завьялов А. Д., Морозов А.Н., Алёшин И.М., Иванов С.Д., Холодков К.И., Павленко В.А.</i> Перспективы развития метода КОЗ / Potential of "KOZ" Global Seismic Risk Chart | 40 |
| <i>Замятин Д.А., Ковалева Е.И.</i> Деформации и формирование рейдита в цирконе при плоском ударном эксперименте под давлениями 20-60 ГПа | 41 |

| | |
|--|----|
| <i>Замятина Д.А., Замятин Д.А., Михалевский Г.Б.</i> Глобулярный (ballen) кварц в импактной структуре Янисъярви (Карелия, Российская Федерация) | 42 |
| <i>Землянскова А.А., Оленченко В.В., Макарьева О.М., Данилов К.П., Осташов А.А., Калганов А.С., Христофоров И.И., Нестерова Н.В.</i> Геофизические исследования на Анмангындинской наледи 2021-2022 г. | 43 |
| <i>Зобенько О.А., Округин В.М., Чернев И.И., Иванов В.В., Иванов М.В.</i> Ртуть в породах зоны пропаривания Мутновского месторождения парогидротерм (Южная Камчатка) | 44 |
| <i>Золотарев А.А., Авдонцева М.С., Кривовичев С.В., Кржижановская М.Г., Житова Е.С., Паникоровский Т.Л., Гуржий В.В., Рассомахин М.А.</i> Техногенные минералы горелых отвалов Челябинского угольного бассейна: структурные особенности | 45 |
| <i>Исмагилова Р.М., Житова Е.С., Кривовичев С.В., Золотарев А.А., Кржижановская М.Г., Спиридонова Д.В., Шиловских В.В.</i> Структурное и фазовое преобразование эвхроита $\text{Cu}_2(\text{AsO}_4)(\text{OH})\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ при нагревании | 46 |
| <i>Исмагилова Р.М., Житова Е.С., Кривовичев С.В., Золотарев А.А., Михайлова Ю.А., Белаковский Д.И., Бочаров В.Н., Шиловских В.В., Власенко Н.С.</i> Голдхиллит, $\text{Cu}_5\text{Zn}(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_6\cdot \text{H}_2\text{O}$, новый минерал, арсенатный член изоморфного ряда голдхиллит-филипсбергит-кипушит | 47 |
| <i>Кабанова Н.А., Паникоровский Т. Л.</i> Ионная проводимость в минералах Хибинского, Ловозерского и Ковдорского массивов: кристаллохимический и DFT анализ диффузии катионов | 48 |
| <i>Кадыров Р.И.</i> 3D-визуализации геологических моделей в дополненной реальности | 49 |
| <i>Канева Е.В., Шендрик Р.Ю.</i> Кристаллохимические, колебательные и оптические особенности тинаксита и токкоита (Мурунский массив, Россия) | 50 |
| <i>Каныгина Н.А., Дегтярев К.Е., Третьяков А.А.</i> Источники сноса позднедокембрийских кварцито-сланцевых толщ западной части Центрально-Азиатского орогенного пояса | 51 |
| <i>Каримов А.А., Горнова М.А., Беляев В.А., Скузоватов С.Ю.</i> Надсубдукционный метаморфизм гарцбургитов Хара-Нурского массива (офиолиты Восточного Саяна) | 52 |
| <i>Киселева Д.В., Шагалов Е.С., Окунева Т.Г., Солошенко Н.Г., Рянская А.Д., Панкрушина Е.А., Карпова С.В., Уразова К.К., Сидорук А.Р.</i> Изотопное картирование биодоступного стронция $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ на территории Оренбургской и Ростовской областей | 53 |
| <i>Киселева М.Д., Бобров А.В., Крылов И.О.</i> Типоморфные особенности состава главных породообразующих и окисно-рудных минералов из такситовых габбро-долеритов Хараелахского интрузива. | 54 |
| <i>Конопелько Д.Л.</i> Кошрабадский массив гранитов рапакиви в Узбекистане: петрогенезис, геодинамическая обстановка формирования и золотоносность | 55 |

| | |
|---|----|
| <i>Кржижановская М.Г., Бритвин С.Н., Золотарев А.А., Горелова Л.А., Оболонская Е.В., Власенко Н.С., Шиловских В.В., Мурашко М.Н.</i> Кристаллохимия шрейберзита-никельфосфида, (Fe,Ni) ₃ P | 56 |
| <i>Криволицкая Н.А., Конышев А.А., Гонгальский Б.И., Севирская Н.М.</i> Рифтогенный и трапповый магматизм Сибирской крупной изверженной провинции | 57 |
| <i>Кронрод В.А., Дунаева А.Н., Кронрод Е.А., Кусков О.Л.</i> Ограничения на состав и внутреннее строение железокремнистого ядра Титана | 58 |
| <i>Кронрод Е.В., Мацумото К., Кусков О.Л., Кронрод В.А.</i> Согласование сейсмических, селенодезитических и геохимических данных о внутреннем строении Луны | 59 |
| <i>Крылов П.С., Нургалеев Д.К., Ясонов П.Г.</i> Сейсмоакустические исследования небольших акваторий на примере озера Сабакты (Республика Башкортостан) | 60 |
| <i>Кузина Д.М., Воронов К.А., Юсупова А.Р., Рогов А.М.</i> Изучение космического вещества в осадках озера Банное, Южный Урал, Россия | 61 |
| <i>Липницкий Т.А., Сорохтина Н.В.</i> Геохимия редкометалльных фоскоритов и карбонатитов щелочно-ультраосновного массива Вуориярви, Кольский п-ов | 62 |
| <i>Митяев А.С., Сафонов О.Г., Варламов Д.А.</i> Влияние карбонатов и водно-углекислых флюидов на процессы гранитообразования при высокотемпературном метаморфизме: природные, экспериментальные и термодинамические данные | 63 |
| <i>Михайленко Д.С., Корсакова А.В., Аулбах С., Губанов Н.В., Якушик М.А., Шу Ю-Г.</i> Реконструкция условий образования титанита в эклогите из кимберлитовой трубки Удачная | 64 |
| <i>Михалевский Г.Б., Замятин Д.А., Замятина Д.А.</i> Катодолюминесцентная спектроскопия в исследовании цирконов метеоритных кратеров (Вредефорт, Кара, Янисъярви) | 65 |
| <i>Некрылов Н.А., Волынец А.О., Овсянников Г.Н., Толстых М.Л., Горбач Н.В., Щербаков В.Д., Плечова А.А., Певзнер М.М., Бабанский А.Д.</i> Первые результаты изучения составов оливина и расплавных включений в пикробазальтовых лавах массива г. Большой Тигиль (Срединный хребет, Камчатка) | 66 |
| <i>Нуждаев А.А.</i> Оценка объемов поступления ртути на термальных полях Кошелёвского вулканического массива (Камчатка) | 67 |
| <i>Нуждаев И.А., Букатов Ю.Ю., Феофилактов С.О.</i> Моделирование структуры Южно-Камбального Центрального термального поля по геофизическим данным (Южная Камчатка) | 68 |
| <i>Озеров А.Ю.</i> Модель извержений Ключевского вулкана | 69 |
| <i>Окунева Т.Г., Селезнев А.А., Киселева Д.В.</i> Определение источников загрязнения в г. Челябинск с использованием изотопов Zn и Pb | 70 |

| | |
|---|----|
| <i>Паникоровский Т.Л., Яковенчук В.Н., Калашникова Г.О., Кабанова Н.А., Житова Е.С., Кривовичев С.В.</i> Миграция Na в кристаллической структуре мурманита: ионный обмен и высокотемпературная трансформация | 71 |
| <i>Панкрушина Е.А., Киселева Д.В.</i> Статистические подходы в рамановской спектроскопии: приложения в минералогии и геоархеологии | 72 |
| <i>Перчук А.Л.</i> Эклогиты и эклогитизация | 73 |
| <i>Перчук А.Л., Сердюк А.А., Пересецкая Е.В.</i> Гранатовый верлит – наиболее распространенная порода верхней мантии? | 74 |
| <i>Плечов П.Ю.</i> Рациональная систематика включений в минералах | 75 |
| <i>Пушкарев Е.В.</i> Родоначальный расплав дунит-клинопироксенит-габбровых комплексов Урало-Аляскинского типа: вопросы происхождения, состава и эволюции | 76 |
| <i>Пушкарев Е.В.</i> Тылаиты – интрузивные аналоги анкармитов в комплексах Урало-Аляскинского типа | 77 |
| <i>Пшеницын И.В., Арискин А.А.,</i> Природа сульфидной минерализации в апофизе Йоко-Довыренского массива (Северное Прибайкалье, Россия) | 78 |
| <i>Радомская Т.А., Канева Е.В., Шендрик Р.Ю., Митичкин М.А., Федоренко В.В., Даниловская В.А.</i> Дианиты щелочных комплексов Алдана | 79 |
| <i>Расс И.Т.</i> Зональность минералов – отражение смены последовательных равновесий между поверхностным слоем твердых фаз и жидкой фазой | 80 |
| <i>Рылова С.А., Горбач Н.В., Философова Т.М.</i> Петрологические особенности привершинных лав вулкана Вилючинский (Восточная Камчатка) | 81 |
| <i>Рюмина А.А., Тищенко П.Я., Шкирникова Е.М.</i> Микроэлементы в донных осадках мелководных бухт залива Петра Великого | 82 |
| <i>Рянская А.Д., Киселева Д.В., Гуляева Т.Я.</i> Рентгенофазовый анализ геоархеологических объектов | 83 |
| <i>Сапегина А.В., Воронин М.В., Перчук А.Л., Сафонов О.Г.</i> Мёссбауэровская спектроскопия клинопироксенов гранулитов из ксенолитов кимберлитовой трубки Удачная, Якутия | 84 |
| <i>Скильская Е.Д., Кудяева Ш.С., Плутахина Е.Ю., Москалева С.В.</i> Характеристика кислой пирокластике вулкана Пик Сарычева, о. Матуа, Центральные Курилы | 85 |
| <i>Скузоватов С.Ю.</i> Масштабы регидратации субдуцированной литосферы на примере высокобарических комплексов северо-восточного Забайкалья и юго-западной Монголии | 86 |

| | |
|--|-----|
| <i>Смирнов С.З.</i> Флюидно-магматические системы, связанные с эволюцией кислых магм, обогащенных летучими и флюсующими компонентами | 87 |
| <i>Соболев С.Н.</i> Количественный анализ структур кумулатов расслоенных интрузивов, как ключ к пониманию динамики таких магматических систем | 88 |
| <i>Тобелко Д.П., Портнягин М.В.</i> Условия образования магм Кумрочского вулканического комплекса | 89 |
| <i>Ушакова С.А., Сафонов О.Г., Япаскурт В.О., ван Ринен Д.Д.</i> Условия и эволюция метаморфизма метапелитов структуры Кэмпбелл, Центральная Зона комплекса Лимпопо, ЮАР | 90 |
| <i>Федькин В.В.</i> Зональные гранаты эклогит-глаукофансланцевых комплексов и их РТ интерпретация | 91 |
| <i>Филатова О.Р., Лубкова Т.Н., Яблонская Д.А.</i> Экспериментальное исследование выщелачивания металлов из вмещающих меднопорфировое оруденение пород (Северо-Восток России) | 92 |
| <i>Филимонов А.В., Вахрушев С.Б., Кумзеров Ю.А.</i> Использование метода нейтронного рассеяния для анализа поведения воды в пористых средах | 93 |
| <i>Хасанов И.И., Малёвин И.В.</i> Сравнительный анализ оценки параметра пористости горных пород объёмными и плоскостными методами | 94 |
| <i>Хайруллина А.И., Гриценко Ю.Д.</i> Минералогия гранитного пегматита Амиго, СВ Памир, Таджикистан | 95 |
| <i>Чебыкин Н.С., Замятин Д.А., Ковалева Е.И., Давлетшина А.А.</i> Деформации титанита и монацита из импактного кратера Кара по данным EBSD-анализа | 96 |
| <i>Чеховских А.М., Поповнин В.В.</i> Устойчивость полей аккумуляции, абляции и баланса массы ледника Джанкуат (Центральный Кавказ) | 97 |
| <i>Чурикова Т.Г.</i> Геохимическое пересечение Камчатки: новые изотопные данные | 98 |
| <i>Шагалов Е.С., Холоднов В.В.</i> Взаимодействие кора-мантия при формировании степнинского комплекса, Южный Урал | 99 |
| <i>Шайхутдинова Д.Р., Шкурский Б.Б.</i> Петрография лампрофиров Хибинского и Ловозёрского массивов | 100 |
| <i>Шаповалова М.В., Астахов А.С.</i> Минералогические и геохимические индикаторы тихоокеанских водных масс, привносимых в воды Чукотского моря через Берингов пролив | 101 |
| <i>Швейгерт П.Е., Жегунов П.С., Москалёва С.В.</i> Элементы минералогической зональности Мутновского золото-серебряного месторождения | 102 |

| | |
|--|-----|
| <i>Шендрик Р.Ю., Богданов А.И., Радомская Т.А., Митичкин М.А., Канева Е.В.</i> Инфракрасная микроспектроскопия для идентификации изоструктурных минералов | 103 |
| <i>Щербаков В.Д., Биндеман И.Н., Газеев В.М.</i> Геохимические, изотопные и петрологические характеристики молодого вулканизма Большого Кавказа- происхождение игнимбритов и лав Эльбруса, Чегема и Тырнауза | 104 |
| <i>Юсупова А.Р., Нургалеева Н.Г. Кузина Д.М.</i> Минеральный и химический состав донных осадочных отложений озера Сабакты как индикатор палеоклимата | 105 |
| <i>Яковлева М.О., Курбанов Р.Н., Мюррей Э.</i> Особенности датирования мерзлых отложений методом оптически стимулированной люминесценции | 106 |
| <i>Якушик М.А., Сафонов О.Г., Козловский В.М., Голунова М.А.</i> Геохимические особенности метаморфизма базитов района г. Куропачья, Беломорский Подвижный Пояс | 107 |
| <i>Britvin S.N., Vereshchagin O.S., Krzhizhanovskaya M.G., Gorelova L.A., Murashko M.N.</i> Combustion complexes of the Middle East as mineralogical models of the early Earth evolution | 108 |
| <i>Dokukina K.A.</i> Magmatism and geodynamics of the Archaean active margin of Kola paleocontinent | 109 |
| <i>Kutyrev A.V.</i> Behaviour of platinum-group elements during the formation of awaruite (Ni ₃ Fe) mineralization in peridotites of Kamchatka and Koryak Highlands | 110 |
| <i>Pilitsyna T.A., Samsonov A.V., Erofeeva K.G., Varlamov D.A.</i> Metamorphic evolution of the Archean Tokmovo megablock and of surrounding Paleoproterozoic orogenic belts (Volgo-Uralia segment, East European craton) | 111 |
| <i>Safonov O.G.</i> Why and how the Earth's crust melts: insight from experiments | 112 |
| <i>Zhegunov P.S., Kutyrev A.V., Moskaleva S.V.</i> Mustard gold of the Evevпта occurrence (Northern Kamchatka, Russia) | 113 |

Кристаллохимическое разнообразие силикатов Горелых отвалов Челябинского угольного бассейна

**Авдонцева М.С.¹, Бражникова А.С.¹, Золотарев А.А.¹, Кржижановская М.Г.¹,
Бочаров В.Н.², Шиловских В.В.², Кривовичев С.В.^{1,3}, Рассомахин М.А.⁴**

¹Институт наук о Земле СПбГУ, Санкт-Петербург *m.avdontceva@spbu.ru*;
²Ресурсный центр «Геомодель» СПбГУ, Санкт-Петербург; ³ФИЦ Кольский
научный центр РАН, Апатиты; ⁴ЮУ ФНЦ минералогии и геоэкологии УрО РАН,
Миасс

Силикаты наряду с сульфатами и оксидами являются одним из наиболее распространённых классов среди минералоподобных фаз Горелых отвалов Челябинского угольного бассейна (ЧУБ) (Чесноков и др., 2008). Данная работа является продолжением серии исследований, посвященных кристаллохимии ЧУБ (Avdontceva et al., 2021a; Avdontceva et al., 2021b; Zolotarev et al., 2020; Zolotarev et al., 2021). В докладе представлены результаты детального кристаллохимического исследования, в том числе высокотемпературного поведения трех силикатов: куспидина, техногенного кумтюбиита и альбовита. Кристаллическая структура куспидина $\text{Ca}_4[\text{Si}_2\text{O}_7]\text{F}_2$ моноклинная, пространственная группа $P2_1/a$, $a = 10.8890(3) \text{ \AA}$, $b = 10.5168(3) \text{ \AA}$, $c = 7.5171(2) \text{ \AA}$, $\beta = 109.549(1)^\circ$, $V = 3427(5) \text{ \AA}^3$. В основе кристаллической структуры куспидина лежат ленты из полиэдров Са, вытянутые вдоль оси c , диортосиликатные группы $[\text{Si}_2\text{O}_7]$ расположены между лентами. Кристаллическая структура куспидина расширяется анизотропно, наибольшее термическое расширение наблюдается по оси тензора α_{33} ($\mu_{c1} = 41.7^\circ$). Это направление близко к большой диагонали параллелограмма, что типично для моноклинных структур. В этом же направлении расположены Са-полиэдры, связанные через общие F-F ребра. Кристаллическая структура альбовита $\text{Ca}_3[\text{SiO}_4]\text{Cl}_2$ также моноклинная, пространственная группа $P2_1/c$, $a = 9.8367(6) \text{ \AA}$, $b = 6.7159(4) \text{ \AA}$, $c = 10.8738(7) \text{ \AA}$, $\beta = 105.735(6)^\circ$, $V = 691.43(8) \text{ \AA}^3$. В основе структуры альбовита лежит плотный каркас из Са-полиэдров, связанных друг с другом через общие вершины и ребра. Кристаллическая структура альбовита расширяется анизотропно, наибольшее термическое расширение наблюдается по оси тензора α_{11} ($\mu_{c1} = 13.5^\circ$), в этом же направлении расположены Са-полиэдры, связанные через общие Cl-Cl ребра. Техногенный кумтюбеит $\text{Ca}_5(\text{SiO}_4)_2\text{F}_2$ моноклинный, пространственная группа $P2_1/a$, $a = 11.4953(5) \text{ \AA}$, $b = 5.0567(2) \text{ \AA}$, $c = 8.8075(4) \text{ \AA}$, $\beta = 108.954(5)^\circ$, $V = 484.21(4) \text{ \AA}^3$. Каркас техногенного кумтюбеита состоит из связанных через общие вершины и ребра полиэдров Са, кремнекислородные тетраэдры изолированы и располагаются между ними. Кристаллическая структура кумтюбеита расширяется анизотропно, наибольшее термическое расширение наблюдается по оси тензора α_{11} , близкой к a ($\mu_{a1} = 3.3^\circ$).

Данная работа поддержана грантом Президента РФ для ведущих научных школ № НШ-1462.2022.1.5. Исследования проведены с использованием оборудования РЦ «Рентгенодифракционные методы исследования» и «Геомодель» Научного парка СПбГУ.

Литература:

- Чесноков Б.В., Щербакова Е.П., Нишанбаев Т.П. (2008) Минералы горелых отвалов Челябинского угольного бассейна. УрО РАН: Миасс. 139 с.
- Avdontceva M.S., Zolotarev A.A., Krivovichev S.V., Krzhizhanovskaya M.G., Sokol E.V., Kokh S.N., Bocharov V.N., Rassomakhin M.A., Zolotarev A.A. (2021a) Fluorellestadite from burned coal dumps: crystal structure refinement, vibrational spectroscopy data and thermal behavior. *Mineralogy and Petrology*. 115: 271–281.
- Avdontceva M.S., Zolotarev A.A., Krivovichev S.V., Krzhizhanovskaya M.G., Bocharov V.N., Shilovskikh V.V., Zolotarev A.A., Rassomakhin M.A. (2021b) Rapidcreekite of anthropogenic origin – 'Korkinoite' from burnt mine dump in the Chelyabinsk coal basin, south Urals, Russia: Crystal structure refinement, thermal behavior and spectroscopic characterization. *Journal of Geosciences*. 66: 147–156.
- Zolotarev A.A., Krivovichev S.V., Avdontceva M.S., Shilovskikh V.V., Rassomakhin M.A., Yapaskurt V.O., Pekov I.V. (2020) Crystal chemistry of alkali–aluminum–iron sulfates from the burnt mine dumps of the Chelyabinsk coal basin, South Urals, Russia. *Crystals* 10: 1062.
- Zolotarev A.A., Krivovichev S.V., Avdontceva M.S., Shchipalkina N.V., Pekov I.V. (2021) Crystal Chemistry of "Malakhovite", an Anthropogenic Analog of Khesinite from Burnt Dumps of the Chelyabinsk Coal Basin (South Urals). *Crystal. Reports*. 6: 66–75.

Эволюция толеитовых магм вулкана Ван-Тянь Чанбайшаньского ареала (Северо-Восточный Китай)

Андреева О.А.¹, Ярмолук В.В.¹, Андреева И.А.¹, Дубинина Е.О.¹,
Бычков А.Ю.²

¹ИГЕМ РАН, Москва oandreeva@igem.ru;

²Геологический факультет МГУ, Москва

Вулкан Вань-Тянь, расположенный в Чанбайшаньском ареале позднекайнозойской внутримитной вулканической провинции Востока Азии, является примером ассоциаций бимодального типа. Лавы его щитового подножия и собственно конуса варьируют от базальтов до андезитобазальтов и относятся преимущественно к толеитовой серии, кислые породы в его строении редки и связаны только с экструзивным куполом и некками. Щитовая платформа вулкана сложена высокожелезистыми толеитовыми базальтами, содержащими крупные (до 1 см) фенокристы плагиоклаза ($Ab_{74.3-79.1}Ab_{19.8-25.5}Or_{0.1-1.3}$). Среди минералов основной массы выявлены плагиоклаз, оливин, титанавгит, ильменит, титаномагнетит, фторапатит и сидерит. Также в основной массе зафиксировано ферробазальтовое и щелочное кислое стекло. Сидерит основной массы содержит включения плагиоклаза, пироксена, оливина, апатита и кислого щелочного стекла. Сидерит был обнаружен также в качестве кристаллических включений в плагиоклазе, для которого, как и для сидерита основной массы, характерно 67-82 масс.% $FeCO_3$, 13-25 масс.% $MgCO_3$, 3-8 масс.% $CaCO_3$ и до 1.5 масс.% $MnCO_3$.

В фенокристах плагиоклаза установлены первичные расплавные включения, содержащие плагиоклаз-полевошпатовые каймы, стекло или тонкозернистый железистый агрегат ферробазальтового состава и иногда «капли» сидерита с содержанием $FeCO_3$ – 77-81 масс.%, $MgCO_3$ – 14-18 масс.%, $CaCO_3$ – 3-4 масс.% и $MnCO_3$ – 1 масс.%. Термометрические эксперименты с расплавными включениями, не содержащими сидеритовых глобул, позволили заключить, что кристаллизация фенокристов плагиоклаза происходила при $T = 1180-1200^\circ C$. Также в плагиоклазе были установлены первичные флюидные включения углекислоты с плотностью 0.326 г/см^3 . Рассчитанное по PVT-параметрам CO_2 давление соответствует 1.15 кбар.

Изотопный состав кислорода и углерода, определенный в карбонатной части валовых проб толеитовых базальтов, соответствует осадочным характеристикам карбонатного вещества, сохранившего следы протекания процесса декарбонизации. Величины $\delta^{18}O(VSMOW)$ изменяются в интервале $+19.4 \div +20.3 \text{ ‰}$, а $\delta^{13}C(VPDB)$ – от -3.5 до -6.8 ‰ . Для включений сидерита, проанализированных в двух пробах плагиоклаза, получены близкие величины $\delta^{18}O$ и $\delta^{13}C$ ($+17.2$, $+19.4 \text{ ‰}$ и -3.78 , -9.20 ‰ , соответственно). При этом значения $\delta^{18}O$ силикатного матрикса тех же проб плагиоклаза остаются постоянными и отвечают значению $+6.1 \text{ ‰}$. Таким образом, изотопные ($\delta^{18}O$, $\delta^{13}C$) параметры показывают, что присутствующий в породах рассеянный карбонат и сидерит, находящийся в виде включений в плагиоклазе, имеет осадочное происхождение с характерными признаками частичного разложения с отделением CO_2 при высокой температуре (декарбонизации).

На основании проведенных исследований выделено несколько этапов дифференциации вещества при формировании пород вулкана. К первому этапу относится взаимодействие горячих базальтовых расплавов, внедрявшихся в приповерхностную магматическую камеру на глубине около 4.3 км, с вмещающими мраморами кальцит и доломит частично разлагались с образованием CO_2 и пироксеновых роговиков на контакте. Сидерит с примесью неразложившегося $(Ca, Mg)CO_3$ образовывал феррокарбонатный расплав. Вследствие силикатно-карбонатной несмесимости, феррокарбонатный расплав оказывался изотопно изолирован от базальтового. При этом происходило фракционирование расплава по феннеровскому типу, которое обусловило появление на ликвидусе плагиоклаза в начале кристаллизации магм. Расслоение ферробазальтового расплава на две несмешивающиеся жидкости – кислую и железистую – отвечает второму этапу дифференциации толеитовых расплавов. О протекании процесса силикатной жидкостной несмесимости свидетельствует присутствие в интерстициальном пространстве изученных базальтов, а также в расплавных включениях в плагиоклазе этих пород контрастных по составу силикатных стекол. Феррокарбонатная жидкость кристаллизовалась на завершающем этапе формирования базальтов вулкана Ван-Тянь.

Работа выполнена за счет средств проекта РНФ № 22-17-00033 и гранта РФФИ № 20-05-00306.

Геохимическая термометрия изверженных пород: основы метода и примеры применения

Арискин А.А.^{1,2}, Бармина Г.С.²

¹Геологический факультет МГУ, Москва ariskin@rambler.ru;

²ГЕОХИ РАН, Москва, gsbarmina@rambler.ru

Резюме. Рассмотрены особенности метода генетической интерпретации магматических пород, который был предложен в 80-х годах прошлого столетия и получил название “Геохимической термометрии”. Вначале он использовался для оценки условий кристаллизации лунных базальтов, а в дальнейшем адаптирован к моно- и полиминеральным кумулатам, слагающим крупные расслоенные массивы. В основе подхода – термодинамические расчеты при помощи ЭВМ-программ семейства “КОМАГМАТ”, моделирующие равновесную кристаллизацию расплавов множества контрастных по составу образцов. Главный итог – выделение сингенетичных пород и реконструкция температуры и состава магматических расплавов на стадии формирования первичных протокумулятов.

Предыстория. Метод геохимической термометрии возник как отклик на задачи оценки параметров кристаллизации магматических пород из лунного реголита Моря Кризисов, доставленного на Землю АМС Луна-24. Эти субмиллиметровые частицы представляли продукты дробления базальтов и габброидов на протяжении многих миллионов лет, а по составу варьировали от высоко-Mg до глиноземистых и ферробазальтов. Мы допустили, что большинство этих фрагментов относились к общему тектоно-магматическому циклу, а в их химических составах “записана” информация о примокристах и расплавах, которые составляли исходные магмы. Эта ситуация предполагает возможность оценки их состава и температуры, используя ЭВМ-модели кристаллизации магматических расплавов (Френкель и др., 1987).

Основы метода и первый результат. Валовый состав каждой миничастицы описывается соотношениями, включающими составы расплава, примокристал и их пропорции. Вероятно, среди этих составов существуют группы, отвечающие дроблению одной и той же или комагматичных пород. Такие фрагменты сложены примокристаллами и основной массой (интеркумулясным расплавом) близкого или идентичного состава. Если допустить, что составы этих фаз на магматической стадии были связаны законами фазовых равновесий, то можно утверждать, что подобные группы пород представляет одна и та же температура, отвечающая этому исходному равновесию. Найти эти характеристики позволило использование ЭВМ-программы LUNAMAG, построенной по принципу модели КОМАГМАТ (Арискин, Бармина, 2000). Суть метода состояла в том, чтобы мысленно расплавить каждую частицу на 100%, а потом равновесно кристаллизовать такой виртуальный расплав до точки, когда совпадут температуры и составы остаточных расплавов. Вот эту процедуру мы и назвали *Геохимической термометрией*. В результате термометрических расчётов для 85 пород Моря Кризисов было установлено, что, несмотря на широкие вариации валового состава, около 60 траекторий кристаллизации “сходятся” в одну точку, отвечающую низко-Ti ферробазальтовому расплаву при температуре около 1150°C (Френкель и др., 1987).

Термометрия примитивных кумулатов. Дальнейшее развитие метода связано с исследованиями мафит-ультрамафитовых интрузивов, которые направлены на максимально точную оценку состава материнской магмы и характеристик протокумулятов. Расчеты для образцов из Краевых серий Скергаардского интрузива в Гренландии, Йоко-Довыренского массива в Северном Прибайкалье и некоторых других массивов демонстрируют эффективность геохимической термометрии, в том числе применительно к породам, несущим сульфидную минерализацию.

Литература:

Френкель М.Я., Арискин А.А., Бармина Г.С. и др. (1987) Геохимическая термометрия магматических пород – принципы метода и примеры применения. *Геохимия* 11: 1546-1562.

Арискин А.А., Бармина Г.С. (2000) Моделирование фазовых равновесий при кристаллизации базальтовых магм (ред. И.Д. Рябчиков). М.: Наука. 363 с.

Структурный контроль распределения аномально низких значений $\delta^{18}\text{O}$ в породах фундамента палеопротерозойского Лапландско-Кольского коллизионного орогена

Бабарина И.И.¹, Серебряков Н.С.¹, Азимов П.Я.²

¹ИГЕМ РАН, Москва fisana@yandex.ru, nikserebr@yandex.ru;

²ИГГД РАН, Санкт-Петербург pavel.azimov@mail.ru

Эродированный до нижнекоровых уровней фундамент ЮЗ форланда Лапландско-Кольского коллизионного орогена (~2.0-1.85 млрд лет: Daly et al., 2006) известен как Беломорская провинция (БП). Она сложена архейскими полиметаморфическими комплексами, прорванными основными–ультраосновными интрузиями, внедрившимися в ходе раннепалеопротерозойского рифтогенеза. В БП установлены корундсодержащие метасоматиты с аномально низкими $\delta^{18}\text{O}$ (до -27.3‰ VSMOW), развитые как по архейским супракрустальным породам, так и по палеопротерозойским метабазитам. Возраст метасоматитов составляет 1.89 млрд лет (Серебряков и др., 2007). В настоящее время существуют различные гипотезы формирования такой кислородной аномалии, связывающие её как с эндо-, так и с экзогенными процессами (Bindeman et al., 2014), происходившими в неорхее, раннем палеопротерозое (в период рифтогенеза) или уже в ходе Лапландско-Кольской коллизии.

Тектоническая переработка БП во время формирования Лапландско-Кольского орогена была неравномерной (Бабарина и др., 2017). Выделены блоки двух типов: 1) с сохранившейся архейской структурой и интрузивными соотношениями с палеопротерозойскими базитами; 2) с практически полной совместной структурно-вещественной переработкой и тектоническим разлинзованием архейских пород и базитов. Переработка блоков второго типа сопряжена с развитием глубинных покровов в ходе палеопротерозойской коллизии (~1.9 млрд лет). Корундсодержащие породы с легким кислородом установлены только в блоках второго типа и маркируют отдельные участки покровных границ первого и второго порядка. Метасоматиты слагают линзы разного размера на тектонических контактах пород контрастного состава, либо расположены в зонах рассланцевания внутри пород. Линзы в целом конформны покровным границам и парагенетичным им плоскостным текстурам. На западе р-на оз. Верхне-Пулонгское породы с легким кислородом трансформируют зону рассланцевания с раздувом на о. Хитоостров, где метасоматиты слагают линзовидное тело в парагенейсах вблизи контактов с перекрывающими их тектоническими пластинами архейских гранатовых амфиболитов и палеопротерозойских метаферрогаббро. На участке Вуатваракка серия линз корундсодержащих метасоматитов локализована в зоне рассланцевания на границе крупных тектонических покровов. На участке Горельник метасоматиты приурочены к зоне тектонического меланжа на границе пластин второго порядка. На северном берегу оз. Кулежда корундсодержащие породы развиты в краевой части тектонической линзы палеопротерозойских габброноритов.

Таким образом, структурная позиция пород с аномально низкими значениями $\delta^{18}\text{O}$ указывает на их генетическую связь с формированием глубинных покровов во время палеопротерозойской коллизии и свидетельствует в пользу эндогенного механизма формирования изотопной аномалии.

Литература:

- Бабарина И.И., Степанова А.В., Азимов П.Я., Серебряков Н.С. (2017) Неоднородность переработки фундамента в палеопротерозойском Лапландско-Кольском коллизионном орогене, Беломорская провинция Фенноскандинавского щита. Геотектоника 5: 3-19.
- Серебряков Н.С., Астафьев Б.Ю., Воинова О.А., Пресняков С.Л. (2007) Первое локальное Th-U-Pb-датирование циркона метасоматитов Беломорского подвижного пояса. ДАН 413 (3): 388-392.
- Bindeman I.N., Serebryakov N.S., Schmitt A.K., Vazquez J.A., Guan Y., Azimov P.Ya., Astafiev B.Yu., Palandri J., Dobrzhinetskaya L. (2014) Field and microanalytical isotopic investigation of ultradepleted in ^{18}O Paleoproterozoic "Slushball Earth" rocks from Karelia, Russia. Geosphere 10: 308-339.
- Daly J.S., Balagansky V.V., Timmerman M.J., Whitehouse M.J. (2006) The Lapland-Kola orogen: Palaeoproterozoic collision and accretion of the northern Fennoscandian lithosphere. Gee D.G., Stephenson R.A. (eds.). European Lithosphere Dynamics Geological Society, London. Memoirs 32: 579-598.

Природа минералообразующих сред «закалочных грейзенов» надкупольных зон массивов рудоносных Li-F гранитов

Баданина Е.В.¹, Сырицо Л.Ф.¹, Томас Р.², Шубина Н.Е.¹

¹Институт наук о Земле, СПбГУ, Санкт-Петербург e.badanina@spbu.ru;

²ГеоИсследовательский центр, GFZ, Потсдам RainerThomas@t-online.de

В связи с утвердившейся магматогенной концепцией генезиса рудоносных редкометалльных гранитов (РГ) и в то же время интенсивным развитием процессов послемагматических преобразований остаётся актуальным вопрос о соотношении этих процессов и дискуSSIONным становится понятие «грейзен». Ранее нами на основе изучения состава расплавных включений (РВ) в кварце рядов дифференциатов пород модельных объектов прослежен процесс последовательного фракционирования расплава, выявлена вероятность отделения Na-Al-F субстанции (Баданина и др., 2010). Для массивов характерно многообразие минералообразующих процессов, последовательность развития которых раскрывается на основе исследований минеральных парагенезисов, типохимизма минералов и изотопно-геохронологического анализа.

В настоящем сообщении основное внимание уделено изучению состава РВ и ФВ в кварце и берилле из грейзеноподобных пород надкупольных зон массивов РГ, названных нами «закалочными грейзенами».

В качестве модельных объектов выбраны два массива РГ в Восточном Забайкалье с различными типами контакта с вмещающими породами, представляющими закрытую и открытую системы. На Орловском массиве крупнозернистые цвиттероподобные циннвальдит-альбит-топазовые грейзены с углистым веществом и обильными выделениями берилла возникают в эндо-экзоконтакте Li-F гранитов и дайки палеозойских диабазов и покровов трахириодацитов, образующих своеобразную покрывку. В условиях открытой системы на Этыкинском массиве аналогичный по составу парагенезис в виде т/з роговикоподобных пород возникает по песчано-сланцевым породам в экзоконтакте массива и на удалении от него.

Изучение закалочных грейзенов Орловского массива показало сосуществование здесь нескольких типов включений. В составе алюмосиликатных стёкол РВ в кварце установлены высокие содержания Li, Cs и F, сходные с составами расплавов редкометалльных амазонитовых гранитов, что подтверждает их магматогенную природу. В составе бериллов обнаружены уникальные 4-х фазные углекислотно-водные включения со стеклоподобной внешней оболочкой – В-тип включений (Thomas et al., 2009). Эти включения имеют форму негативных кристаллов и состоят из фазы стекла или минералов (слюды, топаз), водного раствора (с NaCl, H₃BO₃), жидкой и газообразной CO₂. Состав водно-солевого раствора содержит до 0.63 мол.% CO₃²⁻ и до 7.81 мол.% H₃BO₃. В сосуществующем кварце стекловатая фаза трансформируется в агрегат растущих кристалликов топаза с высоким содержанием фтора, образующих своеобразные жеоды. После экспериментов по гомогенизации весь углекислый газ в РВ в виде CO₃²⁻ переходит в солевой раствор. Таким образом, при высоких температурах здесь мог существовать гомогенный водонасыщенный натровокарбонатый алюмосиликатный расплав.

Масштабность проявления и реакционность этого расплава раскрывается на примере открытой системы массива Этыка, где такой парагенезис проявляется не только в контакте массива, но и прослеживаются в виде протяжённых региональных зон на удалении от массива.

Сложный состав водно-силикатно-солевого расплава и его трансформации на завершающей стадии кристаллизации Li-F гранитов объясняют своеобразие проявления здесь процессов послемагматического минералообразования. В условиях пересыщенности летучими остаточный расплав и водно-солевой флюид «могут сосуществовать и функционировать одновременно» (Зарайский, 2004).

Исследования выполнены при финансовой поддержке РНФ (проект № 22-27-00427).

Литература:

- Баданина Е.В., Сырицо Л.Ф. (2010) Состав расплава Li-F гранитов. Петрология 18: 139-167.
Зарайский Г.П. (2004) Условия образования редкометалльных месторождений, связанных с гранитоидным магматизмом. Смирновский сборник-2004: 105-192.
Thomas R., Davidson P., Badanina E. (2009) A melt and fluid inclusions. Minerals 96: 129-140.

Крупномасштабные обрушения вулканических построек и их влияние на динамику извержений

Белоусов А.Б.¹, Белоусова М.Г.¹

¹*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский belousov@mail.ru*

Крупномасштабные обрушения/оползни вулканических построек имеют объемы от 0.1 км³ до нескольких десятков куб.км. Обрушившийся объем горной породы дробится и образует высокоскоростную обломочную лавину, которая распространяется на большое расстояние. В процессе обрушения удаляется до 25% объема вулканической постройки, происходит резкое уменьшение высоты вулкана, сокращается длина его подводящего канала и снижается литостатическое давление на магматическую систему вулкана. Всё это приводит к активизации деятельности вулкана, испытавшего обрушение. Активизация происходит как на коротких интервалах времени – эксплозивная активность усиливается непосредственно в момент обрушения, так и в долгосрочной перспективе – после обрушения увеличивается частота извержений и количество извергаемого материала в течение периода длительностью десятки-сотни лет.

В историческое время в мире произошло 7 случаев крупномасштабных обрушений: на вулканах Бандай-сан (Япония) 1888 г., Харимкотан (Курильские острова) 1933 г., Ламингтон (Папуа Новая Гвинея) 1951 г., Безымянный (Камчатка) 1956 г., Сент Хеленс (США) 1980 г., Шивелуч (Камчатка) 1964 г. и Суфриер Хиллс (Монтсеррат) 1997 г., изучение которых позволило детально изучить влияние обрушений на динамику извержений.

Крупномасштабное обрушение вулканической постройки приводит к образованию кратера особой подковообразной формы и формированию обломочной лавины, грубообломочные отложения которой имеют характерные литологические признаки, позволяющие диагностику таких отложений в разрезах древних толщ. В последние десятилетия изучено несколько сотен отложений крупномасштабных вулканических обрушений голоценового возраста в разных районах земного шара. Выяснилось, что крупномасштабные обрушения обычны в геологической истории вулканов почти всех типов и составов, а на некоторых вулканах обрушения происходят многократно, так на вулкане Шивелуч (Камчатка) в Голоцене произошло минимум 8 обрушений объемом около 1 км³ (Belousov et al., 1999).

Изучение случаев исторических обрушений вулканов, а также отложений доисторических обвалов показало, что они в основном провоцируются внедрением магмы в постройку вулкана при подготовке нового извержения. Удалось определить, что характер вулканической активности непосредственно в момент обрушения или вскоре вслед за ним зависит от глубины нахождения поднимающейся магмы в момент обрушения (Belousov et al., 2007). Если линия отрыва обрушившейся постройки непосредственно пересекает внедряющееся магматическое тело, то в процессе извержения развивается катастрофический взрыв, который сопровождается образованием разрушительной пирокластической волны ("палящей тучи"), которая охватывает обширные области подножья вулкана. При более глубоком положении магматического тела в момент обрушения снятие литостатического давления происходит менее резко, и вместо катастрофического направленного взрыва за обрушением следует более спокойное плинианское извержение с образованием вертикальной эруптивной колонны.

Литература:

- Belousov A., Belousova M., Voight B. (1999) Multiple edifice failures, debris avalanches and associated eruptions in the Holocene history of Shiveluch volcano, Kamchatka, Russia. Bulletin of Volcanology 61: 324-342.*
- Belousov A., Voight B., Belousova M. (2007). Directed blasts and blast-currents: a comparison of the Bezymianny 1956, Mount St Helens 1980, and Soufriere Hills, Montserrat 1997 eruptions and deposits. Bulletin of Volcanology 69: 701-740.*

Взаимодействие перидотита и материала океанической коры в условиях мантии Земли

Бенделиани А.А.^{1,3}, Бобров А.В.^{1,2,3}, Бинди Л.⁴, Еремин Н.Н.¹, Ирифуне Т.⁵

¹Геологический факультет МГУ, Москва a.bendeliani@outlook.com;

²ИЭМ РАН, Черноголовка archi3@yandex.ru; ³ГЕОХИ РАН, Москва;

⁴Университет Флоренции, Италия luca.bindi@unifi.it;

⁵Университет Эхиме, Япония irifune@dpc.ehime-u.ac.jp

Водосодержащие фазы в глубинных геосферах привлекают внимание все большего круга исследователей из-за значимой роли воды во многих геодинамических процессах. Экспериментальные исследования настоящей работы направлены на развитие идеи корово-мантийного взаимодействия при погружении материала океанической коры на различные глубины, что обуславливает метаморфические процессы и частичное плавление в мантии Земли. Эксперименты по моделированию взаимодействия перидотита и GLOSS (Plank, Langmuir, 1998) в диапазоне давлений 7-24 ГПа, при 900-1400°C, с использованием последовательной закладки стартовых смесей в ампулу (типа «сэндвич») позволили обнаружить высокую степень влияния масштабного химического градиента на фазовые ассоциации продуктов опытов при низких давлениях (7, 12 ГПа), и на образование высокоглиноземистых водосодержащих фаз (фаза *D*, δ , *Egg*, *Mg-Egg*, *Si-Sur*) при высоких (18, 24 ГПа). Показано, что химический градиент при низких давлениях не оказывает влияние на перераспределение элементов между зонами: характерным признаком коровой (эклогитовой) ассоциации выделено образование высококальциевых гранатов и пироксенов с повышенными содержаниями TiO_2 и Na_2O . Обосновано, что фазы $MgSiO_3$ в условиях водонасыщенной системы (18, 24 ГПа) не будут вмещать существенные концентрации глинозема, что будет приводить к преимущественному накоплению алюминия в составе водосодержащих фаз. В то же время при 24 ГПа валовое распределение примесей между двумя различными по составу субстратами не соответствует их концентрациям в коровом (TiO_2) и мантийном (Cr_2O_3) протолите, что контролируется объемными содержаниями сосуществующих бриджманита и водосодержащих фаз (фазы *D*, δ) в рассматриваемых зонах. Причем химический градиент не оказывает влияния только на состав бриджманита по содержанию примесей, что позволяет минералу являться надежным индикатором протолита. Этот факт может быть использован при разграничении нижнемантийных алмазов на парагенетические ассоциации. В изученной системе при низких давлениях (7, 12 ГПа) не обнаружено массовой кристаллизации водосодержащих фаз, что обусловлено ранним исчезновением К-слюд (фенгита) уже при малых степенях частичного плавления океанического осадка. Однако, на состав слюд во включениях в алмазах, которые являются контейнерами OH, F и Cl, в последнее время обращают все большее внимание. В связи с этим, при 7 ГПа и 900-1200°C были проведены эксперименты в модельных системах перидотит+базальт+ $K_2CO_3+H_2O$. Показано, что высокотитанистые флогопиты преимущественно кристаллизуются в системах, моделирующих условия корово-мантийного взаимодействия. Проведены теоретические расчеты с использованием методов атомистического моделирования, которые подтвердили, что высокая степень обогащения мантии титаном практически исключает возможность накопления значительных концентраций хрома в составе слюды, что контролируется конкурирующими отношениями титана и хрома в кристаллической структуре флогопита и термодинамическими условиями кристаллизации минерала. Результаты экспериментов, а также анализ включений в природных алмазах подтвердили и уточнили идею Н.В. Соболева (Sobolev et al., 2009) о возможности использования состава флогопита для разграничения алмазов на парагенетические ассоциации.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФ 21-17-00147 и РФФИ 21-55-50011.

Литература:

- Sobolev N.V., Logvinova A.M., Efimova E.S. (2009) Syngenetic phlogopite inclusions in kimberlite-hosted diamonds: implications for role of volatiles in diamond formation. *Russian Geology and Geophysics* 50: 1234-1248.
- Plank T., Langmuir C.H. (1998) The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle. *Chemical Geology* 145: 325-394.

Включения в алмазах – ключ к познанию состава мантии Земли

Бобров А.В

Геологический факультет МГУ, Москва archi@geol.msu.ru

Включения в алмазе дают наиболее полную информацию о минеральном составе мантии Земли на различных горизонтах, что позволяет уточнять и корректно интерпретировать геофизические и экспериментальные данные. Вместе с тем, достоверность петрологических построений на основе данных по включениям в алмазах с различных уровней глубинности явно отличается.

Для *верхней мантии* широко обсуждаемая пиролитовая модель мантии (Рингвуд, 1981) находит надежное подтверждение в составе как ассоциаций включений в алмазах, так и пород мантийных ксенолитов. Наблюдаемое сочетание перидотитового и эклогитового парагенезисов алмаза с резким преобладанием первого из них свидетельствует о преимущественно перидотитовом (гранат-перцолитовом) составе верхней мантии с подчиненной долей эклогитов, представляющих собой результат глубокой переработки вещества океанической коры на различных глубинах.

Как следует из анализа данных по включениям в алмазах *переходной зоны*, в целом, для этой области устанавливается большая роль эклогитовой (гранатитовой) ассоциации, на что указывает значительное количество натрийсодержащих высококальциевых мейджоритовых гранатов, иногда в ассоциации с омфацитом. Эти данные хорошо согласуются с теоретическими и экспериментальными представлениями о том, что именно в переходной зоне аккумулируется вещество стагнирующих океанических плит (Anderson, Bass, 1986).

Анализ состава и распространенности *нижнемантийных ассоциаций* включений в природных алмазах демонстрирует явное несоответствие с экспериментальными данными (Kaminsky, 2017). Во-первых, распространенность ферропериклаза в природных алмазах гораздо выше по сравнению с экспериментальными данными и результатами теоретического моделирования состава нижней мантии Земли. Во-вторых, составы ферропериклаза оказываются значительно более железистыми по сравнению с минералами, полученными в ходе экспериментального изучения пиролитовых систем. Большинство исследователей рассматривают эти несоответствия как иллюстрацию различия в валовых составах верхней и нижней мантии. Тем не менее, следует отметить, что в решении проблемы состава нижней мантии нельзя ориентироваться только на данные по включениям в алмазах. Необходимо также использовать результаты экспериментов, в том числе по синтезу алмаза и изучению эволюции алмазообразующих систем в условиях нижней мантии Земли. Так, из результатов опытов, проведенных в карбонатно-силикатных системах в условиях частичного плавления, следует, что ферропериклаз является минералом на ликвидусе в широком диапазоне температур и давлений. При этом богатый железом ферропериклаз вполне может образовываться и в пиролитовой мантии, хотя при этом и необходимо наличие щелочно-карбонатных расплавов. Как было показано в работе Ю.А. Литвина с соавторами (2016), такие карбонатно-силикатные расплавы являются алмазообразующими при нижнемантийных параметрах, и их образование связано с малыми степенями частичного плавления карбонатизированного мантийного вещества. С этими расплавами генетически связана карбонатитовая ассоциация нижнемантийных включений в алмазах, минералогическими индикаторами которых являются щелочные карбонаты.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 21-17-00147).

Литература:

- Литвин Ю.А., Сливак А.В., Кузюра А.В. (2016) Основы мантийно-карбонатитовой концепции генезиса алмаза. Геохимия 54: 873–892.
- Рингвуд А.Е. (1981) Состав и петрология мантии Земли. Москва, Недра. 584 с.
- Anderson D.L., Bass J.D. (1986) Transition region of the Earth's upper mantle. Nature 320: 321–328.
- Kaminsky F.V. (2017) The Earth's lower mantle: Composition and structure. Springer. 331 p.

Элементы-примеси в бриджманите: обзор результатов экспериментов

Бобров А.В.¹, Матросова Е.А.², Бенделиани А.А.¹, Тамарова А.П.¹, Бинди Л.³

¹Геологический факультет МГУ, Москва archi@geol.msu.ru;

²ГЕОХИ РАН, Москва skatty.ea@gmail.com;

³Университет Флоренции, Флоренция, Италия luca.bindi@unifi.it

Бриджманит, $\text{Al}(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$ со структурой перовскита (Tschauner et al., 2014), является главной фазой нижней мантии Земли, его содержание составляет ~70% от ее объема (Andrault, 2007; Kaminsky, 2017). Бриджманит преобладает и в ассоциации фаз, образующихся при погружении базальтов на глубины нижней мантии (до 50 об.%, Irifune, Ringwood, 1993). Содержание примесных элементов в природных образцах бриджманита низкое. Концентрация Na_2O достигает 0.9 масс.%, Cr_2O_3 колеблется от 0.1 до 1.12 масс.%, а TiO_2 обычно не более 0.2 масс.%. Эти компоненты являются химическими индикаторами субстрата, в котором образовывался бриджманит, что важно для изучения типоморфизма нижнемантийных алмазов.

Состав бриджманита в системе $\text{Mg}_2\text{SiO}_4\text{--MgCr}_2\text{O}_4$ при 1600°C и 21-24 ГПа изменяется в пределах 2.8-6.7 масс.% Cr_2O_3 и зависит от давления (наиболее высокое содержание хрома зафиксировано при 24 ГПа). В системе $\text{Mg}_4\text{Si}_4\text{O}_{12}\text{--Mg}_3\text{Cr}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ установлена более высокая растворимость хрома в пределах 4-11 масс.% Cr_2O_3 , причем в ассоциации с высокохромистым гранатом бриджманит содержит не более 8.5 масс.% Cr_2O_3 , а с исчезновением граната (>21 ГПа) доля хрома в минерале значительно возрастает. Первое появление бриджманита в этой системе фиксируется уже при давлении 19 ГПа, что свидетельствует о стабилизирующем влиянии хрома на перовскитовую структуру при понижении давления (Sirotkina et al., 2015).

В модельной системе $\text{MgSiO}_3\text{--MgTiO}_3$ при 1600°C устанавливается широкий диапазон вхождения титана в состав минерала (5-13 масс.% TiO_2), причем, в отсутствии других фаз, характерно увеличение доли титана в бриджманите. При давлении >20 ГПа бриджманит ассоциирует с другой фазой перовскитовой структуры, также относящейся к ряду твердых растворов $\text{MgSiO}_3\text{--MgTiO}_3$, но имеющей гораздо более высокое содержание титана (до 51 масс.% TiO_2). Стабильность этой фазы простирается в область пониженного давления вплоть до 17 ГПа. В опытах при 20 ГПа и 1600°C с добавлением алюминия к данной системе была впервые получена фаза состава $[\text{Mg}_{5/6}\text{Al}_{1/6}][\text{Si}_{1/2}\text{Ti}_{1/3}\text{Al}_{1/6}]\text{O}_3$, представляющая собой трехкратно увеличенную суперструктуру идеального MgSiO_3 -бриджманита, появление которой связано с упорядочением Ti в октаэдрической позиции минерала (Matrosova et al., 2020).

В сложных многокомпонентных системах натрий практически не распределяется в бриджманит. Содержание Na_2O не превышает 0.52 масс.%. В системе $\text{MgSiO}_3 + 20$ масс.% Na_2CO_3 максимальное содержание Na_2O в бриджманите при давлении 24 ГПа и температуре 1700°C составляет 1.53 масс.% Na_2O . В условиях частичного плавления бриджманит сосуществует с карбонатом $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{CO}_3)_2$ и рингвудитом (до 4.5 масс.% Na_2O) (Bindi et al., 2016).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 21-17-00147).

Литература:

- Irifune T., Ringwood A. E. (1993) Phase transformations in subducted oceanic crust and buoyancy relationships at depths of 600–800 km in the mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.* 117: 101–110.
- Bindi L., Tamarova A., Bobrov A.V., Sirotkina E.A., Tschauner O., Walter M.J., Irifune T. (2016) Incorporation of high amounts of Na in ringwoodite: Possible implications for transport of alkali into lower mantle. *Am. Mineral.* 101: 483–486.
- Kaminsky F.V. (2017) *The Earth's lower mantle: Composition and structure.* Springer. 331 p.
- Matrosova E.A., Bobrov A.V., Bindi L., Pushcharovsky D.Yu., Irifune T. (2020) Titanium-rich phases in the Earth's transition zone and lower mantle: Evidence from experiments in the system $\text{MgO--SiO}_2\text{--TiO}_2(\pm\text{Al}_2\text{O}_3)$ at 10–24 GPa and 1600°C. *Lithos* 366–367: pap. 105539.
- Sirotkina E.A., Bobrov A.V., Bindi L., Irifune T. (2015) Phase relations and formation of chromium-rich phases in the system $\text{Mg}_4\text{Si}_4\text{O}_{12}\text{--Mg}_3\text{Cr}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ at 10-24 GPa and 1600°C. *Contrib. Mineral. Petrol.* 169: pap. 2.
- Tschauner O., Ma C., Beckett J.R., Prescher C., Prakapenka V.B., Rossman G.R. (2014) Discovery of bridgmanite, the most abundant mineral in Earth, in a shocked meteorite. *Science* 346: 1100–1102.

Особенности формирования агатов на современных термальных полях Камчатки

Большаков И.Е.

Геологический факультет МГУ, Москва bolshakov.ilya.210@yandex.ru

В современном научном мире существует множество взглядов на вопрос определения термина «агат», однако, большая часть исследователей сходится во взгляде, что это тонковолокнистая разновидность халцедона с полосчатой или пятнистой текстурой. Еще большие разногласия вызывает попытка разрешения вопроса генезиса агатов. Существует несколько широко известных теорий, объясняющих механизм их формирования, однако различия этих теорий колоссальны. Об образовании агатов написано множество научных трудов большим количеством авторов (Liesegang, 1915; Годовиков и др., 1987; Zenz, 2009; Спиридонов и др., 2014)

Основные гипотезы можно разделить на три крупных группы:

- 1) Кристаллизация расплавленного кремнезема при застывании лавы.
- 2) «Гипотеза созревания» (образование агатов из геля за счет ритмического осаждения при диффузии «кольца Лизеганга»).
- 3) «Гипотеза протекания» (образование агатов из растворов, фильтрующихся по порам пород).

Согласно современным представлениям, формирование агатов – длительный процесс, развивающийся в породах не моложе 5-6 миллионов лет под действием низкоградного метаморфизма. Однако, в процессе полевых работ на различных термальных полях Камчатки (термальных полях Камбального хребта, массива Большой Семячик, и Дачных термальных источниках) в 2019-2021 гг. были отобраны образцы значительно более молодых агатов, в том числе, из обнажений и во вмещающих породах.

Агаты различных термальных полей обладают отдельными особенностями строения, такими как упорядоченность слоев и цвет. Для большей части агатов характерно отсутствие окраски, при котором прозрачные слои чередуются со слоями белого цвета, имеющими облекающее строение. Однако некоторые образцы оказываются частично окрашены в черный и светло-желтый цвета. В ряде образцов встречается классическая агатовая слоистость с ровными границами между отдельными прослоями, но также отобрано и большое количество образцов, в которых слоистость более хаотична и имеет гораздо более размытые границы между отдельными слоями, что может свидетельствовать о гораздо более быстро протекающем процессе кристаллизации халцедона.

В то же время, вмещающие породы в областях, примыкающих к миндалинам с агатами, оказываются подверженными кислотному выщелачиванию, в результате чего вулканическое стекло, а также минералы-вкрапленники вмещающих андезитов превращаются в опал. Этот факт позволяет сделать предположение о том, что агаты формируются из кислых растворов, фильтрующихся в приповерхностной зоне термальных полей. Также было отмечено, что на Южно-Камбальном термальном поле множество агатовых миндалин оказываются окаймлены тонким слоем игольчатых кристаллов селадонита, покрытых глобулями опала.

Таким образом, есть все основания предполагать, что формирование агатов происходило в недавнем времени на термальных полях Камчатки и, вполне возможно, происходит до сих пор.

Литература:

- Годовиков А.А., Моторин С.Г., Рипинен О.И. (1987) Агаты. М.: Недра, 368 с.
- Спиридонов Э.М., Ладыгин В.М., Янакиева Д.Я., Фролова Ю.В., Семиколенных Е.С. (2014) Агаты в метавулканитах. М., МОЛНЕТ Специальный выпуск журнала "Вестник РФФИ" 72 с.
- Liesegang, R.E. (1915) Die Achate, Steinkopf: Dresden-Leipzig, 126 p.
- Zenz J. (2009) Agates II. Haltern, Germany: BODE, 656 p.

Физико-химические условия формирования золоторудного месторождения Кутын (Хабаровский край)

Бочаров В.Н.¹, Азарян А.М.^{1,2}, Баданина Е.В.¹

¹СПбГУ, Санкт-Петербург adel-sagitova@yandex.ru;

²АО «Полиметалл Инжиниринг», Санкт-Петербург

Золоторудное месторождение Кутын находится в пределах Ульбанского террейна. Рудные зоны расположены в эндо- и экзо-контактах гранодиоритов позднемелового Биранджинского массива. Вмещающие породы представлены юрскими терригенными толщами. Оруденение контролируется тектоническими нарушениями и локализовано в серицит-карбонат-кварцевых метасоматитах, а также в карбонат-кварцевых прожилках. Месторождение относится к золото-кварцевой убогосульфидной рудной формации.

На месторождении выделяются пять ассоциаций рудной минерализации, сформированных в два этапа. Гидротермально-метасоматический этап включает в себя метасоматическую и жильную стадии, в которых выделяются пирит-арсенопиритовая, золото-тетраэдрит-арсенопиритовая, золото-пиритовая и теллуридная ассоциации. Гипергенный этап проявлен в развитии гетит-арсенатной ассоциации (Азарян и др., 2022).

По диаграмме стабильности системы Au-Ag-Te при $N_{Ag} = 0.37$ температура образования золото-тетраэдрит-арсенопиритовой ассоциации (в парагенезисе с гесситом) оценивается выше 170°C , $\log f(\text{Te}_2) = 10^{-17} - 10^{-12}$ (N_{Ag} атомные проценты Ag в электроуме) (Бортников и др., 1988).

По А.М. Афифи и др. (Afifi et al., 1988), область стабильности парагенезиса минералов золото-тетраэдрит-арсенопиритовой ассоциации, включающей в себя электроум, гессит, пирит, арсенопирит, галенит, для температуры 200°C ограничена линиями петцит-гессит, гессит-акантит, арсенопирит-пирит+теннантит, пирит-пирротин. Вариации содержания серебра в электроуме (X_{Ag} от 0.37 до 0.49), ассоциирующем с гесситом, сужают область стабильности по $f(\text{Te}_2)$. При 200°C образование изученной золото-тетраэдрит-арсенопиритовой ассоциации проходило в интервале фугитивности серы от -16.8 до -15.0 и фугитивности теллура от -16.5 до -15.2.

Для определения физико-химических параметров рудообразующего флюида были изучены флюидные включения (ФВ) в кварце метасоматитов и прожилков. Термобарометрические исследования, определение состава газовой фазы ФВ в кварцах методом рамановской спектроскопии проведены в ресурсном центре СПбГУ «Геомодель». Установлено, что формирование золоторудного оруденения происходило на фоне снижения температуры от среднетемпературных условий золото-тетраэдрит-арсенопиритовой ассоциации ($240-370^{\circ}\text{C}$) к низкотемпературным жильным золото-пиритовой ($190-215^{\circ}\text{C}$) и теллуридной ($140-165^{\circ}\text{C}$) из хлоридных флюидов низкой солености с газовой фазой углекислотного состава с примесью метана при вариациях фугитивности серы и теллура

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-35-90102

Литература:

- Азарян А.М., Баданина Е.В., Анисимов И.С. (2022) Минеральный состав руд золотоносных метасоматитов месторождения Кутын (Хабаровский край). Записки РМО 3: 16–36.
- Борисенко А.С. (1977) Изучение солевого состава газовой фазы жидких включений в минералах методом криометрии. Геология и геофизика 8: 16–27.
- Бортников Н.С., Крамер Х., Генкин А.Д., Крапива Л.Я., Санта-Крус М. (1988) Парагенезисы теллуридов золота и серебра в золоторудном месторождении Флоренсия (Республика Куба). Геология рудных месторождений 2: 49–61.
- Afifi A.M., Kelly W.C., Essene J. (1988) Phase relations among tellurides, sulfides, and oxides: I. Thermochemical data and calculated equilibria. Econ. Geol. 83: 377–394.
- Bodnar R.J., Vityk M.O. (1994) Interpretation of microthermometric data for H_2O -NaCl fluid inclusions. Fluid inclusions in minerals, methods and applications. Ed. by De Vivo B, Frezzotti M.L. Virginia Tech, Blacksburg: 117–130.

Электронно-зондовый микроанализ химического состава тонких пленок шпинелевого состава ($MgAl_2O_4$) с разрешением по глубине

Булатов В.А., Щапова Ю.В., Замятин Д.А.

ИГГ УрО РАН, Екатеринбург *vladislavtalica@gmail.com; shchapova@igg.uran.ru; dzamyatin85@gmail.com*

Поверхностные слои минералов и материалов могут существенно отличаться от объема по составу, структуре и свойствам. Кроме того, распределение этих характеристик по площади пленки может быть неоднородно в силу технологических особенностей или их природы. Отработка и совершенствование локальных неразрушающих методик исследования состава и структуры тонких пленок и покрытий является актуальной задачей как для минералогии, так и для материаловедения. В методе электронно-зондового микроанализа (ЭЗМА) толщина анализируемого слоя зависит от глубины проникновения первичных электронов, размера области генерации рентгеновского излучения характеристических линий и глубины выхода характеристического излучения, что позволяет, меняя операционные параметры микроанализатора, получать сигнал с разным разрешением по глубине.

В настоящей работе отработана методика ЭЗМА определения химического состава пленок толщиной порядка первых единиц мкм на стеклообразной подложке на микроанализаторе Cameca SX100. Содержание основных элементов определялось по линиям K_α , для примесных элементов при снижении U ниже края поглощения элементов – по L_α линиям. Пленки шпинелевого состава $MgAl_2O_4$ с примесями (Fe, Ni, Ti, Ca и др.) переменной толщины ($d=1\div 3$ мкм) на поверхности кварцевого стекла получены методом магнетронного напыления.

Выбор оптимальных условий ЭЗМА тонких пленок обусловлен необходимостью оптимизации операционных параметров рабочего тока зонда и диаметра электронного пятна для обеспечения приемлемых пределов обнаружения и погрешностей определения при низком ускоряющем напряжении, обеспечивающем требуемое разрешение по глубине. Сформулированы подходы и описаны приемы анализа основного и микропримесного химического состава поверхностных слоев минералов и материалов, пленок и покрытий, приведены операционные параметры ЭЗМА, оценены возможности и ограничения методики. Выполнены расчетные оценки и получены экспериментальные зависимости толщины анализируемого слоя пленки $MgAl_2O_4$ от ускоряющего напряжения ($U=3\div 20$ кВ). Количественный анализ состава (таблица) пленки толщиной ~ 3 мкм может быть определен с использованием $U=3\div 15$ кВ (аналогично образцу сравнения – монокристаллу $MgAl_2O_4$). При толщине ~ 1 мкм ускоряющее напряжение U не должно превышать 8 кВ. Для обеспечения приемлемого отношения сигнал/шум в условиях малого объема анализируемого вещества для примесных элементов требуется использование времени сбора сигнала не менее 20-30 с.

Таблица. Состав тонких пленок толщиной $d=1\div 3$ мкм при напряжении $U=3\div 15$ кВ.

| Ускоряющее напряжение, кВ | Содержание элемента, масс. % | | | | | | | | | | |
|---------------------------|------------------------------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|--------|
| | Mg | Al | Si | Fe | Cr | Ni | P | Ca | Ti | O | Сумма |
| 15 (3 мкм) | 14.57 | 27.85 | 0.08 | 8.91 | 2.09 | 1.35 | 0.55 | 0.40 | 0.32 | 39.42 | 95.53 |
| 7 (3 мкм) | 14.24 | 27.26 | 0.12 | 13.33 | 2.01 | 1.59 | 0.54 | 0.41 | 0.33 | 40.02 | 99.85 |
| 15 (1 мкм) | 7.13 | 11.71 | 23.59 | 4.54 | 0.96 | 0.74 | 0.22 | 0.18 | 0.18 | 44.40 | 93.64 |
| 7 (1 мкм) | 14.20 | 27.20 | 0.62 | 12.99 | 2.10 | 1.56 | 0.52 | 0.42 | 0.32 | 40.42 | 100.35 |

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИГГ УрО РАН (темы № АААА-А18-118053090045-8 и № АААА-А19-119071090011-6) на оборудовании ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН. Дооснащение и комплексное развитие ЦКП "Геоаналитик" ИГГ УрО РАН осуществляется при финансовой поддержке гранта Минобрнауки РФ, Соглашение № 075-15-2021-680. Авторы благодарны коллегам из ФТИ УрФУ Кирякову А.Н. и Зацепину А.Ф. за предоставленные тестовые образцы пленок.

Эпитермальное золотосеребряное рудопроявление Каньон (Камчатский край): особенности строения, геолого-структурные закономерности размещения оруденения.

Буханова Д.С.¹, Жегунов П.С.¹, Жирнова Т.С.²

*ИВиС ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский dasha-snejinka@yandex.ru;
²ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург*

Эпитермальное рудопроявление Каньон находится на границе Тигильского и Карагинского районов Камчатского края в 80 км от районного центра п. Оссора. Территория рудопроявления входит в состав Гевыльвэленского рудного поля Эруваямского рудного узла Оссорского рудного района, расположенного в северной части Центрально-Камчатского вулканического пояса. Вулканический пояс здесь представлен неоген-четвертичными эффузивно-пирокластическими образованиями среднего и основного состава, а также их субвулканическими фациями; в меньшей мере развиты вулканиты кислого состава. Все эти образования слагают три структурных яруса: миоценовый, миоцен-плиоценовый и четвертичный. Эпитермальные золотосеребряные рудопроявления приурочены к миоценовому ярусу (Безрукова и др., 2004).

Впервые продуктивность жил рудопроявления Каньон обнаружена в ходе групповой геологической съёмки масштаба 1:50 000 (Боровцов, Ким и др., 1980). Позже, в ходе поисково-ревизионных работ 1999-2003 гг., проведенных ОАО «Камгео» в пределах Эруваямского рудного узла, была выполнена оценка рудопроявления Каньон с подсчётом прогнозных ресурсов. По результатам ревизионных работ в пределах рудопроявления Каньон выявлено 12 жильно-прожилковых зон с содержанием золота от 0.5 до 138.2 г/т, серебра до 2702.4 г/т (Безрукова и др., 2004). В настоящее время правом проведения поисково-оценочных работ на рудопроявлении Каньон владеет ООО «Оссорская ГГК».

На рудопроявлении отмечаются жилы «заполнения» (рис. 1), жильно-прожилковые зоны и участки метасоматического замещения (преимущественно вторичные кварциты и аргиллизиты). Жильные тела сложены кварцем, адуляром, карбонатом и халцедоном, зачастую брекчиевой текстуры с обломками вмещающих пород. В результате полевых наблюдений установлены структурные характеристики жильно-прожилковых рудных зон. Выявлены закономерности размещения и особенности строения рудных тел, которые обусловлены как трещинной тектоникой, так и литологическими особенностями вмещающих вулканических пород.

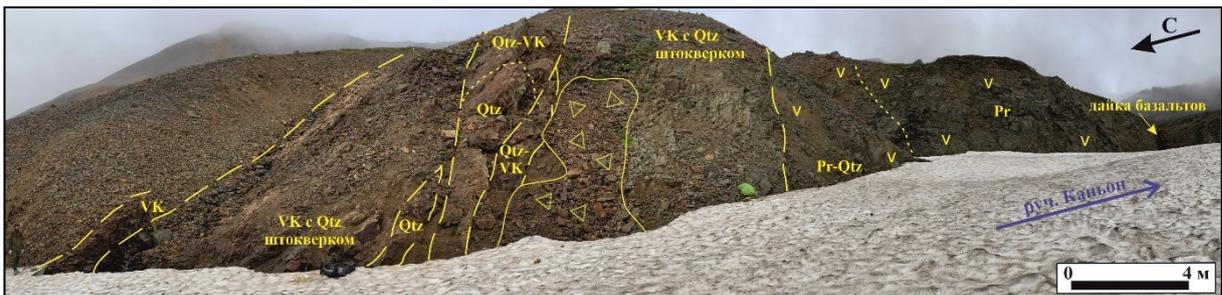


Рис. 1. Коренной выход жильной зоны № 1 в борту ручья Каньон (горизонт 940 м).

Примечание: VK – вторичные кварциты, Pr – пропилиты, Qtz – кварц.

Литература:

- Безрукова Л.А. и др. (2004) Информационный отчёт о результатах 1го этапа поисковых работ, проведенных ОАО «Камгео» в пределах Оссорского рудного района в 1997-2004 гг. (Ф).
- Боровцов А.К., Ким А.Г. и др. (1980) Отчет о результатах групповой геологической съёмки масштаба 1:50 000, проведенной Эруваямской партией в 1974-1980 гг. в бассейнах рек Эруваям, Дранка, Лесной (листы О-57-24-Г; О-57-35-Г; О-57-36-А,Б,В,Г; О-57-47-А,Б; О-57-48-А,Б; О-58-13-В; О-58-25-А; О-58-37-А). (Ф).

Особенности минералов группы блёклых руд Ni-Co месторождения Хову-Аксы, Тыва

Галынина О.В.¹, Гриценко Ю.Д.²

¹Геологический факультет МГУ, Москва galinina9@gmail.com;

²ygritsenko@rambler.ru

Благодаря широкому изоморфизму, блёклые руды являются чувствительными индикаторами условий рудообразования. Их состав и эволюция состава индивидуальны для каждой рудной формации. Месторождение арсенидных Ni-Co руд Хову-Аксы является типичным представителем пятиметалльной рудной формации. На данном месторождении выделяют несколько стадий минералообразования (Лебедев, 2017): ранняя арсенидная, главная арсенидная, поздняя арсенидная и постарсенидная – сульфидно-сульфоарсенидно-блэкловорудная. Ассоциации и особенности состава блёклых руд изучены недостаточно полно, наши исследования призваны восполнить этот пробел.

Среди блёклых руд месторождения Хову-Аксы широко распространены Fe-теннантит и Sb-содержащий Fe-теннантит, менее распространён As-содержащий Fe-тетраэдрит, без As тетраэдрита установлено не было. Содержания Bi невысокие (max 4.96 масс.%), висмутом обогащены в равной мере и теннантит, и тетраэдрит. Zn-содержащие блёклые руды распространены значительно реже, чем Fe-содержащие. При увеличении содержания тетраэдритового компонента увеличивается содержание Zn. Практически для каждого изученного образца совокупность точек анализов в координатах Sb/(Sb + As + Bi) – Zn/(Zn+Fe+Cu) аппроксимируется прямыми линиями с различными углами наклона, которые уменьшаются с увеличением содержания тетраэдритового компонента. Такие закономерности характерны для состава блёклых руд Ховуаксинского месторождения, изученных Н.С. Рудашевским с соавторами (Рудашевский и др., 1978), а также для блёклых руд порфирово-эпитермальных систем Южного Урала (Плотинская и др., 2015).

Для блёклых руд, образовавшихся в ассоциации с Ni-Co арсенидами и замещающих их, ярко выраженная зональность не характерна. Блёклые руды, образующиеся при замещении халькопирита и не ассоциирующие с Ni-Co арсенидами, характеризуются ярко выраженной осцилляционной зональностью, характеризующейся ритмичными колебаниями содержаний как Fe-Zn, так и Sb-As. Подобного типа зональность характерна для блёклых руд золоторудного вулканогенно-плутоногенного месторождения Дарасун (Забайкалье) (Филимонов, 2009).

В зоне окисления при разложении минералов группы блёклых руд формируется гипергенная минерализация. По блёклым рудам развиваются разнообразные карбонаты и арсенаты меди. Наиболее распространенным вторичным минералом меди является азурит, образующий тонкие корки и прожилки на сульфидных агрегатах. Во многих агрегатах развиты прожилки халькозина. На Хову-Аксах распространены карбонат-арсенаты меди и кальция – тиролит и конихальцит, реже – рруффит, часто образующие сростания с азуритом и арсенатами никеля, кобальта, кальция.

Литература:

- Лебедев В.И. (2017) Возрождение кобальтового производства в Тыве на базе освоения запасов Хову-Аксынского месторождения кобальтовых арсенидных руд и отходов их обогащения. Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (ИГМ СО РАН, Новосибирск, Россия) Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН (ТувИКОПР СО РАН, Кызыл, Россия): 192–199.
- Плотинская О.Ю., Грабежев А.И., Зелтманн Р. (2015) Состав блёклых руд как элемент зональности порфирово-эпитермальной системы (на примере рудопоявления Биксизак, Ю. Урал). Геология рудных месторождений 57(1): 48–70.
- Рудашевский Н.С., Григорьев Д. П., Иоффе П.А. (1978) О природе неоднородности состава блёклых руд. Доклады академии наук СССР 243(6): 1542–1545.
- Филимонов С.В. (2009) Минералы группы блёклых руд – индикаторы рудогенеза (на примере гидротермальных месторождений золота). Автореф. дис. канд.геол.-мин.наук. 26 с.

Алмазные месторождения России

Гаранин В.К., Гаранин К.В.

ПАО «Алроса», Москва vgaranin@mail.ru

Россия является крупнейшей алмазной державой в мире. На ее территории расположены три алмазные провинции и крупнейшее в мире месторождение импактных алмазов – Попигайская кольцевая импактная структура. Самая крупная алмазная провинция – Якутская. На ее территории обнаружено порядка 1500 кимберлитовых и родственных им пород. В основном это вулканические тела, затем силлы и жилы. Из них только 25 объектов относятся к месторождению. Это порядка 2%. Самое богатое месторождение – трубка Интернациональная. Содержание алмаза в ней 7-9 карат/тонну. Известны также богатые месторождения Мир, Удачная, Айхал, Нюрбинская, Ботуобинская, Юбилейная. В них содержание алмаза от 4 до 1 карат/тонну. Бедные месторождения, например, Заря, в которой содержание алмаза оценивается в 0.02 карат/тонну. На территории Якутской провинции все тела размещены в 28 кимберлитовых полях. И только в южной части провинции в Мало-Ботуобинском, Накынском, Далдыно-Алаkitском и Верхне-Мунском полях располагаются коренных и россыпные месторождения алмазов. В северной части Якутской провинции алмазы обнаружены только в россыпях по реке Эбелях и ее ответвлений. Все коренные месторождения располагаются на глубинных разломах в трех тектонических зонах. Глубины заложения кимберлитовых очагов лежат в мантии на глубинах 150-200 км, где могут находиться зоны, обогащенные алмазом.

Первые открытия алмазных месторождений в Якутской провинции отмечены в 1953 году. Основной способ добычи – карьерный, т.к. многие тела прорывают дневную поверхность. В настоящее время многие месторождения осваиваются шахтным способом примерно с глубин порядка 400 метров, т.к. карьером невозможно добывать алмазы с глубин 400 метров и далее до глубин 1.5 км.

Вторая по значимости провинция – Архангельская на севере европейской части России. Здесь открыто порядка 100 кимберлитовых и родственных им тел. И только два из них относятся к месторождению алмаза: им. М.В. Ломоносова и им. В. Гриба. Потенциал архангельской провинции намного меньше потенциала Якутской. Тем не менее, здесь работают фабрики и идет активная добыча алмаза. В основном карьерным способом. Россыпных месторождений нет. Месторождения по вещественному составу, строению аналогичны месторождениям Якутии. По возрасту все месторождения имеют диапазон 350-380 млн лет.

Третья провинция – это Уральская в Вишерском районе Пермской области. В ней располагаются россыпные алмазные проявления с очень высоким качеством алмазного сырья. В настоящее время эти россыпи уже отработаны. В месторождениях алмазы имеют в основном октаэдрический габитус, есть кубы и полиагрегатные стяжения. Алмаз в той или иной степени растворен вплоть до образования округлых форм.

Все месторождения имеют общие черты по строению тел и их вещественному составу. Тела имеют кратерную настройку, затем идет богатая алмазами диатремовая часть и далее на глубинах выявлен подводный канал. Богатые алмазом породы брекчевидной структуры, так называемые автолитовые кимберлиты. В кимберлитовых породах имеются вкрапленники алмаза, граната, пироксенов, хромтов, пикроильмениита, оливина и других минералов, а также ксенолиты коровых и мантийных пород, в том числе алмазоносных, изучение которых и дает нам основу для наших познаний состава и строения коры и мантии Земли.

Среди найденных алмазов достаточно часто встречаются очень крупные: 888 карат (россыпи Эбеляха), им. В. Гриба (189 карата) и другие алмазы. Большинство из них находятся в алмазном фонде России в Кремле, в Гохране России и в компании «АЛРОСА».

Мантийные породы сложены перидотитами, пироксенитами и эклогитами. Наиболее обогащены алмазом эклогиты. Наибольший интерес при изучении представляют алмазы и включения в нем и алмазоносные породы. Их ценность состоит в том, что они дают уникальные данные о веществе глубин мантии и процессах, которые приводят к кристаллизации алмаза.

Отдельно необходимо дать краткую информацию о импактных алмазах. Только в России расположена крупная Попигайская кольцевая структура с очень высоким содержанием алмаза больше, чем во всех кимберлитовых месторождениях России. Здесь алмазы мелкие до 1-2 мм, различных цветов, обладают высокой твердостью, не содержат азот и пока, к сожалению, не пригодны даже в качестве абразивного материала. В основном алмаз относится к лонсдейлиту-гексагональному алмазу.

Активность вулкана Безымянный (Камчатка)

Гирина О.А.¹, Ладыгин В.М.²

¹ИВиС ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский girina@kscnet.ru;

²Геологический факультет МГУ, Москва skalka@geol.msu.ru

Безымянный является одним из самых активных вулканов мира. С апреля 1956 г. и до настоящего времени в его эксплозивном кратере, образовавшемся во время катастрофического извержения 30 марта 1956 г., продолжается рост лавового купола "Новый" (Горшков, Богоявленская, 1965; Girina et al., 2020).

В развитии лавового купола выделены чередующиеся периоды поступления на поверхность земли магматического вещества различной вязкости (Girina, 2013). Например, наиболее быстро объем лавового купола увеличивался в первые три месяца – средняя скорость его роста составляла 3.3 м/сутки, а с середины апреля до середины июня – 5 м/сутки (Горшков, Богоявленская, 1965). Вероятно, в это время и вплоть до 1960 г. в кратер выжимались блоки пластичной лавы, затем до марта 1965 г. – блоки плотной (жесткой) лавы (Girina, 2013). После сильного эксплозивного извержения вулкана в марте 1965 г. в кратере был обнаружен купол пластичной лавы, названный "Наутилус", его рост продолжался до 1969 г. (Кирсанов, 1979). Экструзия жестких блоков лавы "Октябрь" формировалась в кратере вплоть до 1975 г., затем там вновь были обнаружены выжимки пластичной лавы (Кирсанов, 1979).

В 1977-1985 гг. эксплозивные фазы извержений Безымянного завершались выжиманием лавовых потоков на склоны купола, длившимся несколько месяцев. После сильного эксплозивного извержения вулкана в июле 1985 г. выжимание лавового потока на северо-восточный склон купола происходило в течение нескольких лет (Girina, 2013).

В дальнейшем вновь стали отмечаться эксплозивные извержения и выжимания лавовых потоков. К 2012 г. лава бронировала все склоны купола. В связи с продолжительными излияниями базальтов в районах вулкана Ключевской (01.09.2012–15.01.2013 и 15.08–15.12.2013) и на Толбачинском долу (27.11.2012–09.2013 гг.), в 2012-2016 гг. Безымянный находился в состоянии относительного покоя (Гирина, 2016). С декабря 2016 г. и до настоящего времени продолжают происходить эксплозивные извержения вулкана и выжимания лавовых потоков на склоны купола (Girina et al., 2020).

Литература:

- Гирина О.А. (2016) Спутниковые данные высокого разрешения для уточнения положения разломных зон в пределах Ключевской группы вулканов Камчатки. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса 13(6): 148–156. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2016-13-6-148-156>
- Горшков Г.С., Богоявленская Г.Е. (1965) Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения 1955-1963 гг. Наука, Москва. 172 с.
- Кирсанов И.Т. (1979) Экструзивные извержения на вулкане Безымянном в 1965-1974 гг. и их геологический эффект. В кн.: Проблемы глубинного магматизма. Наука, Москва: 50–69.
- Girina O.A. (2013) Chronology of Bezymianny Volcano activity, 1956-2010. Journal of Volcanology and Geothermal Research 263: 22–41. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.05.002>
- Girina O.A., Gorbach N.V., Davydova V.O., Melnikov D.V., Manevich T.M, Manevich A.G., Demyanchuk Yu.V. (2020) The 15 March 2019 Bezymianny Volcano Explosive Eruption and Its Products. Journal of Volcanology and Seismology 14(6): 394–409. <https://doi.org/10.1134/S0742046320060032>

Магматические комплексы Кодаро-Удоканского района, Северное Забайкалье

Гонгальский Б.И.

ИГЕМ РАН, Москва brgon@mail.ru

Пояс палеопротерозойских ультрабазит-базитовых пород, расположенный вдоль южной границы Сибирской платформы, включает как крупные расслоенные массивы, так и мелкие интрузивные тела. В его состав входят Малозадойский массив на западе и массивы чинейского комплекса в средней его части (Северное Забайкалье), а также дайки нимнырского комплекса на востоке. В раннем палеопротерозое в этой зоне сформировался Кодаро-Удоканский внутрикратонный прогиб с вулканогенно-осадочными отложениями с сульфидными рудами в осадочных породах удоканской серии (1896.2 ± 6.2 млн лет, Perello et al., 2016). Последние содержат крупные и суперкрупные магматические месторождения меди, ванадия, а также небольшие месторождения платиновых металлов, никеля, кобальта и др. Крупнейшим из них является Чинейский массив (возраст 1890-1811 млн лет, Гонгальский, 2015) с запасами более 5 млн т ванадия и 15 млн т меди, а также 50 тыс. т урана. Кроме этого, Cu-Ni рудопроявления обнаружены в Луктурском и Майлавском массивах (Gongalsky, Krivolutskaya, 2019).

Для выяснения пространственных взаимоотношений ультрабазит-базитовых массивов выполнено 3D-моделирование глубинного строения района, основанное на магнитных и гравитационных данных (программа CosCAD-3D (МГРИ)). Результаты моделирования показали, что в строении верхней части коры района принимает участие высокоплотные породы, которые интерпретируются как базитовые и ультрабазитовые тела. Так, Чинейский и Луктурский массивы представляют собой только верхние части вертикальных колонн тел высокой плотности – разноглубинных магматических камер. Формирование Чинейского массива происходило при поступлении расплавов по двум каналам, сформировавшим железо-титан-ванадиевые месторождения Магнитное и Этырко, в строении разрезов выделены серии, макроритмы, ритмы, микроритмы. Ритмичность нарушается более поздними инъекциями в различной степени фракционированных расплавов, что приводило к образованию раннемагматических титаномагнетитовых руд (пироксен-титаномагнетиты) и позднемагматических (плагиоклаз-титаномагнетиты). Повышение концентраций летучих, рудных, редких элементов в остаточных расплавах приводило к формированию сульфидных руд в ранее закристаллизованных магматических (штокверки) или вмещающих осадочных породах (месторождения Удокан, Ункур, Правоингамакитское, Красное и др.). Большой (?) интервал функционирования сообщающихся магматических камер, внедрения первичных и фракционированных расплавов приводили к формированию совмещенных в пространстве разноформационных месторождений. Магматические и осадочные породы района часто преобразованы более поздними метасоматическими процессами, в них установлены высокие концентрации золота, урана и других металлов.

Исследования проведены в рамках НИР ИГЕМ РАН.

Литература:

- Гонгальский Б.И. (2015) Месторождения уникальной металлогенической провинции Северного Забайкалья. М.: ВИМС, 248 с.
- Gongalsky B., Krivolutskaya N. (2019) World-Class Mineral Deposits of Northeastern Transbaikalia, Siberia, Russia. Springer. 321 p.
- Perello J., Sillitoe R.H., Yakubchuk A.S., Valencia V.A., Cornejo P. (2016) Age and tectonic setting of the Udokan sediment hosted copper-silver deposit, Transbaikalia, Russia. Ore Geol. Rev. 86: 856–866.

Ретроспективный анализ геохимических данных для пород Толбачинского дола

Гордейчик Б.Н.^{1,2}, Чурикова Т.Г.²

¹ИЭМ РАН, Черноголовка gordei@iem.ac.ru;
²ИВиС ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский

Вот уже 10 лет продолжают исследования Трещинного Толбачинского извержения имени 50-летия ИВиС ДВО РАН (ТТИ-50). Лавы ТТИ-50 оказались никогда не извергавшимися здесь трахиандезибазами, а перед петрологами и геохимиками встало множество вопросов. Как связаны между собой лежащие друг на друге афировые трахиандезибазалы извержения ТТИ-50 и оливиновые базальты извержения 1941 года, высокомагнезиальные лавы Северного и высокоглиноземистые лавы Южного прорывов БТТИ, а также лавы других извержений Толбачинского дола (ТД)? Какое отношение все эти разнообразные продукты ТД имеют к стоящим рядом стратовулканам Острый Толбачик и Плоский Толбачик? Вопросы далеко не исчерпываются этим кратким перечнем, поэтому регулярно публикуются новые работы, посвященные изучению объектов ТД. Попытаемся понять, складывается ли из разнородной мозаики отдельных публикаций цельная картина и чего в ней не хватает.

В конце прошлого века публиковались данные о макро- и микроэлементах пород ТД, причем для микроэлементов это были как XRF, так и ICP-MS измерения. В нашем веке начали публиковаться данные о составе расплавных включений в оливинах пород ТД. Мы провели совместный анализ данных для пород и расплавных включений, причем XRF-данные для микроэлементов пород с концентрациями <100 ppm из-за разбросов не рассматривались.

Каждый из макроэлементов формирует четкий непрерывный тренд, характерный для фракционной кристаллизации. Породы и расплавы в основном являются базальтами с $MgO \approx 2 \div 11$ вес.% и $K_2O \approx 0.5 \div 2.8$ вес.% за исключением пород ТТИ-50, представленных андезибазами. Данные о составах расплавных включений согласуются с данными о составах пород. Калий и фосфор ведут себя как несовместимые элементы.

Данные о летучих элементах имеются только для расплавных включений. Из-за большого разброса и фрагментарности данных видны только отдельные поля, а не непрерывные тренды. Можно лишь утверждать, что самую медленную дегазацию демонстрирует F, после него следует Cl, а вот соотношения между S, CO_2 и H_2O из-за большого разброса данных далеко не очевидны.

Все халькофильные элементы показывают убывание отношений с несовместимыми элементами в низко-К области, а в высоко-К области их отношения остаются приблизительно постоянными. Убывание этих отношений, возможно, связано с осаждением сульфидов на начальной стадии эволюции расплавов. Исключение составляет Pb, он ведет себя скорее, как несовместимый элемент, и его отношения с другими несовместимыми элементами остаются практически постоянными во всем диапазоне изменения K_2O . Заметим, что наибольший разброс данных характерен для отношений Cu с несовместимыми элементами.

Не участвующие в формировании минералов несовместимые элементы ведут себя согласно классической фракционной кристаллизации, сохраняя постоянные отношения (в том числе La/Nb, Nb/Zr, La/Ce, Pr/Nd, K_2O/Nb , Cs/Rb) во всем диапазоне изменения K_2O . Исключением являются отношения с участием Ba (например, Ba/La, Ba/ P_2O_5 , Ba/Nb, Ba/Rb, Ba/Cs), которые уменьшаются в процессе эволюции расплава. Уменьшение отношений с участием Ba объяснялось ранее фракционированием несовместимых элементов. Однако, литературные данные для ТТИ-50 о концентрациях Ba в плагиоклазах (Pl) и лавах позволяют оценить коэффициент распределения Ba в системе Pl–расплав. Эти оценки показывают, что коэффициент распределения Ba между Pl и расплавом в лавах ТТИ-50 составляет величины, большие 1, и может достигать 15. Совместимость Ba с обильно кристаллизующимся Pl в эволюционированных лавах ТД объясняет убывание Ba по отношению к другим действительно несовместимым элементам.

Таким образом, ретроспективный анализ литературных данных не подтверждает гипотезу о фракционировании несовместимых элементов. Напротив, данные о несовместимых элементах из разных литературных источников согласованно демонстрируют процесс классической фракционной кристаллизации в лавах ТД.

Работа поддержана грантами РФФИ № 13-05-92104 и № 20-55-50001.

Смещение анкарамитового и трахиандезитового расплавов (Магнитогорская зона, Южный Урал)

Готтман И.А., Пушкарев Е.В.

ИГГ УрО РАН, Екатеринбург gottman@igg.uran.ru; pushkarev.1958@mail.ru

При изучении вулканогенных комплексов ириндыкской свиты Магнитогорской островодужной зоны на Южном Урале были установлены анкарамиты, представляющие продукты кристаллизации примитивного магнезиального, высокоизвестковистого расплава (Пушкарев и др., 2018). Породы имеют порфиловую структуру. Вкрапленники представлены высокомагнезиальным клинопироксеном, хромшпинелью, оливином и ортопироксеном. Количество вкрапленников достигает 30-40%, среди которых преобладает клинопироксен. Породы характеризуются высокими содержаниями MgO и CaO в интервале 12-18% и высоким $CaO/Al_2O_3 > 1$. По особенностям структуры и состава анкарамиты Магнитогорской зоны соответствуют анкарамитам молодых островных дуг юго-западной Пацифики (Barsdell, Berry, 1990; Della-Pasqua, Varne, 1997).

При проведении полевых исследований в Магнитогорской зоне были обнаружены пластовые тела анкарамитов, на которые налегают лавы трахиандезитов со структурами пахоэхоэ на поверхности потоков. В зоне контакта с анкарамитами в трахиандезитах видна ориентировка микрофенокristов амфибола, что свидетельствует о течении расплава. Контакт между породами резкий. Было установлено, что в момент, когда породы пришли в соприкосновение, они обе находились в подвижном состоянии. В пользу этого свидетельствуют захваченные трахиандезитами ксенокристаллы хромдиопсида по составу отвечающие вкрапленникам клинопироксена анкарамитов и небольшие фрагменты анкарамитов. В приконтактной зоне анкарамитов на контакте с трахиандезитами наблюдаются ксенокристаллы амфибола, по составу отвечающие таковым трахиандезитов. Это свидетельствует в пользу того, что наблюдаемый контакт между анкарамитом и трахиандезитом – контакт двух одновременно существующих расплавов. Проведенное изучение составов основных масс в анкарамитах и трахиандезитах подтвердило это предположение (Готтман, Пушкарев, 2017). Содержания петрогенных компонентов в основных массах двух контактирующих пород закономерно изменяются, стремясь навстречу друг другу, что можно объяснить моделью двухкомпонентного смешения. Установленное аномальное повышение калия в зоне контакта обусловлено диффузным механизмом кислотно-основного взаимодействия пород контрастного состава.

Проведенные исследования вулканогенных комплексов ириндыкской свиты в Магнитогорской островодужной зоне Южного Урала позволили установить факт смещения различных по составу расплавов (анкарамитового и трахиандезитового), и факт одновременного извержения и смешения контрастных по составу расплавов (анкарамитового и трахиандезитового) – это доказывает одновременное сосуществование разных по составу расплавов и возможность образования пород промежуточного состава за счет смешения этих расплавов в промежуточных магматических камерах.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы № г/р АААА-А18-118052590029-6; аналитические данные получены в ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН.

Литература:

- Готтман И.А., Пушкарев Е.В. (2017) Структурно-вещественные доказательства взаимодействия анкарамитового и трахиандезитового расплавов в Магнитогорской вулканогенной зоне на Южном Урале. Ежегодник-2016. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН: 110–115.
- Пушкарев Е.В., Рязанцев А.В., Готтман И.А. и др. (2018) Анкарамиты – новый тип магнезиальных, высококальциевых примитивных расплавов в Магнитогорской островодужной зоне на Южном Урале. Доклады Академии наук. 479, (4): 433–43.
- Barsdell M., Berry, R. F. (1990) Origin and evolution of primitive island-arc ankaramites from Western Epi, Vanuatu. Journal of Petrology. 31: 747–777.
- Della-Pasqua F. N., Varne R. (1997) Primitive ankaramitic magmas in volcanic arcs: a melt-inclusion approach. The Canadian Mineralogist. 35: 291–312.

Петрология ксенолитов мафических гранулитов из кимберлитовых трубок Юбилейная и Комсомольская, Якутия

Григорьева В.М.¹, Перчук А.Л.^{1,2}

¹Кафедра петрологии и вулканологии, геологический факультет МГУ, Москва griva02@gmail.com; ²ИЭМ РАН им. Д.С. Коржинского, Черноголовка

Наиболее древние участки континентальной коры расположены в пределах архейских и палеопротерозойских кратонов. Нижняя кора сложена преимущественно амфиболитами и гранулитами. Изучение нижнекоровых пород, вынесенных кимберлитовыми расплавами на поверхность, может помочь в реконструкции механизма образования континентальной коры. В данной работе приводятся результаты детальных петрологических исследований двух образцов мафических гранулитов из ксенолитов в малоизученных кимберлитовых трубках Комсомольская и Юбилейная, расположенных в Алакит-Мархинском поле Анабарской провинции Сибирского кратона.

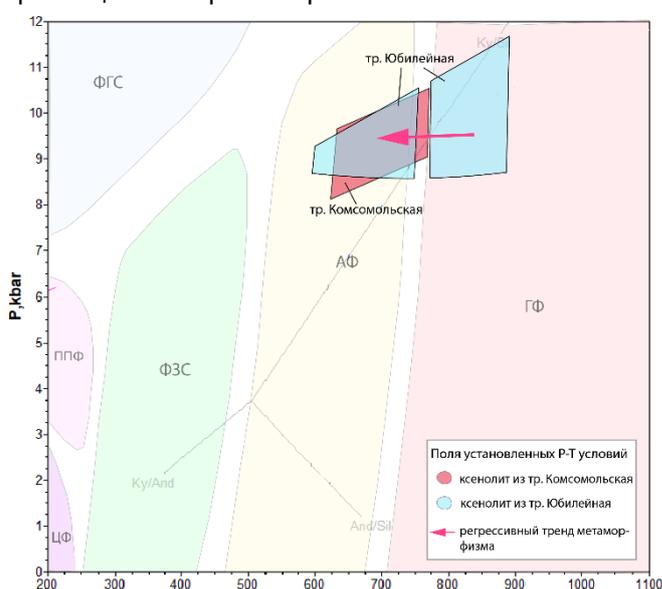


Рис. 1. P-T условия метаморфизма для гранулитов из тр. Комсомольская и Юбилейная по результатам геотермобарометрии. На диаграмме показаны поля фаций метаморфизма.

590°C при давлении 8.6-11.6 кбар. Отметим, что регрессивный P-T тренд метаморфизма установлен по минеральным равновесиям породообразующих минералов для ксенолитов Сибирского кратона впервые. Он подтверждает основную гипотезу образования нижнекоровых гранулитов вследствие охлаждения и метаморфического преобразования базитовых андерплейтов. Установленные P-T параметры соответствуют условиям амфиболитовой фации и низов гранулитовой фации и согласуются с литературными данными (Shatsky et al., 2016).

Для каждого образца с использованием эффективного состава проведено моделирование фазовых равновесий в программе Perple_X. В результате получены поля устойчивости парагенезисов, соответствующих исследуемым породам, которые хорошо согласуются с интервалами P-T условий, установленных методом геотермобарометрии.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-17-00206-П. Авторы благодарны академику В.С. Шацкому за предоставленные образцы для исследований.

Литература:

Shatsky V.S. et al. (2016) Tectonothermal evolution of the continental crust beneath the Yakutian diamondiferous province (Siberian craton): U–Pb and Hf isotopic evidence on zircons from crustal xenoliths of kimberlite pipes. *Precambrian Research* 282: 1–20.

Механизм формирования ЭПГ-оруденения контактового типа в Мончегорском расслоенном комплексе

Грошев Н.Ю.¹, Карыковский Б.Т.², Майер В.Д.³, Припачкин П.В.¹,
Барнс С.-Д.⁴, Савард Д.⁴

¹Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты nikolaygroshv@gmail.com;

²Фольксваген, Берлин bkarykowski@yahoo.com;

³Университет Кардиффа MaierW@cardiff.ac.uk;

⁴Университет Квебека в Шикутими sjbarnes@uqac.ca

Расслоенные интрузии являются одной из главных целей для разведки металлов, поскольку они содержат основную часть мировых запасов элементов платиновой группы (ЭПГ), хрома и ванадия. Почти все промышленные месторождения ЭПГ приурочены к протяженным по латерали, но маломощным рифам во внутренних частях интрузий. Единственным интенсивно эксплуатирующимся месторождением ЭПГ, которое не относится к рифам, является «Платриф» в комплексе Бушвельд (ЮАР). В отличие от минерализации рифового типа, это месторождение характеризуется относительно мощной толщей минерализованных мафических пород вдоль базального контакта интрузии, поэтому их относят к «контактовому типу». Фактически, большинство крупных расслоенных интрузий содержат минерализацию контактового типа различной мощности и варьирующими концентрациями металлов. Самыми богатыми из них являются комплекс Портимо (Финляндия), комплекс Ист-Булл-Лейк (Канада) и Федорово-Панский комплекс (Россия).

Еще один пример значительной ЭПГ-минерализации контактового типа установлен в одной из крупнейших расслоенных интрузий в Европе – в Мончегорском комплексе на северо-западе России. Комплекс относится к группе палеопротерозойских расслоенных интрузий Фенноскандинавского щита и включает как минимум две интрузии площадью около 550 км²: преимущественно ультраосновной массив Мончеплутон и основной массив Главного хребта.

Мончеплутон имеет подковообразную форму и состоит из шести субмассивов, образующих две ветви: (1) ультрамафитовая ветвь (около 7 км в длину), именуемая «массивом НКТ» от названий гор Ниттис, Кумужья и Травяная; и (2) мафит-ультрамафитовая ветвь, которая немного длиннее 9 км и состоит из гор Сопча, Нюд и Поаз. Разведка в этом районе в настоящее время сосредоточена на ЭПГ-минерализации, связанной с контактом между породами комплекса и архейским фундаментом.

Оруденение представляет собой мелкую интерстициальную сульфидную вкрапленность, составляющую от 5 до 7 об.%, развитую в разных типах пород: от дунитов и гарцбургитов до ортопироксенов и меланоритов. Буровые работы показывают, что этот тип оруденения прослеживается на всем протяжении массива НКТ, а также на участках Сопча, Нюд и Поаз. Как правило, минерализованные породы демонстрируют сильное обогащение Pd по сравнению с Pt, которое достигает 3-4 ppm Pt + Pd при отношении Pt/Pd < 0.3. Характерно, что практически все ультрамафитовые породы Мончеплутона содержат кумулятивные сульфиды (>20 ppb Pt + Pd), что указывает на кристаллизацию из насыщенной серой магмы. Единственное различие между минерализованными и неминерализованными разрезами заключается в модальном содержании сульфидов, в то время как содержания ЭПГ в 100% сульфиде изменяются слабо (от 50 до 100 ppm Pd). Таким образом, качество оруденения контролируется, прежде всего, физическим накоплением сульфидной жидкости в основании интрузии, а не более высоким R-фактором.

Детальные петрографические и геохимические данные (Karykowski et al., 2018) позволяют предположить, что взаимодействие магмы с вмещающими породами вызвало плавление последних с последующей дегидратацией и привнесом H₂O в кумулятивную кашу. Это привело к локальному плавлению кумулюсных минералов и увеличению пористости каши, способствовавшим накоплению сульфидной жидкости вблизи дна интрузии.

Литература:

Karykowski B.T., Maier W.D., Groshev N.Y., Barnes S.J., Pripachkin P.V., McDonald I., Savard D. (2018) Critical controls on the formation of contact-style PGE-Ni-Cu mineralization: Evidence from the Paleoproterozoic Monchegorsk Complex, Kola Region, Russia. *Economic Geology*, 113(4): 911–935. <https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4576>

Происхождение и эволюция алмазогенерирующих флюидов/расплавов в мантии Сибирского кратона по данным изучения микровключений в алмазах в "оболочках"

Губанов Н.В.^{1,2}, Зедгенизов Д.А.²

¹ИГМ СО РАН, Новосибирск gubanovnv@igm.nsc.ru; ²ИГГ УрО РАН, Екатеринбург

Алмаз является уникальным минералом, предоставляющим обширную информацию о составе и термодинамических условиях глубинных частей континентальной литосферы Земли. Его устойчивость к внешним процессам химического растворения и физического разрушения обуславливают исключительную сохранность захваченного им материала. Многочисленные минеральные включения свидетельствуют о том, что образование алмаза происходит в основании литосферной мантии в эклогитовых и перидотитовых субстратах при давлениях 4-7 ГПа и температурах 950-1400°C (Sobolev, 1977). По имеющимся представлениям его формирование связано с метасоматическими событиями, протекающими при активном участии флюидов/расплавов, взаимодействующих с мантийными породами (Zedgenizov et al., 2018). Микровключения дочерних полифазных ассоциаций таких флюидов/расплавов концентрируются в специфических разновидностях алмазов, имеющих волокнистое внутреннее строение, к которым относятся в том числе алмазы в «оболочке» или алмазы IV разновидности (Орлов, 1984). Алмазы в «оболочке» состоят из гетерогенного октаэдрического ядра ранней генерации и волокнистой «оболочки», насыщенной многочисленными микровключениями алмазогенерирующих флюидов/расплавов. Изучение микровключений и дефектно-примесных характеристик было проведено для 155 алмазов из кимберлитов Сибирской платформы.

Полученные данные по степени агрегации азотных дефектов в алмазах в «оболочке» свидетельствуют о том, что образование «оболочек» происходило со значительным разрывом во времени относительно формирования ядер. В «оболочках» фиксируются как А азотные дефектные центры, так и наиболее низкоагрегированные С-дефекты. Используя кинетические параметры для высокотемпературного перехода С- в А-дефекты было установлено, что при температуре 1400°C отжиг «оболочек» происходил в интервале от 2 до 10 лет (Taylor et al., 1996), что указывает на их формирование незадолго до выноса на поверхность кимберлитовым расплавом. Образование волокнистых «оболочек» алмазов в литосферной мантии Сибирского кратона связано с высоко-Мг существенно карбонатными и низко-Мг карбонатно-силикатными флюидами/расплавами. Минеральные включения в ядрах указывают на то, что низко-Мг карбонатно-силикатные микровключения генетически взаимосвязаны с эклогитами (Е-тип), тогда как высоко-Мг существенно карбонатные генерируются в перидотитах (Р-тип). Редкоэлементный состав низко-Мг карбонатно-силикатных микровключений характеризуется значительным обеднением по Ti, Nb и Ta, в то время как микровключения высоко-Мг существенно карбонатного состава демонстрируют более пологий тип распределения и наиболее близки к кимберлитам (Kamenetsky et al., 2012). Эволюция состава микровключений, отмеченная в «оболочках» некоторых алмазов и направленная от более силикатных составов в сторону более карбонатных, может быть обусловлена смешением контрастных по составу флюидов/расплавов в области их миграции при протекающем процессе взаимодействия с вмещающими мантийными породами.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-05-00338).

Литература:

- Орлов Ю.Л. (1984) Минералогия алмаза. М.: Наука. 264 с.
Taylor W.R., Canil D., Millenidge H.J. (1996) Kinetics of Ib to IaA nitrogen aggregation in diamond. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60: 4725–4733.
Sobolev N.V. (1977) Deep-Seated Inclusions in Kimberlites and the Problem of the Composition of the Upper Mantle. American Geophysical Union, Washington, D.C. 279 p.
Kamenetsky V.S., Kamenetsky M.B., Golovin A.V., Sharygin V.V., Maas R. (2012) Ultrafresh salty kimberlite of the Udachnaya-East pipe (Yakutia, Russia): A petrological oddity or fortuitous discovery? *Lithos* 152: 173–186.
Zedgenizov D.A., Ragozin A.L., Shatsky V.S., Griffin W.L. (2018) Diamond formation during metasomatism of mantle eclogite by chloride-carbonate melt. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 173: 84–100.

Термобарометрия коэсита из алмазов и эклогитов

Губанов Н.В.^{1,2}, Михайленко Д.С.¹

¹ИГМ СО РАН, Новосибирск gubanovnv@igm.nsc.ru;

²ИГГ УрО РАН, Екатеринбург

Эклогиты являются важным компонентом литосферной мантии древних кратонов и многих высокобарических метаморфических комплексов. Термобарометрические расчеты равновесных ассоциаций эклогитов имеют ключевое значение для понимания мощности, структуры, термической и тектонической эволюции литосферы. На сегодняшний день существует множество геобарометров и геотермометров мантийных пород, базирующихся, главным образом, на изучении порообразующих минералов – оливина, ортопироксена, граната и клинопироксена (напр., Brey and Köhler, 1990; Nakamura, 2009). Однако одной из серьезных проблем при расчете P-T условий для ксенолитов эклогитов из кимберлитов остается высокая степень вторичных изменений первичных порообразующих минералов, в первую очередь омфацита, что ограничивает возможность определения P-T условий стандартными геотермобарометрами. Алмазы, встречающиеся в эклогитах, способны захватывать первичные минеральные включения и препятствовать процессам их вторичного изменения, однако, алмазы редко содержат одновременно несколько минеральных фаз, позволяющих провести реконструкцию P-T условий материнских субстратов с использованием классических геотермобарометров.

Коэсит является полиморфной модификацией SiO₂ и, наряду с алмазом, является индикатором высокобарических условий минералообразования (Sobolev et al., 2000). Ti в коэсите является надежным мономинеральным термобарометром, позволяющим рассчитать термодинамические условия конечного равновесия пород при одном известном параметре (P или T) (Osborne et al., 2019). В тоже время, этот метод по-прежнему широко не применялся для ксенолитов эклогитов из кимберлитов и включений в алмазах. Определение содержания титана в коэсите/кварце было осуществлено для 25 образцов эклогитов (187 анализов), а также для 17 алмазов эклогитового парагенезиса, содержащих коэсит в виде включений. Концентрации титана в коэсите в изученных эклогитах варьируют от предела обнаружения (9 ppm) и до 87 ppm. При этом концентрации Ti как в коэсите, так и в окружающем его кварце одинаковые. Рассчитанные P-T условия на основании содержания Ti соответствуют диапазону 4.3-6.2 ГПа и 940-1350°C. Мономинеральный термометр титан в коэсите/кварце демонстрирует большую сходимость полученных результатов с классическим гранат-пироксеновым термометром Накамуры (Nakamura, 2009). Расчетные значения температуры и давления хорошо коррелируют с косвенными химическими признаками высокобарического происхождения породы – концентрациями Na₂O в гранате и K₂O в омфаците, а также с концентрациями TiO₂ в гранате и клинопироксене. Диапазон концентраций Ti во включениях коэсита в алмазе ограничен значениями 44 ppm и 122 ppm. При этом разные зерна в пределах одного образца не демонстрируют значительных вариаций в содержании Ti. Рассчитанные P-T условия для включений коэсита в алмазе ограничены 4-7 ГПа и 970-1450°C, что соответствует известному полю стабильности алмаза (Sobolev, 1977).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 21-77-10006).

Литература:

- Brey G.P., Köhler T. (1990) Geothermobarometry in four-phase Lherzolites II. New thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers. *Journal of Petrology* 31: 1353–1378.
- Nakamura D. (2009) A new formulation of garnet–clinopyroxene geothermometer based on accumulation and statistical analysis of a large experimental data set. *Journal of Metamorphic Geology* 27(7): 495–508.
- Osborne Z.R., Thomas J.B., Nachlas W.O., Baldwin S.L., Holycross M.E., Spear F.S., Watson E.B. (2019) An experimentally calibrated thermobarometric solubility model for titanium in coesite (Titanic). *Contributions to Mineralogy and Petrology* 174(4): 1–13.
- Sobolev N.V. (1977) Deep-Seated Inclusions in Kimberlites and the Problem of the Composition of the Upper Mantle. American Geophysical Union, Washington, D.C. 279 p.
- Sobolev N.V., Fursenko B., Goryainov S., Shu J., Hemley R., Mao A., Boyd F.R. (2000) Fossilized high pressure from the Earth's deep interior: The coesite-in-diamond barometer. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 97: 11875–11879.

Деформации циркона и апатита из импактного кратера Вредефорт по данным EBSD-анализа

Давлетшина А.А.¹, Замятин Д.А.¹, Ковалева Е.И.², Чебыкин Н.С.¹

¹ИГГ УрО РАН, Екатеринбург *alina.davletshina.2000@gmail.com*;

²University of the Western Cape, Bellville, *ekovaleva@uwc.ac.za*

Метеоритный кратер Вредефорт (ЮАР) является крупнейшей и одной из древнейших импактных структур нашей планеты и имеет возраст ок. 2020 млн лет. Деформационные структуры в аксессуарных минералах являются индикаторами импактных давлений (до 60 ГПа) и температур (до 3000°C). Настоящая работа посвящена исследованию деформаций в зернах циркона и апатита из образца импактной структуры Вредефорт (ЮАР) методом дифракции отраженных электронов (SEM-EBSD).

Исследован петрографический шлиф Les04b фрагмента импактного расплава с контакта дайки импактного расплава Лесотоскрааль и вмещающих гранитоидов. Регистрация BSE-, FSE-изображений и EBSD-карт выполнялась на сканирующем электронном микроскопе Tescan MIRA LMS, оснащенный приставками Oxford Instruments EDS X-max80 и EBSD Nordlys Nano. EBSD-данные обрабатывались в программе Channel 5.

Диагностированы сросшиеся зерна циркона и апатита с планарными деформациями (planar microstructures). Зерно циркона обладает концентрической зональностью, метамиктным ядром и разбито сдвиговыми деформациями (рис. 1а), секущими внутренними зонами. Параллельно направлению сдвига проявляется два набора полисинтетических микродвойников (microtwins) с разориентацией около 65° относительно зерна циркона (рис. 1в), которые секутся третьей группой микродвойников (рис. 1г). Вмещающее зерно циркона обладает блочным строением и внутренними разориентировками до 15° (рис. 1б). Предположительно, присутствие микродвойников указывает на достижение ударных давлений до 20 ГПа (Moser et al., 2011).

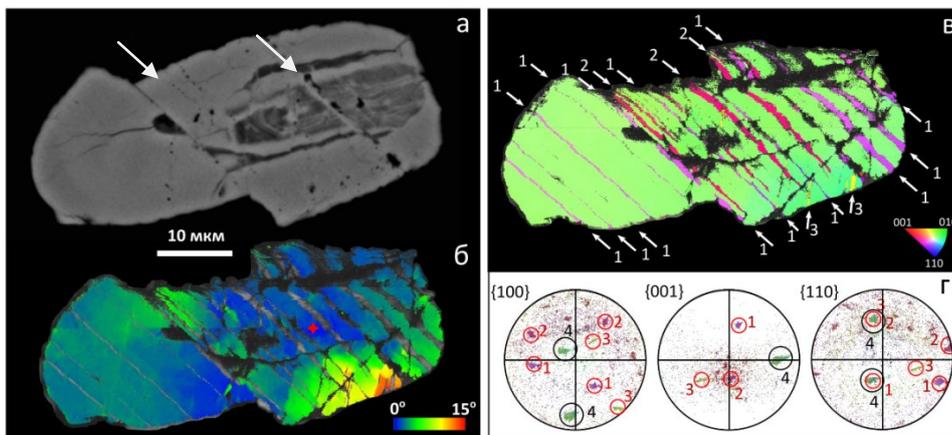


Рис. 1. Циркон с микродеформациями Les04b кратера Вредефорт. (а) – BSE-изображение; стрелки указывают направление сдвиговых деформаций; (б) – карта отклонения ориентации во вмещающем цирконе относительно произвольно выбранного пикселя (красный крестик), где от синего до красного – 15°; микродвойники не окрашены; (в) – карта ориентаций циркона, цветовая кодировка задана обратной полюсной фигурой; стрелками 1, 2, 3 показаны серии микродвойников. (г) – полюсные фигуры, показывающие ориентации осей вмещающего зерна циркона (4) и микродвойников в нем (1, 2, 3 – соответствующие серии микродвойников, обозначены красным).

Работа выполнена в ЦКП УрО РАН «Геоаналитик» и поддержана Российским Научным Фондом, проект № 21-77-10019, <https://rscf.ru/project/21-77-10019/>.

Литература:

Moser D.E. et al. (2011) New zircon shock phenomena and their use for dating and reconstruction of large impact structures revealed by electron nanobeam (EBSD, CL, EDS) and isotopic U–Pb and (U–Th)/He analysis of the Vredefort dome. Canadian Journal of Earth Sciences 48: 117–139.

Эволюция магматической системы вулкана Безымянный перед извержением 20 декабря 2017 г.

Давыдова В.О.¹, Щербаков В.Д.¹, Плечов П.Ю.^{1,2}, Кулаков И.Ю.³

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, Москва vestadav@gmail.com; ² Минералогический Музей им. А.Е. Ферсмана, Москва; ³Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск

Мы использовали петрологические данные по образцам извержения вулкана Безымянный 20 декабря 2017 г. (Камчатка, Россия) для изучения эволюции магматической системы в период покоя и последующей реактивации вулкана. Продукты извержения разнообразны по валовому химическому составу и составу стекол, но сходны по набору вкрапленников, составу и зональности. Три типа пород различаются по наличию или отсутствию фазы кремнезёма (кристобалит или тридимит). Породы без собственных фаз кремнезёма (SiO_2 ~ 55-56 масс.%) имеют преимущественно стекловатую основную массу с редкими микролитами в стекле дацитового состава (65.5-70.5 масс.% SiO_2 и 2.5-3.5 масс.% K_2O). Кристобалит-содержащие породы (~56.6-57.5 масс.% SiO_2) характеризуются сильно раскристаллизованной основной массой с большим количеством мелких микролитов и интерстициальным стеклом риолитового состава (76.5-78 масс.% SiO_2 и 3.8-4.2 масс.% K_2O). Тридимит-содержащие породы (~58.8 масс.% SiO_2) характеризуются стекловатой основной массой с редкими микролитами в риолитовом стекле (77-77.5 масс.% SiO_2 и ~3.6 масс.% K_2O).

Масс-балансовые расчеты показывают, что магмы, содержащие фазы кремнезёма, могут быть получены путем 15% фракционирования из магмы без SiO_2 -фаз. MELTS-моделирование и минеральная геотермобарометрия показывают, что породы с собственными фазами кремнезёма последний раз уравнивались в условиях низкого давления (~15 МПа), соответствующих глубине подводного канала, а породы без SiO_2 -фаз – при более высоком давлении (>40-60 МПа).

На основании полученных петрологических данных мы предложили следующую модель эволюции магматической системы (Davydova et al., 2022). На протяжении периода покоя магма в приповерхностном очаге фракционировала, расплав и флюид постепенно поднимались и аккумулировались в его верхней части. Реактивация магматической системы вызвала выталкивание дифференцированной магмы из верхнего магматического очага в подводный канал, где началась кристаллизация фаз кремнезёма. Мы предполагаем, что породы, содержащие кристобалит, являются остатками пробки, тогда как породы, содержащие тридимит, представляют собой магму, захваченную в канале под пробкой. Возобновление эксплозивной активности в декабре 2017 г. было вызвано поступлением магмы из более глубоких горизонтов магматической системы незадолго до взрыва, что подтверждается наличием амфибол-содержащих мафических включений среднекорового происхождения (520-850 МПа).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-05-00101

Литература:

Davydova V.O., Shcherbakov V.D., Plechov P.Y., Koulakov I.Y. (2022) Petrological evidence of rapid evolution of the magma plumbing system of Bezymianny volcano in Kamchatka before the December 20th, 2017 eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 421: 107422.

Экспериментальные свидетельства совместного переноса силикатного и рудного вещества при метаморфизме сульфидных руд

**Дамдинов Б.Б.¹, Котельников А.Р.², Сук Н.И.², Дамдинова Л.Б.¹,
Ахмеджанова Г.М.²**

¹ГИН СО РАН, Улан-Удэ damdinov@mail.ru;

²ИЭМ РАН, Черноголовка kotelnik@iem.ac.ru

В связи с проблемой возможности метаморфогенного формирования рудных месторождений, проведено экспериментальное моделирование метаморфизма субмаринных сульфидных руд (отложений «черных курильщиков») в присутствии базальтового стекла и флюидной фазы, представленной водно-солевыми системами разного состава. Эксперименты проводились при P-T параметрах, близких к ранее определенным для природных парагенезисов метаморфизованных «черных курильщиков» – T = 500 ÷ 650°C, давление ~4-5 кбар (Дамдинов и др., 2019). Для опытов использовали базальтовое стекло (восточно-тихоокеанское поднятие, обр. VTP-014) и сульфидную руду «черного курильщика» (гидротермальное поле Рейнбоу, обр. 3894-9-2), в составе которой преобладает сфалерит, также присутствуют кубанит, миллерит, мараказит, пирит.

Для изучения транспорта рудного вещества была применена методика градиентных опытов, в которых транспорт вещества осуществляется от более нагретой нижней части ампулы в верхнюю, более холодную. В работах Д.С. Коржинского (Коржинский, 1982) было теоретически предсказано, что транспорт рудного вещества осуществляется во флюидах повышенной щелочности. Кроме того, известно, что перенос рудообразующих элементов при формировании полиметаллических месторождений типа MVT происходит в составе высококонцентрированных рассолов (Leach et al., 2017). В связи с этим, в качестве флюидной фазы использованы высококонцентрированные (до 35-42 масс.% общей солености) водно-солевые смеси, в составе которых присутствовали хлориды, карбонаты щелочных металлов, хлористый аммоний, а также щелочи (NaOH и KOH). В ряде опытов в исходную шихту добавлялись сфалерит, халькопирит и небольшие количества углерода (графит) и элементарной серы. Опыты проводили при температурах 580-680°C, температурный градиент составлял 30 и 40°C, давление – 4-5 кбар.

Результаты опытов показали, что рудное вещество, вместе с силикатным активно транспортируется в верхнюю часть ампулы. За 14 суток при указанных выше параметрах в верхнюю часть переносится приблизительно до 40% исходной шихты. В верхней части ампул встречены сростки минеральных агрегатов силикатного материала (кварц, калиевый полевоид шпат) и сульфидного вещества. Это предполагает одновременный перенос как силикатного, так и рудного вещества. Транспортная среда, скорее всего, была гетерофазной – в пользу этого свидетельствуют шарики силикатного вещества и «капли» сульфидов. Следует отметить, что чаще всего мы наблюдали простой перенос и кристаллизацию в верхней, более холодной части ампулы того же рудного вещества, которое было в загрузке. В то же время силикатный материал шихты (базальтовое стекло) претерпевал процесс раскристаллизации и последующего переноса с изменением состава твердых растворов.

Таким образом, по результатам наших опытов можно сделать вывод об успешном моделировании транспорта рудообразующих элементов метаморфогенными водно-солевыми флюидами, причем экспериментально установлена совместная миграция силикатного и рудного вещества.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФ, грант № 22-17-00106

Литература:

- Дамдинов Б.Б., Дамдинова Л.Б., Жмодик С.М., Миронов А.Г. (2019) Состав и условия формирования золотоносных пирротиновых руд Восточного Саяна (на примере рудопроявления Ольгинское). Геология и геофизика 60(5): 666–687.
- Коржинский Д.С. (1982) Теория метасоматической зональности. М.: Наука. 103 с.
- Leach D.L., Song Yu.-C., Hou Z.-Q. (2017) The world-class Jinding Zn-Pb deposit: ore formation in an evaporite dome, Lanping Basin, Yunnan, China. Mineralium Deposita 52: 281–296.

Результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования и условия формирования миларит-бавенит-флюоритовых руд Ермаковского F-Be месторождения (Западное Забайкалье)

Дамдинова Л.Б.¹, Дамдинов Б.Б.¹, Юдин Д.С.²

¹ГИН СО РАН, Улан-Удэ ludamdinova@mail.ru;

²ИГМ СО РАН, Новосибирск dsyudin@gmail.com

Ермаковское F-Be месторождение, расположенное в Западном Забайкалье, – крупнейшее в России и в мире месторождение бериллия, которое выделяется среди подобных самым высоким средним содержанием BeO (1.3%), где главные руды представлены апоизвестняковыми фенакит-бертрандит-флюоритовыми метасоматитами. Вместе с тем, руды месторождения весьма многообразны по своему облику, составу и содержанию Be (Куприянова и др., 2009). Одним из примеров является малоизученная XVII рудная зона, расположенная в центральной части месторождения и приуроченная к скарнам, развитым по метапесчаникам и габбро-диоритам. Зона отличается от основных рудных зон относительно низким содержанием Be и специфическим минеральным составом оруденения, где развиты миларит-бавенит-флюоритовые руды в ассоциации с микроклином, альбитом, кальцитом, флогопитом, литиевыми слюдами (тайниолит), щелочным амфиболом (рихтерит) и др. Особенности минерального состава этой зоны свидетельствуют о повышенной щелочности рудообразующих растворов.

Происхождение бериллиевого оруденения Ермаковского месторождения связывается со штоком лейкократовых эгиринсодержащих субщелочных гранитов (Рейф, 2008), возраст которых соответствует 224-226 млн лет. Известные датировки руд имеют значения в интервале 225.5-219 млн лет и близки к возрасту рудогенерирующих гранитов (Лыхин, Ярмолюк, 2015). Для уточнения возраста руд XVII рудной зоны, впервые было проведено $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирование непосредственно по бериллиевому минералу – милариту, калийсодержащему водному силикату Be ($\text{KCa}_2(\text{Be}_2\text{AlSi}_{12}\text{O}_{30}) \cdot x\text{H}_2\text{O}$). В возрастном спектре миларита выделяется устойчивое плато с возрастом 182.5 ± 3.0 млн лет. Результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования позволяют сделать вывод, что процессы минералообразования происходили в течение достаточно длительного периода в промежутке 225-170 млн лет назад.

Термобарогеохимическими методами были изучены первичные флюидные включения (ФВ) из флюорита, которые имеют трехфазовый состав ($L > G = S$), а также двухфазовые ($L > G$) включения из миларита и кальцита. Твердая фаза ФВ из флюорита по данным раман-спектроскопии представлена кальцитом. Результаты показали, что руды XVII зоны сформировались в диапазоне температур ≥ 303 -200°C из растворов с общей соленостью ~10.1-2.6 масс.% экв. NaCl. Основные солевые компоненты – фториды с примесью хлоридов Na, K, Ca, давления более 3 кбар. Рассмотрение главных факторов, влиявших на осаждение Be, проведено с использованием экспериментальных данных Вуда (Wood, 1992). Относительно низкое содержание Be в рудах обусловлено спецификой вмещающих пород (скарны, а не известняки), а также повышенной щелочностью и низким содержанием углекислоты в рудообразующих растворах.

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект ГИН СО РАН № АААА-А21-121011390003-9).

Литература :

- Рейф Ф.Г. (2008) Щелочные граниты и бериллиевое (фенакит-бертрандитовое) оруденение на примере Оротского и Ермаковского месторождений. Геохимия 3: 243–263.
- Куприянова И.И., Шпанов Е.П., Гальченко В.И. (2009) Ермаковское флюорит-бериллиевое месторождение (Западное Забайкалье, Россия). М.: ВИМС. 309 с.
- Лыхин Д.В., Ярмолюк В.В. (2015) Западно-Забайкальская бериллиевая провинция: месторождения, рудоносный магматизм, источники вещества. М.: ИГЕМ РАН, ГЕОС. 256 с
- Wood S.A. (1992) Theoretical prediction of speciation and solubility of beryllium in hydrothermal solutions to 300°C at saturated vapor pressure: Application to bertrandite/phenakite deposits. Ore geology reviews 7: 249–278.

Кристаллическая структура галотрихита $\text{FeAl}_2(\text{SO}_4)_4(\text{H}_2\text{O})_{22}$

Житова Е.С.¹, Исмагилова Р.М.², Золотарев А.А.², Нуждаев А.А.¹

¹*ИВУС ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский zhitova_es@mail.ru;*

²*СПбГУ, Санкт-Петербург rezeda.m.ismagilova@gmail.com*

Минералы группы галотрихита являются распространенными образованиями на поверхности термальных полей, площадок, характеризующихся фузарольной активностью, и, в целом, пород, подвергнутых процессам природного или техногенного кислотного выщелачивания. Галотрихит и родственные ему минералы зачастую образуют тонкие изогнутые кристаллы. По всей видимости, по этой причине кристаллическая структура галотрихита была определена и уточнена только на образце из Речск (горы Матра, Венгрия) в 1986 году (Lovas, 1986), несмотря на широкую распространённость минерала в мире. Для данного галотрихита приводится пространственная группа $P2_1/n$, $a = 6.1954(7) \text{ \AA}$, $b = 24.262(3) \text{ \AA}$, $c = 21.262(2) \text{ \AA}$, $\alpha = 90^\circ$, $\beta = 100.30(1)^\circ$, $\gamma = 90^\circ$, $V = 3144.45 \text{ \AA}^3$, $Z = 4$.

В ходе наших предыдущих работ по исследованию разнообразия минералов-выцветов с поверхности термальных полей Камчатки (связанных с Мутновским и Кошелевским вулканом, Камчатка, Россия) было установлено, что галотрихит является распространенным для них минералом. Также стоит отметить, что обширные проявления галотрихита фиксировались на поверхности обвалных отложений из кратера вулкана Жупановский (Камчатка) (Назарова и др., 2020).

В работе проводилось исследование кристаллов галотрихита с термальных полей Камчатки с помощью монокристалльного рентгеновского дифрактометра Rigaku XtaLAB Synergy-S, MoK α (Ресурсный центр «Рентгенодифракционные методы исследования» СПбГУ). Подавляющее количество образцов продуцировало дифракционную картину неприемлемого для обработки качества, однако в образцах с Верхне-Кошелевского термального поля были обнаружены прозрачные удлиненные кристаллы галотрихита, продуцировавшие дифракционную картину весьма высокого качества. С данного кристалла был собран полный массив рентгенодифракционных данных для дальнейшего определения и уточнения кристаллической структуры.

Кристаллическая структура галотрихита уточнена до (фактора расходимости) $R_1 = 0.0503$ для 5538 независимых рефлексов с интенсивностью $F_o > 4\text{sig}(F_o)$. Галотрихит кристаллизуется в моноклинной пространственной группе $P2_1/n$, $a = 6.1947(2) \text{ \AA}$, $b = 24.2966(8) \text{ \AA}$, $c = 21.0593(8) \text{ \AA}$, $\alpha = 90^\circ$, $\beta = 96.512(4)^\circ$, $\gamma = 90^\circ$, $V = 3149.19(19) \text{ \AA}^3$, $Z = 4$. Основной мотив кристаллической структуры галотрихита (согласно нашему уточнению) схож с ранее опубликованными данными для галотрихита из Венгрии. Однако наше определение кристаллической структуры более детальное, поскольку впервые определены координаты и параметры смещения шести атомов водорода, относящихся к молекулам воды, заселенности позиций металлов и молекул воды, проведено определение как эквивалентных, так и анизотропных смещений большинства атомов. В работе будет приведено детальное кристаллохимическое сравнение нашей и ранее полученной структурной модели.

Исследование выполнено в рамках Гранта Президента РФ для молодых кандидатов наук МК-451.2022.1.5.

Литература:

Lovas G.A. (1986). Structural study of halotrichite from Recsk (Matra Mts., N-Hungary). Acta Geol. Hungarica 29: 389–398.

Назарова М.А., Горбач Н.В., Житова Е.С. (2020). Минеральный состав обвалных отложений и новообразований вулкана Жупановский (Камчатка, Россия). Материалы XII Международной школы по наукам о Земле имени профессора Л.Л. Перчука (ISES-2020): 35.

Перспективы развития метода КОЗ Potential of “KOZ” Global Seismic Risk Chart

**Завьялов А.Д., Морозов А.Н., Алёшин И.М., Иванов С.Д., Холодков К.И.,
Павленко В.А.**

ИФЗ РАН, Москва keir@ifz.ru

В докладе обобщены результаты применения метода среднесрочного прогноза землетрясений «Карта ожидаемых землетрясений» (КОЗ). За последние 35 лет метод КОЗ был применён (Завьялов, 2021) в сейсмоактивных районах всего мира, различных как по своим тектоническим условиям, так и сейсмическому режиму. Показано, что средняя прогностическая эффективность алгоритма в 2.5 раза выше, чем при случайном угадывании. При создании КОЗ была заложена возможность его дальнейшей модернизации и расширения функциональных возможностей. Новые способы в обработке данных, которые планируется внедрить в модернизированный КОЗ, позволят существенно увеличить объём анализируемой информации, учесть особенности протекания сейсмического процесса на разных глубинах, использовать в качестве стационарных прогностических признаков линейно-доменно-фокальные (ЛДФ) модели строения сейсмоактивных зон (Уломов и др., 2002) и строить трехмерные распределения вероятности возникновения сильных землетрясений. Перспективы развития КОЗ включают расширение списка используемых сейсмологических предвестников, имеющих физическое обоснование их связи с процессом подготовки землетрясения, а также разработку формализованных процедур выделения таких предвестников для прогностической практики.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00158, <https://rscf.ru/project/22-27-00158/>.

Литература:

- Завьялов А.Д.* (2021) Алгоритм КОЗ – 35 лет тестирования и последние результаты. Тезисы докладов II Всероссийской научной конференции с международным участием «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений». 29-30 сентября 2021 г. Москва: ИТПЗ РАН: 47–48.
- Уломов В.И., Полякова Т.П., Медведева Н.С.* (2002) О долгосрочном прогнозе сильных землетрясений в Центральной Азии и в Черноморско-Каспийском регионе. Физика Земли 4: 31–47.

Деформации и формирование рейдита в цирконе при плоском ударном эксперименте под давлениями 20-60 ГПа

Замятин Д.А.¹, Ковалева Е.И.²

¹ИГГ УрО РАН, Екатеринбург zamyatin@igg.uran.ru;

²University of the Western Cape, Bellville ekovaleva@uwc.ac.za

Определение давлений и температур в породах метеоритных кратеров необходимо для понимания механизмов формирования астроблем на раннем этапе формирования Земли. Циркон – широко используемый индикатор *РТ*-условий импактных процессов. Ударные воздействия вызывают деформации циркона, разложение на оксиды и фазовый переход в высокобарический полиморф циркона – рейдит. Настоящая работа посвящена исследованию деформаций и формирования рейдита в цирконе, испытавшем ударные воздействия.

Кристаллы циркона из Шри-Ланки и Австралии подверглись ударным лабораторным воздействиям под давлением 20, 40 и 60 ГПа (Leroux et al., 1999). BSE- и CL-изображения, карты ориентаций регистрировались на сканирующем электронном микроскопе Tescan Mira, оснащенный детектором дифракции отраженных электронов (EBSD) Oxford NordlysNano; КР-спектры и гиперкарты получены на КР-спектрометре Horiba LabRAM HR800 Evolution.

При плоском ударном эксперименте под давлениями 20 и 40 ГПа формируется существенная разориентация кристаллической структуры циркона (до 45°); а при 60 ГПа в цирконе образуется рейдит в виде ламелей и дендритовых структур (рис. 1в,д). Рейдит отличается от циркона низкой яркостью CL и высокой яркостью BSE (рис. 1а,б). Выделено четыре текстурных домена, сформированных при ударных давлениях в 60 ГПа в цирконе: (1) кристаллический циркон, (2) аморфный циркон, (3) ламели рейдита и (4) дендритовый рейдит в цирконе. Предположительно, эти текстуры представляют стадии ударного метаморфизма.

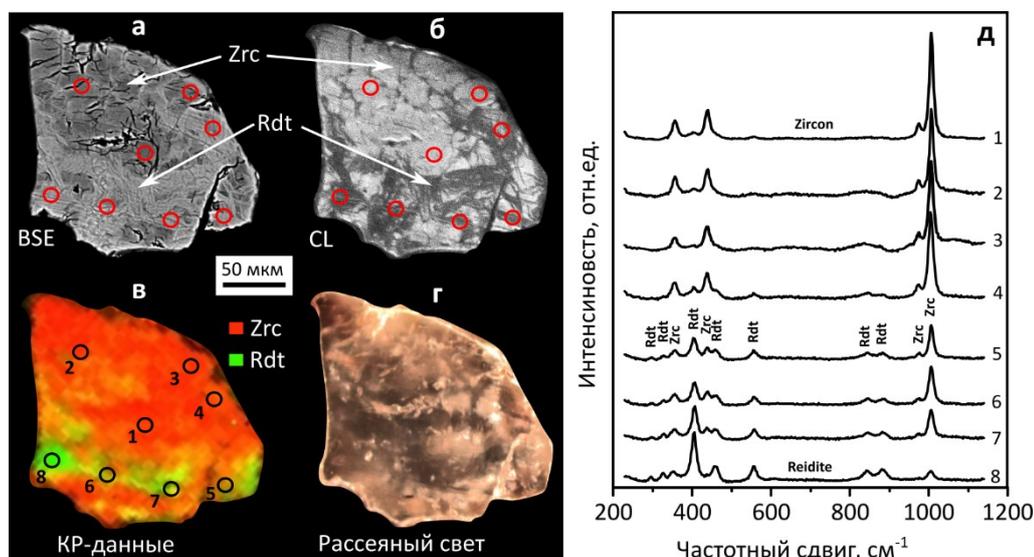


Рис. 1. Фрагмент циркона, испытавшего шоковые экспериментальные воздействия под давлением 60 ГПа. (а) – BSE-изображение, (б) – CL-изображение, (в) – фазовая карта по данным КР-спектроскопии (Zrc – циркон, Rdt – рейдит), (г) – изображение в рассеянном свете, (д) – КР-спектры в точках 1-8, приведенных на рисунке (в).

Работа выполнена в ЦКП УрО РАН «Геоаналитик» и поддержана Российским Научным Фондом, проект № 21-77-10019, <https://rscf.ru/project/21-77-10019/>. Дооснащение и развитие ЦКП «Геоаналитик» осуществляется при поддержке гранта Минобрнауки РФ, Соглашение № 075-15-2021-680. Образцы предоставил Leroux H., отполировал – Чебыкин Н.

Литература:

Leroux et al. (1999) Experimental shock deformation in zircon: A transmission electron microscopic study. *Earth Planet Sci Lett* 169: 291–301.

Глобулярный (ballen) кварц в импактной структуре Янисъярви (Карелия, Российская Федерация)

Замятина Д.А., Замятин Д.А., Михалевский Г.Б.

ИГГ УрО РАН, Екатеринбург d.zamyatina@gmail.com

При импактном воздействии целевые породы подвергаются высоким температурам и давлению. Кварц при давлении более 30 ГПа превращается в диаплектическое кварцевое стекло и при 50 ГПа в лешательерит (Stöffler et al., 2018). Глобулярный (ballen) кремнезем представляет собой сферический агрегат кварца и/или кристобалита, характерный для импактных пород. Он обнаружен во многих импактных структурах (например, Рис, Кара, Попигай, Чискулуб и др., см. обзор Ferrière et al., 2009). Модель образования глобулярных агрегатов на сегодняшний день остается дискуссионной. Существующие модели основаны на свидетельствах фазовых превращений кремнезема, таких как превращение лешательеритового или диаплектического кварцевого стекла в β -кварц и/или α -кристобалит и последующий переход в α -кварц (Carstens, 1975; Bischoff et al., 1984; Ferrière et al., 2009). Глобулярный кварц обычно представлен чистым кварцем и может содержать небольшие примеси между индивидуальными глобулами (Ferrière et al., 2009; Trepmann et al., 2020). Наше исследование направлено на детальное изучение глобулярных агрегатов из импактитов метеоритного кратера Янисъярви методами EPMA, EDS, BSE, EBSD с целью уточнения механизмов их формирования.

Импактная структура Янисъярви расположена в 25 км к северу от Ладожского озера (Карелия, Российская Федерация). Импактиты с мыса Леппяниеми и острова Хопеасаари представлены импактными расплавленными породами. Они состоят из санидина, кордиерита, плагиоклаза, кристобалита, тридимита, кварца и хлорита. В импактных расплавленных породах ballen-кварц присутствует в виде агрегатов, размером 2-3 см. Обнаружены два типа доменов: А и Б. Домены А имеют пористую структуру и практически не содержат примеси. Разориентации субзерен в индивидуальных глобулах доменов А ниже 1° . Индивидуальные глобулы доменов Б характеризуются микроблочным строением с разориентацией субзерен относительно друг друга на углы до 7° . Между микроблоками находятся примеси Fe, Al и Mg.

Появление глобулярных текстур связано с переходом кварца в лешательерит и последующими фазовыми переходами. Сделано предположение, что текстурные особенности доменов А и Б связаны с различной скоростью кристаллизации. В доменах Б под воздействием давления возникали пластические, а затем хрупкие деформации, либо при фазовых переходах из-за потери объема происходило их растрескивание на микроблоки. Микротрещины были заполнены хлоритом или другим Fe-Mg минералом. Вероятно, появление разориентаций микроблоков могло возникнуть при заполнении микротрещин хлоритом.

Работа выполнена в ЦКП УрО РАН «Геоаналитик» и поддержана Российским Научным Фондом, проект № 21-77-10019, <https://rscf.ru/project/21-77-10019/>. Дооснащение и развитие ЦКП «Геоаналитик» осуществляется при поддержке гранта Минобрнауки РФ, Соглашение № 075-15-2021-680.

Литература:

- Bischoff A., Stöffler D. (1984) Chemical and structural changes induced by thermal annealing of shocked feldspar inclusions in impact melt rocks from Lappajarvi crater, Finland. *J. Geophys. Res.* 89: 645–656.
- Carstens H. (1975) Thermal history of impact melt rocks in the Fennoscandian shield. *Contrib. Mineral. Petrol.* 50: 145–155.
- Ferrière L., Koeberl C., Reimold W.U. (2009) Characterisation of ballen quartz and cristobalite in impact breccias: New observations and constraints on ballen formation. *Eur. J. Mineral.* 21: 203–217.
- Stöffler D., Hamann C., Metzler K. (2018) Shock metamorphism of planetary silicate rocks and sediments: Proposal for an updated classification system. *Meteorit. Planet. Sci.* 53: 5–49.
- Trepmann C.A., Dellefant F., Kaliwoda M., Hess K. U., Schmahl W.W., Hölzl S. (2020) Quartz and cristobalite ballen in impact melt rocks from the Ries impact structure, Germany, formed by dehydration of shock-generated amorphous phases. *Meteorit. Planet. Sci.*, 55: 2360–2374.

Геофизические исследования на Анмангындинской наледи 2021-2022 г.

Землянкова А.А.^{1,4}, **Оленченко В.В.**², **Макарьева О.М.**^{1,3}, **Данилов К.П.**³,
Осташов А.А.⁴, **Калганов А.С.**², **Христофоров И.И.**³, **Нестерова Н.В.**^{1,4}

¹СПбГУ, Санкт-Петербург *anastasiazemlanskova@gmail.com*;
otakarieva@yandex.ru; ²ИНГГ СО РАН, Новосибирск *OlenchenkoVV@ipgg.sbras*;
³ИМЗ СО РАН, Якутск; ⁴СВНИМС ИМЗ СО РАН, Магадан

В последние годы произошло значительное развитие геофизических технологий, которые используются, в том числе, для изучения наледей и показывают высокую эффективность (Liu et al., 2021). Наледи подземных вод широко распространены на Северо-Востоке России, их количество составляет более 7000 (Атлас..., 2021). На гигантской наледи в бассейне р. Анмангында (верховье бассейна р. Колыма, Магаданская область) в 1962-1991 гг. проводились исследования наледообразования, ее площадь в отдельные годы достигает 6.8 км². Продолжение наблюдений на этом объекте и установление генезиса наледи актуально для фундаментальной и прикладной науки.

Целью данного исследования является оценка современного состояния характеристик (мощности и объема льда) Анмангындинской наледи, а также поиск и характеристика источников подземных вод, которыми она сформирована.

В апреле 2021 г. использовался метод георадиолокационного зондирования (ГРЛ), он позволил установить объем наледи 3.56 млн м³ при средней и максимальной мощности льда – 1.4 и 4.35 м соответственно, а также предположительное местоположение источников. Для подтверждения интерпретации данных ГРЛ 2021 г. в марте следующего года на одном из профилей была проведена повторная съемка наледи с помощью ГРЛ, а также методом бесконтактного электропрофилирования (БИЭП) и непосредственная заверка бурением.

Результаты геофизических исследований Анмангындинской наледи показали, что интенсивная гипербола дифракции на радарограмме – это участки разгрузки подземных вод из аллювия под лед, которые приурочены к руслам проток. Метод БИЭП позволил выявить пути фильтрации воды под льдом, определить состояние пород (мёрзлое или талое), а также оконтурить границы таликов (рис. 1).

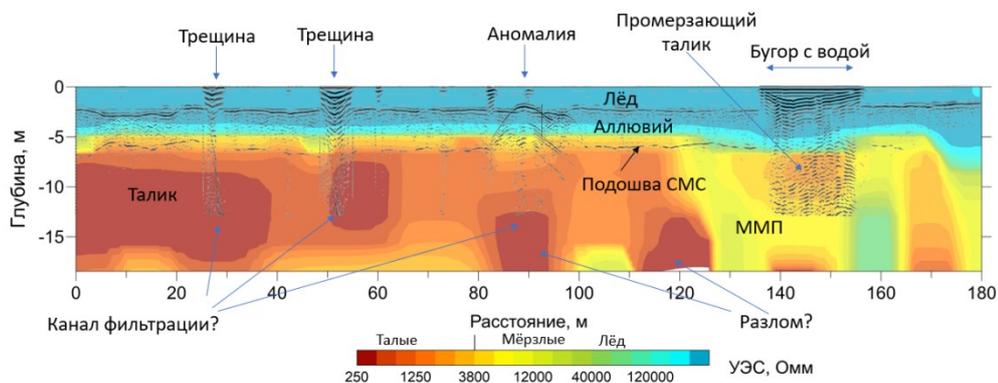


Рис. 1. Сопоставление результатов геофизического исследования Анмангындинской наледи методами ГРЛ и ДОЗ-БИЭП.

Исследования проводятся при поддержке РФФИ – проекты 20-05-00666, 19-55-80028 и Санкт-Петербургского государственного университета (проект 75295776, 92670123).

Литература:

- Liu W., Fortier R, Molson J., Lemieux J-M. (2021) A conceptual model for talik dynamics and icing formation in a river floodplain in the continuous permafrost zone at Salluit, Nunavik (Quebec), Canada. *Permafrost and Periglac Process*: 1–16. <https://doi.org/10.1002/ppp.2111>
- Алексеев В.Р., Макарьева О.М., Шихов А.Н., Нестерова Н.В., Осташов А.А., Землянкова А.А. (2021) Атлас гигантских наледей-тарынов Северо-Востока России. Новосибирск: СО РАН. 302 с.

Ртуть в породах зоны пропаривания Мутновского месторождения парогидротерм (Южная Камчатка)

Зобенько О.А.¹, Округин В.М.¹, Чернев И.И.², Иванов В.В.³, Иванов М.В.⁴

¹ИВиС ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский zobenko.olesya@yandex.ru;

²ПАО Камчатскэнерго, Петропавловск-Камчатский;

³ДВГИ ДВО РАН, Владивосток; ⁴ТОИ ДВО РАН, Владивосток

Ртуть обладает высокой миграционной активностью как в жидкой, так и газообразной фазе, что приводит к образованию ореолов рассеяния вокруг продуктивных зон месторождений. Ртуть рассматривают как индикатор разрывных нарушений, проницаемых для гидротермальных флюидов, и как показатель температурного режима гидротермальных систем (Сауков и др., 1972; Озерова, 1986; Трухин и др., 1986; Рычагов и др., 2014).

В настоящей работе представлены результаты беспламенной атомно-абсорбционной спектрометрии 50 проб вулканитов над зоной пропаривания геотермального резервуара Мутновской гидротермальной системы. Опробованы две эксплуатационные скважины в интервалах глубин от 18 до 1872 м. Определения осуществлялись на специализированном ртутном анализаторе РА-915+ с пиролитической приставкой ПИРО-915. Нижний предел обнаружения – 0.5 нг/г. Стандартные на ртуть: ГСО 7183-95, СПДС-1,2,3.

Скважинами были вскрыты: верхнечетвертичные игнимбриты дацитового состава; нижнечетвертичные андезиты и андезибазальты; андезиты, андезибазальты, базальты, их туфы верхнеалнейской толщи плиоценового возраста; игнимбриты, туфы риолитов и дацитов нижнеалнейской толщи позднемиоцен-плиоценового возраста; андезибазальты, базальты, их туфы нижнеасачинской подсвиты среднемиоценового возраста; андезибазальты и андезиты силла плиоценового возраста. Описание некоторых петрохимических и минеральных особенностей пород представлены в работах (Зобенько и др., 2019; 2021).

Спектрометрические данные свидетельствуют, что повышенные содержания ртути относятся к кислым разностям эффузивов, подвергшимся гидротермальным изменениям. Максимальные концентрации Hg были установлены в породах приповерхностной зоны в игнимбритах дацитового состава. Они достигают 340 и 146 нг/г на глубинах 18 и 65 м, соответственно. В породах нижнеалнейской толщи, представленных дацитами и риолитами на глубинах в интервале 837-932 м, содержания ртути варьируют от 75 до 83 нг/г.

Для наименее измененных данных вулканитов среднего и основного состава обычны невысокие содержания ртути, ниже кларковых (от 2-5 до 20-23 нг/г).

Полученные на современном высокочувствительном анализаторе данные дополняют сведения по ртутоносности разных типов пород участка Дачного названного месторождения парогидротерм, что важно для совершенствования моделей по вопросам миграции и накопления ртути в пределах данной геотермальной системы.

Литература:

- Зобенько О.А., Округин В.М., Чернев И.И. (2019) К минералогии ореолов пропаривания Мутновского геотермального резервуара (Южная Камчатка). Сборник материалов Девятой Российской молодежной научно-практической Школы с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования». М.: ИГЕМ РАН: 158–161.
- Зобенько О.А., Округин В.М., Чернев И.И. (2021) Вещественный состав пород зон пропаривания Мутновского геотермального месторождения (Южная Камчатка). Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop). Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН: 21–23.
- Озерова Н.А. (1986) Ртуть и эндогенное рудообразование. М.: Наука. 232 с.
- Рычагов С.Н., Нуждаев А.А., Степанов И.И. (2014) Ртуть как индикатор современной рудообразующей газо-гидротермальной системы (Камчатка). Геохимия 2: 145–157.
- Сауков А.А., Айдиньян Н.Х., Озерова Н.А. (1972) Очерки геохимии ртути. М.: Наука. 336 с.
- Трухин Ю.П., Степанов И.И., Шувалов Р.А. (1986) Ртуть в современном гидротермальном процессе. М.: Наука. 199 с.

Техногенные минералы горелых отвалов Челябинского угольного бассейна: структурные особенности

**Золотарев А.А.¹, Авдонцева М.С.¹, Кривовичев С.В.^{1,2},
Кржижановская М.Г.¹, Житова Е.С.³, Паникоровский Т.Л.², Гуржий В.В.¹,
Рассомахин М.А.⁴**

¹Институт наук о Земле СПбГУ, Санкт-Петербург a.zolotarev@spbu.ru;
²ФИЦ Кольский научный центр РАН, Апатиты; ³Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский; ⁴ЮУ ФНЦ минералогии и геоэкологии УрО РАН, Миасс

Горелые отвалы Челябинского угольного бассейна (ЧУБ) – уникальный объект техногенного минералообразования ввиду большого разнообразия минералоподобных фаз и уникальности процессов их образования. Так, ранее было описано около 200 минеральных фаз, включая 50 новых, 8 из них были одобрены в качестве минеральных видов (Чеснаков и др., 2008). При этом многие фазы, которые были впервые обнаружены на горелых отвалах ЧУБ, были позднее обнаружены в естественной среде и утверждены как новые минеральные виды. Сегодня в соответствии с текущими рекомендациями комиссии по новым минералам, фазы, найденные в горелых угольных отвалах, могут снова рассматриваться как действительные минеральные виды (Parafiniuk, Hatert, 2020).

В данном докладе представлены результаты кристаллохимического изучения ряда фаз из горелых отвалов ЧУБ, сделаны выводы об их структурных особенностях. В частности, представлены результаты комплексного кристаллохимического изучения: (1) аммониевых фаз $\text{NH}_4\text{MgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ и $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}_3\text{Cl}_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (Zolotarev et al., 2019a); (2) флюорэллестадиита $\text{Ca}_{10}(\text{SO}_4)_3(\text{SiO}_4)_3\text{F}_2$ (Avdontceva et al., 2021a); (3) сульфатных фаз $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2$, $(\text{K,Na})_3\text{Na}_3(\text{Fe,Al})_2(\text{SO}_4)_6$ (Zolotarev et al., 2020) и $\text{Ca}_4(\text{SO}_4)_2(\text{CO}_3)_2 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (Avdontceva et al., 2021b); (4) техногенного хесинита $\text{Ca}_2(\text{Fe}^{3+}, \text{Mg, Ca})_6(\text{Fe}^{3+}, \text{Si, Al})_6\text{O}_{20}$ (Zolotarev et al., 2021); (5) дмиштейнбергита («тригонального анортита») $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (Zolotarev et al., 2019b); (6) кальциевых ферритов CaFe_2O_4 и сребродольскита $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$.

Данная работа поддержана грантом Президента РФ для ведущих научных школ № НШ-1462.2022.1.5 и грантом РФФИ № 19-05-00628. Исследования проведены с использованием оборудования РЦ РДМИ и «Геомодель» Научного парка СПбГУ.

Литература:

- Чеснаков Б.В., Щербакова Е.П., Нишанбаев Т.П. (2008) Минералы горелых отвалов Челябинского угольного бассейна. УрО РАН: Миасс. 139 с.
- Avdontceva M.S., Zolotarev A.A., Krivovichev S.V. et al. (2021a) Fluorellestadite from burned coal dumps: crystal structure refinement, vibrational spectroscopy data and thermal behavior. *Mineralogy and Petrology* 115: 271–281.
- Avdontceva M.S., Zolotarev A.A., Krivovichev S.V. et al. (2021b) Rapidcreekite of anthropogenic origin – 'Korkinoite' from burnt mine dump in the Chelyabinsk coal basin, south Urals, Russia: Crystal structure refinement, thermal behavior and spectroscopic characterization. *Journal of Geosciences* 66: 147–156.
- Parafiniuk J., Hatert F. (2020) New IMA CNMNC guidelines on combustion products from burning coal dumps. *Eur. J. Mineral.* 32: 215–217.
- Zolotarev A.A., Zhitova E.S., Krzhizhanovskaya M.G. et al. (2019a) Crystal chemistry and high-temperature behaviour of ammonium phases $\text{NH}_4\text{MgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ and $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}_3\text{Cl}_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$ from the burned dumps of the Chelyabinsk coal basin. *Minerals* 9: 486.
- Zolotarev A.A., Krivovichev S.V., Panikorovskii T.L. et al. (2019b) Dmisteinbergite, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, a metastable polymorph of anorthite: Crystal-structure and Raman spectroscopic study of the holotype specimen. *Minerals* 9: 570.
- Zolotarev A.A., Krivovichev S.V., Avdontceva M.S. et al. (2020) Crystal chemistry of alkali–aluminum–iron sulfates from the burnt mine dumps of the Chelyabinsk coal basin, south Urals, Russia. *Crystals* 10: 1062.
- Zolotarev A.A., Krivovichev S.V., Avdontceva M.S. et al. (2021) Crystal Chemistry of “Malakhovite” an Anthropogenic Analog of Khesinite from Burnt Dumps of the Chelyabinsk Coal Basin (South Urals). *Crystal. Reports* 6: 66–75.

Структурное и фазовое преобразование эвхроита $\text{Cu}_2(\text{AsO}_4)(\text{OH})\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ при нагревании

**Исмагилова Р.М.¹, Житова Е.С.², Кривовичев С.В.^{1,3}, Золотарев А.А.¹,
Кржижановская М.Г.¹, Спиридонова Д.В.¹, Шиловских В.В.¹**

¹СПбГУ, Санкт-Петербург *rezeda.m.ismagilova@gmail.com*;

²ИВУС ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский *zhitova_es@mail.ru*;

³ФИЦ КНЦ РАН, Апатиты *skrivovi@mail.ru*

Эвхроит, $\text{Cu}_2(\text{AsO}_4)(\text{OH})\cdot 3\text{H}_2\text{O}$, является редким вторичным минералом из класса арсенатов. Образец эвхроита из месторождения Бутрахта (республика Хакасия) был исследован методами рентгеноструктурного анализа и порошковой рентгенографии в интервале температур от -178 до 900°C *in situ*.

При нагревании происходит преобразование эвхроита по следующей схеме:

эвхроит $\text{Cu}_2(\text{AsO}_4)(\text{OH})\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ($<120^\circ\text{C}$) \rightarrow рентгеноаморфная фаза (120 – 200°C) \rightarrow оливинит $\text{Cu}_2(\text{AsO}_4)(\text{OH})$ (200 – 580°C) \rightarrow козыревскит $\text{Cu}_4\text{O}(\text{AsO}_4)_2$ (540 – 780°C) \rightarrow эриклаксманит $\text{Cu}_4\text{O}(\text{AsO}_4)_2$ (720 – 900°C).

Следует отметить, что оливинит, как и эвхроит, является гипергенным минералом, а триклинный эриклаксманит и ромбический козыревскит были описаны в одной ассоциации среди фумарольных эксгальционных минералов (Pekov et al., 2014). При этом, согласно результатам порошковой терморентгенографии, эриклаксманит является более высокотемпературным минералом по сравнению с козыревскитом. Кроме того, полученные в ходе данной работы результаты подтверждают тенденцию преобразования минералов с гидроксогруппой (эвхроита, оливинита) при нагревании в анионоцентрированные соединения (эриклаксманит, козыревскит), характерные для фумарол (Кривовичев и Филатов, 2001).

Основу структуры эвхроита составляют рутилоподобные цепочки, вытянутые вдоль оси *c*, состоящие из медных октаэдров первого типа ($\text{Cu}1\text{O}_6$). К цепочке с двух сторон по ребрам присоединены медные октаэдры второго типа ($\text{Cu}2\text{O}_6$). Цепочки объединяются в единый каркас через AsO_4 тетраэдры. Структура оливинита образована аналогичными рутилоподобными цепочками медно-кислородных октаэдров, вытянутыми вдоль оси *c*. В случае оливинита второй тип атомов меди находится в координации тригональной бипирамиды ($\text{Cu}2\text{O}_5$), образуя димеры Cu_2O_8 , и совместно с тетраэдрами AsO_4 связывает рутилоподобные цепочки в единый каркас.

Кристаллическая структура эвхроита в интервале низких температур (от -173 до 2°C) расширяется слабо и почти изотропно, а при дальнейшем нагревании ($>2^\circ\text{C}$) характер деформации структуры резко изменяется в результате дегидратации: в плоскости *ab* наблюдается сильное сжатие структуры, а вдоль оси *c* – резкое растяжение. В процессе нагревания наиболее значимые деформации претерпевают длинные связи $\langle\text{Cu}-\text{O}\rangle$ (>2.1 Å) и межатомные углы $\text{O}-\text{Cu}-\text{O}$, $\text{As}-\text{O}-\text{Cu}$, $\text{Cu}-\text{O}-\text{Cu}$, в результате чего происходит растяжение рутилоподобных цепочек вдоль оси *c*. Кроме того, по результатам рентгеноструктурного анализа было выявлено изменение координации медного полиэдра эвхроита из октаэдрической ($\text{Cu}2\text{O}_6$) в тетрагонально-пирамидальную ($\text{Cu}2\text{O}_5$) вследствие дегидратации. Таким образом, зафиксировано начальное частичное структурное преобразование эвхроита в оливинито-подобное соединение. Показано, что медные полиэдры и межполиэдрические сочленения в случае эвхроита являются наиболее гибкими и подверженными влиянию высоких температур, а арсенатные тетраэдры испытывают слабые деформации.

Исследование выполнено в рамках гранта Президента РФ НШ-1462.2022.1.5 (рентгеноструктурный анализ) и проекта РФФИ № 20-35-90007 (порошковая рентгенография в широком интервале температур).

Литература:

- Кривовичев С.В., Филатов С.К. (2001) Кристаллохимия минералов и неорганических соединений с комплексами анионоцентрированных тетраэдров. СПбГУ, Санкт-Петербург. 200 с.
- Pekov I.V., Zubkova N.V., Yapaskurt V.O., Belakovskiy D.I., Vigasina M.F., Sidorov E.G., Pushcharovsky D.Yu. (2014) New arsenate minerals from the Arsenatnaya fumarole, Tolbachik volcano, Kamchatka, Russia. II. Ericlaxmanite and kozyrevskite, two natural modifications of $\text{Cu}_4\text{O}(\text{AsO}_4)_2$. Mineralogical Magazine 78: 1553–1569.

Голдхиллит, $\text{Cu}_5\text{Zn}(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$, новый минерал, арсенатный член изоморфного ряда голдхиллит-филипсбергит-кипушит

Исмагилова Р.М.¹, Житова Е.С.², Кривовичев С.В.^{1,3}, Золотарев А.А.¹, Михайлова Ю.А.³, Белаковский Д.И.⁴, Бочаров В.Н.¹, Шиловских В.В.¹, Власенко Н.С.¹

¹СПбГУ, Санкт-Петербург rezeda.m.ismagilova@gmail.com;

²ИВиС ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский zhitova_es@mail.ru;

³ФИЦ КНЦ РАН, Апатиты skrivovi@mail.ru;

⁴Минералогический Музей им. Ферсмана, Москва dmzvr@mail.ru

В работе нами исследован образец «филипсбергита» из месторождения Голд Хилл (округ Туэле, штат Юта, США), хранящийся в Минералогическом Музее им. Ферсмана под номером 88338. Исследование кристаллической структуры методом монокристалльного рентгеноструктурного анализа показало упорядоченное заселение As и P по неэквивалентным кристаллографическим позициям T1 и T2 (Krivovichev et al., 2018). Обнаружение данной кристаллохимической особенности актуализировало исследование кристаллической структуры и химического состава эталонного образца филипсбергита, хранящегося в коллекции Национального музея естественной истории в США под номером 161201. Исследование эталонного образца подтвердило упорядочение P и As при соотношении P:As ~ 1:1, в результате чего идеальная формула филипсбергита была переутверждена с $\text{Cu}_5\text{Zn}(\text{P}, \text{AsO}_4)_2(\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ на $\text{Cu}_5\text{Zn}[(\text{AsO}_4)(\text{PO}_4)](\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (Ismagilova et al., in press). При этом изученный нами образец из месторождения Голд Хилл, изначально идентифицированный как «филипсбергит», является новым минералом, названным нами голдхиллитом, и крайним арсенатным членом изоморфного ряда голдхиллит, $\text{Cu}_5\text{Zn}(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ – филипсбергит, $\text{Cu}_5\text{Zn}[(\text{AsO}_4)(\text{PO}_4)](\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ – кипушит, $\text{Cu}_5\text{Zn}(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$.

Химическая формула голдхиллита из месторождения Голд Хилл определена как $\text{Cu}_{4.69}\text{Zn}_{1.23}[(\text{AsO}_4)_{1.72}(\text{PO}_4)_{0.36}](\text{OH})_{5.61} \cdot \text{H}_2\text{O}$. Голдхиллит изоструктурен с кипушитом и филипсбергитом, кристаллизуется в моноклинной сингонии, пр. гр. $P2_1/c$, $a = 12.3573(5)$, $b = 9.2325(3)$, $c = 10.7163(4)$ Å, $\beta = 97.346(4)^\circ$, $V = 1212.59(8)$ Å³, $Z = 4$. При этом параметры элементарной ячейки возрастают в ряде кипушит → филипсбергит → голдхиллит с увеличением содержания As. Наиболее интенсивные линии порошковой рентгенограммы голдхиллита [d, Å (I, %)(hkl)]: 4.09 (28)(300), 3.41 (23)(12-2, 221, 311), 2.57 (100)(132, 11-4, 20-4), 2.17 (18)(42-3, 332), 1.95 (22)(432), 1.54 (20)(13-6, 060). В Рамановском спектре голдхиллита наиболее интенсивно проявлены полосы колебания AsO_4 -тетраэдров в области 813-809 см⁻¹ и 847-837 см⁻¹, а в интервале 975-970 см⁻¹ слабо проявлены полосы PO_4 -тетраэдров. Колебания OH-ионов прослеживаются в области 3546-3489 см⁻¹, молекулы H_2O – в области 3450-3100 см⁻¹, а полосы в интервале 330-90 см⁻¹ соответствуют колебаниям решетки. Голдхиллит двухосный, оптически отрицательный, обладает плеохроизмом от светло-зеленого (вдоль оси X) до зеленого (вдоль осей Y и Z), показатели преломления $n_\alpha = 1.747(3)$, $n_\beta = 1.794(3)$, $n_\gamma = 1.796(3)$, угол $2V = 17(3)^\circ$. Спайность совершенная по {100}; твердость по шкале Мооса 3.5, расчетная плотность 4.199 г/см³. Голдхиллит образует сростания, состоящие из прозрачных изумрудно-зеленых таблитчатых кристаллов размером до 1 мм со стекляннным блеском. Голдхиллит встречается на поверхности трещин гидротермально измененных кварцевых пород в ассоциации с микситом, корнваллитом, конихальцитом и гидроксидами железа.

Исследование голдхиллита выполнено в рамках проекта РФФИ № 20-35-90007.

Литература:

- Krivovichev S.V., Zhitova E.S., Ismagilova R.M., Zolotarev A.A. (2018) Site-selective As–P substitution and hydrogen bonding in the crystal structure of philipsburgite, $\text{Cu}_5\text{Zn}((\text{As}, \text{P})\text{O}_4)_2(\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$. *Physics and Chemistry of Minerals* 45: 917–923.
- Ismagilova R.M., Rieck B., Kampf A.R., Giester G., Zhitova E.S., Lengauer C.L., Krivovichev S.V., Zolotarev A.A., Ciesielczuk J., Mikhailova J.A., Belakovsky D.I., Bocharov V.N., Shilovskikh V.V., Vlasenko N.S., Nash B.P., Adams P.M. (2022) Goldhillite, $\text{Cu}_5\text{Zn}(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$, a new mineral species, and redefinition of philipsburgite, $\text{Cu}_5\text{Zn}[(\text{AsO}_4)(\text{PO}_4)](\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$, as an As–P ordered species. *Mineralogical Magazine* (in press).

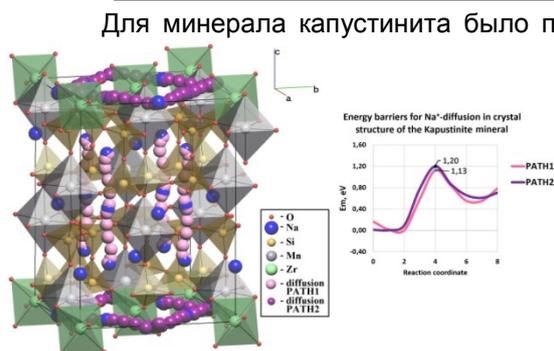
Ионная проводимость в минералах Хибинского, Ловозерского и Ковдорского массивов: кристаллохимический и DFT анализ диффузии катионов

Кабанова Н.А.^{1,2}, Паниковский Т.Л.²

¹Межвузовский научно-исследовательский центр по теоретическому материаловедению, Самарский Государственный Технический Университет, Самара natkab84@yandex.ru; ²Кольский Научный Центр РАН, Апатиты

Полезные ископаемые Кольского полуострова, благодаря своему изобилию, по праву занимают лидирующие позиции в разработке перспективных материалов, а изучение кристаллических структур неорганических соединений сделало мощный скачок в последние десятилетия благодаря развитию автоматизированных расчетов. Данная работа была направлена на исследование кристаллических структур натрийсодержащих минералов Хибинского, Ловозерского и Ковдорского массивов с целью выявления новых перспективных ионных проводников и ионнообменников. На основе баз данных mindat.org и ICSD (Version 2021V2) был сформирован список, включающий все открытые к настоящему времени 319 натрийсодержащих минералов, встречающихся в массивах Хибины, Ловозеро и Ковдор. Среди них, для 52 минералов отсутствуют кристаллоструктурные данные, для 38 минералов структуры содержат ошибки. Для 229 минералов при помощи комплекса структурно-топологических программ TOPOSPRO (Blatov et al., 2014) построены карты миграции катионов натрия в кристаллических структурах. Метод Вороного, примененный для расчетов, основан на разделении кристаллического пространства на два взаимопроникающих подпространства (атомов и пустот), описываемых при помощи графов атомной сетки и сетки пустот. Метод успешно применяется для решения различных кристаллохимических задач (Shannon et al., 2019; Kabanova et al., 2020). Установлено, что для 45 минералов кристаллическая структура обладает трехпериодической картой миграции катионов натрия (3D), для 42 – двухпериодической (2D) и для 35 минералов – однопериодической картой миграции (1D) (примеры приведены в таблице).

| Name | Formula | Sp.gr. | Li ⁺ | Ag ⁺ | Na ⁺ | Pb ²⁺ | ICSD code |
|---------------------|---|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------|
| Olympite | LiNa ₅ (PO ₄) ₂ | Pcmn | 3D | 3D | 3D | 0D | 39628 |
| Lomonosovite | Na ₅ (Ti ₂ Si ₂ O ₉)(PO ₄) | P-1 | 3D | 3D | 2D (001) | 1D[010] | 200169 |
| Bonshedtite | Na ₃ Fe(PO ₄)(CO ₃) | P2 ₁ /m | 3D | 3D | 2D (100) | 0D | 77053 |
| Kapustinite | Na _{5.5} Mn _{0.25} Zr(Si ₆ O ₁₆ (OH) ₂) | C2/m | 3D | 3D | 3D | 0D | 250170 |
| Manaksite | KNaMn(Si ₄ O ₁₀) | P-1 | 3D | 3D | 3D | 1D [100] | 260176 |
| Tugtupite | Na ₈ (Be ₂ Al ₂ Si ₈ O ₂₄)Cl ₂ | I-4 | 3D | 3D | 3D | 3D | 34665 |



Для минерала капустинита было проведено квантово-механическое моделирование в рамках теории функционала плотности (программа VASP). Рассчитаны энергетические барьеры миграции при перескоках катиона натрия между позициями в кристаллической структуре. Установлено, что значения энергии активации переходов превышают 1эВ, что говорит о затрудненной диффузии катионов натрия при комнатной температуре. Однако, учитывая наличие 3D системы каналов в структуре, можно предположить ионный перенос при повышенной температуре или давлении.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-00355).

Литература:

- Blatov V.A., et al. (2014) Applied topological analysis of crystal structures with the program package Topospro. Cryst. Growth Des. 14: 3576–3586.
- Kabanova N.A., et al. (2020) The Na_{2-n}H_n[Zr(Si₂O₇)]_mH₂O minerals and related compounds (n=0-0.5; m=0.1): structure refinement, framework topology, and possible Na⁺-ion migration paths. Crystals 10(11): 1016.
- Shannon R.D., et al. (2019) Empirical electronic polarizabilities: deviations from the additivity rule. II. structures exhibiting ion conductivity. Cryst. Res. Technol. 54: 1900037.

3D-визуализации геологических моделей в дополненной реальности

Кадыров Р.И.

ИГуНГТ КФУ, Казань rail7777@gmail.com

В последние годы наблюдается быстрое прогрессирование технологий дополненной реальности (AR), что приводит к их все более широкому использованию в различных сферах. Особенно перспективным может быть использование дополненной реальности в областях науки, где результаты представлены в виде 3D-объектов со сложными формами и имеется необходимость просматривать их под разными углами или с различным масштабированием.

Одним из возможных подходов является создание AR-моделей в открытом формате Universal Scene Description Zipped (USDZ), разработанном совместно компаниями Apple и Pixar и в настоящее время поддерживаемом огромным количеством различных мобильных устройств. Этот 3D-формат отличается расширенным текстурированием на основе физического рендеринга (PBR), поддержкой высокополигональных моделей, 3D-анимации, звуков, созданием сложных сцен с реакциями, назначенными отдельным объектам, и простотой обмена по электронной почте, в мессенджерах и на веб-сайтах. Данные AR-модели легко могут быть получены с помощью открытого программного обеспечения на основе любых трехмерных данных (Kadyrov, 2021). Например, могут быть использованы цифровые модели пород, получаемые с помощью рентгеновской компьютерной томографии, 3D-модели месторождений, геологических и геоморфологических объектов, результаты интерпретации геофизических полей (3D-сейсмика) и др.

Таким образом, практически любые объемные модели, получаемые в ходе исследований, могут быть отображены на мобильных и десктопных устройствах (нативно в системах iOS, MacOS и с помощью сторонних приложений в других ОС), использоваться для быстрого доступа и обмена визуальной информацией, для музейных выставок и в образовательных целях. Модели AR позволяют легко делиться с людьми 3D-визуализациями, которые можно интегрировать в веб-сайты и использовать для поддержки научных публикаций или собственных демонстраций на конференциях.

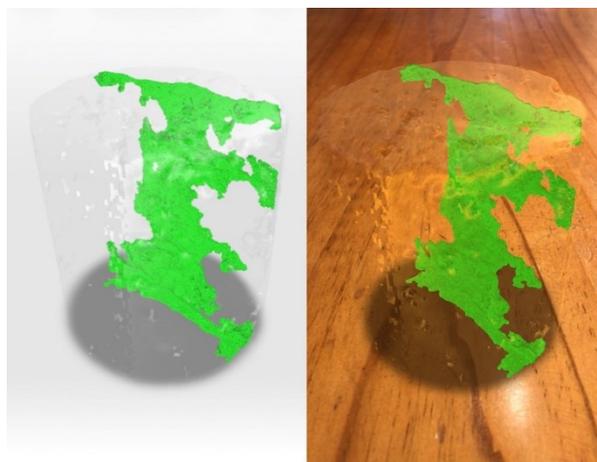


Рис. 1. Модель USDZ, демонстрирующая распространение трещины в образце породы (доступна для скачивания по ссылке: [https://github.com/Rail7777/USDZ-for-Scientific-Visualization/raw/main/Cracked_sample_\(Fig_16\).usdz](https://github.com/Rail7777/USDZ-for-Scientific-Visualization/raw/main/Cracked_sample_(Fig_16).usdz))

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (Проект № 0671-2020-0048 государственного задания № 075-00216-20-05 от 04.06.2020 (часть II раздел 1)).

Литература:

Kadyrov R. (2021) Developing of USDZ models for 3D digital analysis results visualization in augmented reality. Scientific Visualization 13 (1): 83–103.

Кристаллохимические, колебательные и оптические особенности тинаксита и токкоита (Мурунский массив, Россия)

Канева Е.В., Шендрик Р.Ю.

ИГХ СО РАН, Иркутск kev604@mail.ru; r.shendrik@gmail.com

Тинаксит и токкоит относятся к группе редких щелочных Са-(К)-(Na) силикатов и были впервые обнаружены на Мурунском массиве в породах, называемых чароититами. Согласно классификации Ф. Либбау (Liebau, 2012), тинаксит ($K_2Ca_2NaTi[Si_7O_{18}OH]O$) и токкоит ($K_2Ca_4[Si_7O_{18}OH](OH,F)$) являются силикатами с гибридными кратными цепочками. Силикатный анион, обнаруженный в их кристаллических структурах, построен путем соединения неразветвленной трехзвенной изолированной цепочки с циклически-разветвленной трехзвенной изолированной цепочкой. Структурные особенности Са-(К)-(Na) минералов группы редких щелочных силикатов делают их перспективными для ионного обмена, поскольку кристаллические структуры содержат несколько катионных позиций, подходящих для легирования переходными металлами и редкоземельными элементами, а такие материалы широко используются в различных областях фотоники.

Кристаллические структуры тинаксита и токкоита из Мурунского массива (Россия) были уточнены в пространственной группе $P-1$; $a \approx 10.373$, $b \approx 12.176$, $c \approx 7.057$ Å, $\alpha \approx 90.82^\circ$, $\beta \approx 99.22^\circ$, $\gamma \approx 92.80^\circ$, $V \approx 878.5$ Å³ для тинаксита; $a \approx 10.423$, $b \approx 12.477$, $c \approx 7.112$ Å, $\alpha \approx 89.92^\circ$, $\beta \approx 99.68^\circ$, $\gamma \approx 92.97^\circ$, $V \approx 910.5$ Å³ для токкоита (Lacalámita et al., 2014). Основными структурными отличиями тинаксита от токкоита являются более низкие значения параметров элементарной ячейки, особенно в отношении параметра b , более короткие расстояния $\langle M-O \rangle$, особенно $\langle M1-O \rangle$; меньшие значения длин связей $M1-M3$ и $O20-O2$ и менее сильное искажение полиэдра $M1$. Результаты мёссбауэровского анализа указывают на наличие значительного количества трехвалентного железа ($^{56}Fe^{3+}$): 12.8(3) отн.% в тинаксите и 40.0(7) отн.% в токкоите. Подтверждено, что реакция обмена $2Ca^{2+}_{(M1+M2)} + (F,OH)^-_{(O20)} \leftrightarrow Ti^{4+}_{(M1)} + Na^+_{(M2)} + O^-_{(O20)}$ описывает кристаллохимическую взаимосвязь тинаксита и токкоита.

Проведен сравнительный анализ экспериментальных порошковых дифрактограмм тинаксита и токкоита по отношению к расчетным данным. Смещение дифракционных пиков тинаксита объясняется меньшими значениями параметров элементарной ячейки a и b по сравнению с токкоитом. Аналогичный сдвиг пиков наблюдается и в КР и ИК-спектрах поглощения (Kaneva, Shendrik, 2022); однако эта особенность объясняется различием химического состава минералов. Плечо в спектрах поглощения около 800 нм в тинаксите и 700 нм в токкоите соответствует присутствию полос поглощения Mn^{2+} и Fe^{3+} , наличие которых определяет окраску тинаксита и токкоита: от светло-желтой до коричневой. Полоса люминесценции с максимумом около 540-550 нм в спектрах фотолюминесценции связана с центрами Mn^{2+} , а дополнительная полоса около 610 нм, скорее всего, связана с центрами Ti^{3+} в тинаксите. Интенсивность сигнала ЭПР Fe^{3+} увеличивается в обоих образцах после прогрева, в то время как в тинаксите интенсивность полос, связанных с ОН-группами, уменьшается.

В заключение следует отметить, что сочетание рентгеновской дифракции и спектроскопических методов обеспечивает надежный способ выявления различий и особенностей материалов, имеющих сходную кристаллическую структуру и химический состав.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФ № 22-27-00183.

Литература:

- Kaneva E., Shendrik R. (2022) Tinaksite and tokkoite: X-ray powder diffraction, optical, and vibrational properties. *Crystals* 12: 377.
- Lacalámita M., Mesto E., Kaneva E., Scordari F., Pedrazzi G., Vladykin N., Schingaro E. (2014) Structure refinement and crystal chemistry of tokkoite and tinaksite from the Murun massif (Russia). *Mineralogical Magazine* 81(2): 251–272.
- Liebau, F. (2012) *Structural chemistry of silicates: structure, bonding, and classification*, Springer-Verlag, New York. 347 p.

Источники сноса позднедокембрийских кварцито-сланцевых толщ западной части Центрально-Азиатского орогенного пояса

Каныгина Н.А., Дегтярев К.Е., Третьяков А.А.

Геологический институт РАН, Москва kanygina.nadia@gmail.com

Центрально-Азиатский пояс является одним из наиболее крупных фанерозойских орогенных поясов Земли, в строении которого значительную роль играют блоки (террейны) с докембрийской континентальной корой. Основную роль в строении докембрийских террейнов этой части пояса играют мезо- и неопротерозойские магматические и метаморфические образования, в то время как раннедокембрийские комплексы распространены крайне ограниченно (Degtyarev et al., 2017). Наряду с разнообразными магматическими образованиями, характерной особенностью многих докембрийских террейнов западной части Центрально-Азиатского пояса является широкое распространение позднедокембрийских осадочных и метаосадочных образований, сложенных, в основном, метатерригенными сланцами, кварцито-сланцами и кварцитами.

В последние годы эти толщи были изучены в пределах докембрийских террейнов Северного (Кокчетавский, Ишкеольмесский и Ерементау-Ниязкий), Центрального (Актау-Моинтинский) и Южного (Чуйско-Кендыктасский) Казахстана, Северного Тянь-Шаня (Иссыкульский) и Северо-Западного Китая (Илийский) (Kanygina et al., 2021). Накопление этих толщ в пределах Кокчетавского, Ишкеольмесского и Ерементау-Ниязского террейнов Северного Казахстана и Иссыкульского террейна Северного Тянь-Шаня началось около 1.1 млрд лет назад, а их источниками являлись мезопротерозойские, палеопротерозойские, неоархейские комплексы (Kanygina et al., 2021). При этом почти все цирконы из кварцито-сланцевых толщ террейнов Северного Казахстана характеризуются высокими положительными значениями ϵHf (в основном от 0 до +11), типичными для материнских пород с относительно короткой коровой историей (Kanygina et al., 2021). Основными источниками сноса при накоплении кварцито-сланцевых толщ Актау-Моинтинского массива являлись комплексы мезопротерозойского, палеопротерозойского, неоархейского и, в гораздо меньшей степени, мезоархейского возраста. В то же время цирконы в кварцитах массива характеризуются значительно большим диапазоном значений $\epsilon\text{Hf}(t)$ от -14 до +11. Близкие по строению и возрасту кварцито-сланцевые и кварцито-сланцево-карбонатные толщи развиты в пределах Илийского блока и Китайского Центрального Тянь-Шаня. Обломочные цирконы здесь имеют подобные распределения возрастов и значений $\epsilon\text{Hf}(t)$. Накопление толщ этих террейнов началось около 1000 млн лет, а основными источниками сноса являлись мезопротерозойские, палеопротерозойские и неоархейские комплексы (Kanygina et al., 2021). Кварцито-сланцевые толщи отмечены и в строении Чуйско-Кендыктасского террейна, однако их накопление началось около 1700 млн лет, а в источниках сноса преобладают палеопротерозойские и неоархейские комплексы (Kanygina et al., 2021). Такие же отличия отмечаются при сравнении с раннепротерозойскими осадочными толщами северной части Таримского кратона. В этих толщах почти отсутствуют обломочные цирконы с возрастными 1200-1700 млн лет.

Таким образом, особенности строения разрезов, возрастной диапазон и характер источников сноса кварцито-сланцевых толщ позднего мезопротерозоя-раннего неопротерозоя свидетельствуют о близости террейнов Северного Казахстана, Актау-Моинтинского, Илийского, Иссыкульского террейнов и Китайского Центрального Тянь-Шаня, и вероятно, составлявших в это время единый континентальный блок, и показывают их существенные различия с позднедокембрийскими образованиями Чуйско-Кендыктасского террейна и Таримским кратоном.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 22-77-00082.

Литература:

- Degtyarev K., Yakubchuk A., Tretyakov A., Kotov A., Kovach V. (2017) Precambrian geology of the Kazakh Uplands and Tien Shan: An overview. *Gondwana Research* 47: 44–75.
- Kanygina N., Tretyakov A., Degtyarev K., Kovach V., Skuzovatov S., Pang K.-N., Wang K.-L., Lee H.-Y. (2021) Late Mesoproterozoic–early Neoproterozoic quartzite–schist sequences of the Aktau–Moıntıy terrane (Central Kazakhstan): Provenance, crustal evolution, and implications for paleotectonic reconstruction. *Precambrian Research*, 354: 106040.

Надсубдукционный метаморфизм гарцбургитов Хара-Нурского массива (офиолиты Восточного Саяна)

Каримов А.А., Горнова М.А., Беляев В.А., Скузатов С.Ю.

ИГХ СО РАН, Иркутск anas@igc.irk.ru

Хара-Нурский перидотитовый массив расположен в юго-восточной части Восточного Саяна и является мантийной частью офиолитового разреза. Были выделены фрагменты всех членов офиолитового разреза: мантийных реститовых гипербазитов, ультраосновных-основных кумулятов, комплекса параллельных даек и вулканитов (Добрецов и др., 1985). Лавы и дайки офиолитов представлены породами бонинитовой серии и IAT. Из этих же расплавов кристаллизовались основные и ультраосновные кумуляты (Belyaev et al., 2017). Присутствие бонинитов позволяет отнести офиолиты Восточного Саяна к надсубдукционному типу.

В массиве Хара-Нур нами были выделены гарцбургиты, оливин-тремолитовые (Ol-Tr) и оливин-антигоритовые породы с диопсидом (Ol-Atg-Di). Гарцбургиты представляют собой породы с массивной текстурой и порфиорокластовой структурой. Минеральный парагенезис: Ol1, Орх, Сrx1, Spl, Atg, \pm Chl. Составы шпинелей укладываются в поле мантийной последовательности, Ol1, Орх и Сrx имеют высокую магнезиальность, Орх и Сrx характеризуются низкими Al_2O_3 и Cr_2O_3 . Породы характеризуются V-образным распределением несовместимых элементов, с обогащением по LILE. То есть соответствуют преддуговым перидотитам, образующимся при высоких степенях плавления. Таким образом, гарцбургиты массива Хара-Нур представляют собой ультра-деплетированный мантийный блок, обогащенный субдукционными флюидом и просачивающимися расплавами.

Впервые был установлен переход от гарцбургитов к метаперидотитам в едином разрезе. Вначале гарцбургиты сменяются узкой зоной (~200 м) Ol-Орх-Tr пород, затем переходят в Ol-Tr и далее в Ol-Atg-Di разновидности. Спектры распределения редких элементов в гарцбургитах и метаперидотитах подобны и характеризуются обогащением LILE и HFSE, более высокими содержаниями L-MREE относительно HREE. Водосодержащие Tr и Atg значительно обогащены всеми несовместимыми элементами относительно расчетного состава гарцбургита, особенно в части LILE (Cs, Rb, Ba, Pb), FME (Sb, Sn, U, Sr) и L-MREE. Наибольшее обогащение наблюдается в тремолите, где содержания L-MREE достигают 1-10 PM, а в части FME и LILE (U, Pb, Sb, Sn) > 10 PM. Смеси минералов (Ol2+Di2) также показывают заметное обогащение в сравнении с расчетным составом гарцбургита, но в меньшей степени, чем Tr. Таким образом, бюджет наиболее несовместимых и подвижных в водной среде элементов контролируется в большей степени Tr, и в меньшей – Atg, Ol2, Di2. Наблюдаемые минеральные ассоциации могли последовательно формироваться при добавлении воды в безводные гарцбургиты и понижении температуры. Фиксируется образование Atg и Di2 из Орх и Tr, что возможно только в узком диапазоне давления $P \sim 1.6-2.0$ GPa при $T \sim 640-720^\circ C$. P-T параметры, ретроградный характер и незавершенность метаморфических реакций согласуются с надсубдукционной природой метаморфизма перидотитов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-77-10038, <https://rscf.ru/project/21-77-10038/>).

Литература:

- Belyaev, V.A., Wang, K.-L., Gornova, M.A., et al. (2017) Geochemistry and origin of the eastern Sayan ophiolites, Tuva-Mongolian microcontinent (southern Siberia). *Geodynamics & Tectonophysics* 8: 411–415.
- Добрецов Н.Л., Конников Э.Г., Медведев В.Н., Скляров Е.В. (1985) Офиолиты и олистостромы Восточного Саяна. Москва: 34–58.
- Жмодик С.М., Миронов А.Г., Агафонов Л.В., Жмодик А.С. и др. (2004) Углеродизация гипербазитов восточного Саяна и золото-палладий-платиновая минерализация. *Геология и геофизика* 45(2): 228–243.
- Киселева О.Н., Жмодик С.М., Дамдинов Б.Б., Агафонов Л.В., Белянин Д.К. (2014) Состав и эволюция платинометалльной минерализации в хромитовых рудах Ильчирского офиолитового комплекса (Оспино-Китойский и Харанурский массивы, Восточной Саян). *Геология и геофизика* 55(2): 333–349.
- Пинус Г.В., Колесник Ю.Н. (1966) Альпинотипные гипербазиты Юга Сибири. Москва. 210 с.
- Сутурин А.Н. (1978) Геохимия гипербазитов Восточного Саяна. Новосибирск. 141 с.

Изотопное картирование биодоступного стронция $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ на территории Оренбургской и Ростовской областей

Киселева Д.В.¹, Шагалов Е.С.^{1,2}, Окунева Т.Г.¹, Солошенко Н.Г.¹, Рянская А.Д.¹, Панкрушина Е.А.¹, Карпова С.В.¹, Уразова К.К.¹, Сидорук А.Р.²

¹ИГГ УрО РАН, Екатеринбург kiseleva@igg.uran.ru; ²УГТУ, Екатеринбург

Изотопные отношения стронция $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ используются для выявления источников стронция и исследования его поведения в (био)геохимических циклах. Так, изотопы стронция являются надежным инструментом идентификации взаимодействий водных бассейнов и водоносных горизонтов в различных гидрологических системах (поверхностные, подземные воды) (Frost, Toner, 2004; Zieliński et al., 2018). В экологических исследованиях изотопы стронция маркируют антропогенный вклад от минеральных удобрений, рудничных, промышленных сточных и муниципальных канализационных вод, а также жидкостей гидроразрыва (Zieliński et al., 2018). Отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ позволяют подтверждать происхождение или выявлять контрафактную продукцию растительного и животного происхождения (сыр, вино, соки, кофе, оливковое масло), а также минеральную воду. В биологии и палеоэкологии изотопы стронция используются для изучения миграций современных и вымерших животных и птиц (Price et al., 2002), а в судебно-криминалистических исследованиях и экспертизе могут быть полезны при идентификации неопознанных трупов (Rauch et al., 2007). Стронций поступает из пород в воду или почву посредством процессов выветривания, оказываясь доступным для дальнейшего поглощения растениями и животными (биодоступным) (Frei, Frei, 2010). Для оценки $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ биодоступного стронция используется ряд материалов – зубные и костные ткани ископаемых и современных животных, поверхностная и подземная вода, почва, растительность, раковины моллюсков. Эти данные используются для выявления источников происхождения в гидрологических, аграрных и археологических исследованиях (Frei, Frei, 2010).

В работе проведены исследования изотопного состава стронция $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ образцов, характеризующих биодоступный стронций, – растительности, почвы, поверхностной и подземной воды, а также костных и зубных остатков современной фауны, раковин моллюсков, отобранных во время полевых экспедиций в Оренбургскую и Ростовскую области в 2020-2021 гг. Изотопный анализ стронция проведен методом МК-ИСП-МС на магнитосекторном масс-спектрометре двойной фокусировки Neptune Plus после хроматографического выделения стронция. Построены изоскейпы (карты распределения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) биодоступного стронция для Оренбургской и Ростовской областей. Полученные в ходе исследования данные по распределению $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ во многом расширят возможности исторических интерпретаций и позволят провести верификацию традиционных археологических культурных и географических моделей. Кроме археологических и археометрических приложений, полученные данные могут быть использованы для исследования гидрологических особенностей бассейнов крупных рек Оренбургской и Ростовской областей, а также в сельскохозяйственной отрасли для выявления контрафактной продукции и фальсификатов, подтверждения происхождения пищевых продуктов растительного происхождения.

Работа поддержана грантом РФФИ № 20-09-00194.

Литература:

- Frei K.M., Frei R. (2010). The geographic distribution of strontium isotopes in Danish surface waters – A base for provenance studies in archaeology, hydrology and agriculture. *Applied Geochemistry* 26: 326–340.
- Frost C.D., Toner R.N. (2004). Strontium isotopic identification of water-rock interaction and ground water mixing. *Ground Water* 42(3): 418–432.
- Price T.D., Burton J.H., Bentley R.A. (2002). The characterization of biologically available strontium isotope ratios for the study of prehistoric migration. *Archaeometry* 44: 117-136.
- Rauch E., Rummel S., Lehn C., Buttner A. (2007). Origin assignment of unidentified corpses by use of stable isotope ratios of light (bio-) and heavy (geo-) elements – a case report. *Forensic Sci. Int.* 168: 215–218.
- Zieliński M., Dopieralska J., Belka Z., Walczak A., Siepak M., Jakubowicz M. (2018). Strontium isotope identification of water mixing and recharge sources in a river system (Oder River, central Europe): A quantitative approach. *Hydrological Processes* 32: 2597– 2611.

Типоморфные особенности состава главных породообразующих и окисно-рудных минералов из такситовых габбро-долеритов Хараелахского интрузива.

Киселева М.Д., Бобров А.В., Крылов И.О.

Геологический факультет МГУ, Москва mdkiselyova@msu.ru

Несмотря на относительную геолого-геохимическую изученность Талнахского рудного узла, новые данные о строении, составе и геохимии составляющих его рудных тел появляются из года в год (Служеникин и др., 2018; Krivolutskaya et al., 2021), а вместе с тем выявляются новые поисковые предпосылки платинометалльного оруденения. Для их выявления может быть полезна информация об условиях формирования рудоносных интрузивов. С целью получения таких данных была проведена работа по установлению типоморфных особенностей состава главных породообразующих и акцессорных минералов из такситовых габбро-долеритов Хараелахского интрузива, вскрытых разведочными скважинами Октябрьского месторождения с целью дальнейшей реконструкции условий кристаллизации данных пород.

Верхние такситовые габбро-долериты являются важным типоморфным признаком рудоносных интрузивов норильского типа.

Одной из особенностей верхнего такситового горизонта является его обогащённость хромом и титаном, в этих породах отмечается высокое содержание шпинелидов ряда хромита-титаномагнетита и ильменита.

Породы представляют собой двупироксеновые оливинсодержащие габбро-долериты с обильной титаномагнетит-ильменитовой минерализацией.

Методом электронно-зондового микроанализа установлен состав основных породообразующих фаз и акцессорных минералов. Выделены две генерации плагиоклаза: ранний – битовнит и поздний – лабрадор. Характерной особенностью клинопироксена в этих породах является высокое содержание хрома, титана и марганца. Ортопироксен представлен бронзитом, в нём установлено низкое (до 1 масс.% СаО) содержание кальция.

Оливин находится в виде единичных зёрен, содержащих округлые включения хромшпинелида и титаномагнетита, вероятно, он кристаллизовался одним из первых, захватывая зёрна наиболее ранних оксидных минералов. Хромшпинелид представляет собой титанистый алюмохромит, состав которого эволюционирует по тренду уменьшения глинозёмистости, это может свидетельствовать о том, что его кристаллизация происходила в ходе подъёма магмы по глубинному разлому (Спиридонов, 2010). Титаномагнетит и ильменит образуют равновесные сростания, в которых местами проявлена структура распада твёрдого раствора.

Хромшпинелид и титаномагнетит характеризуются повышенными содержаниями ванадия, для ильменита отмечается высокая магнезиальность.

В результате применения к исследованным породам двупироксеновой геотермометрии установлено, что их кристаллизация происходила при температурах около 1000°C при давлении 5 кбар, что примерно соответствует глубине в 15 км.

Литература:

- Служеникин С.Ф., Малич К.Н., Туровцев Д.М., Григорьева А.В., Баданина И.Ю. (2020). Зубовский тип дифференцированных базит-гипербазитовых интрузивов Норильского района: петрогеохимические характеристики и рудоносность. *Петрология* 28(5): 511–544.
- Спиридонов Э.М. (2010) Рудно-магматические системы Норильского рудного поля. *Геология и геофизика* 51(9): 1356–1378.
- Krivolutskaya N., Makvandi S., Gongalsky B., Kubrakova I., Svirskaya N. (2021) Chemical characteristics of the ore-bearing intrusions in the Norilsk area and origin of the PGE-Cu-Ni mineralization. *Minerals* 11(8): 819.

Кошрабадский массив гранитов рапакиви в Узбекистане: петрогенезис, геодинамическая обстановка формирования и золотоносность

Конопелько Д.Л.^{1,2}

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург
d.konopelko@spbu.ru;

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск

Кошрабадский массив, расположенный в западном Узбекистане, представляет собой одну из интереснейших герцинских интрузий Тянь-Шаня. Массив известен как один из немногих фанерозойских комплексов гранитов рапакиви (Юдалевич и др., 1973), а также благодаря связанному с ним месторождению золота, крупнейшему из подобных месторождений в Тянь-Шане (Abzalov, 2007). Кроме того, Кошрабадский массив расположен в Северо-Нуратинской структуре, формирование которой связано с региональным растяжением на постколлизийном этапе (Конопелько и др., 2011). Гранитоидные интрузии в этой структуре весьма разнообразны по составу и являются интересным примером гранитообразования в этой геодинамической обстановке (Конопелько, 2020). Кошрабадский массив сложен двумя сериями пород: мафическими породами и кварцевыми сиенитами и гранитами главной фазы. Порфириовидные гранитоиды главной фазы содержат овоиды щелочного полевого шпата и представляют собой серию полевошпатовых кумулатов. Мафические породы, развитые локально в центральной части массива, образовались в результате инъекций мафической магмы в еще неконсолидированные гранитоиды главной фазы. Этот процесс был связан с образованием гибридных пород и различных дайковых серий. Все породы массива отличаются очень высокой железистостью и присутствием файлита, что свидетельствует о восстановительной обстановке формирования. Мафические породы являются результатом фракционной кристаллизации щелочно-базальтового мантийного расплава, а граниты главной фазы демонстрируют признаки контаминации коровым веществом. Высокая железистость и повышенные содержания высокозарядных катионов сближают породы массива с гранитами А-типа. Данные о геохимической эволюции пород массива подтверждают генетическую связь месторождений золота в пределах массива с магматическим процессом и указывают на возможность накопления золота в остаточных кислых расплавах и на относительно быстрое формирование золоторудных кварцевых жил в тех же структурах, которые контролировали внедрение поздних даек. Одновременное внедрение различных по составу постколлизийных гранитоидных интрузий Северо-Нуратинского хребта, включая Кошрабадские гранитоиды, объясняется синхронным плавлением различных коровых протолитов в зоне трансформации сдвига в результате подъема горячего астеносферного вещества в обстановке растяжения. Циркуляция флюидов, вызванная этим процессом, обусловила мобилизацию рудных элементов из пород коры и формирование их промышленных концентраций.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 21-77-20022.

Литература:

- Abzalov M. (2007) Zarmitan granitoid-hosted gold deposit, Tian Shan belt, Uzbekistan. *Economic Geology* 102: 519–532.
- Конопелько Д.Л. (2020) Палеозойский гранитоидный магматизм западного Тянь-Шаня. Изд-во С.-Петерб. ун-та, СПб. 196 с.
- Конопелько Д.Л., Бискэ Г.С., Куллеруд К., Зельтманн Р., Диваев Ф.К. (2011) Кошрабадский гранитный массив в Узбекистане: петрогенезис, металлогения и геодинамическая обстановка формирования. *Геология и Геофизика* 52(12): 1987–2000.
- Юдалевич З.А., Сандомирский Г.Т., Ляшенко Г.К. (1973) Кошрабадский массив – пример формации рапакиви в Южном Тянь-Шане. Докл. АН СССР 211(2): 452–455.

Кристаллохимия шрейберзита-никельфосфида, $(\text{Fe,Ni})_3\text{P}$

**Кржижановская М.Г.¹, Бритвин С.Н.¹, Золотарев А.А.¹, Горелова Л.А.¹,
Оболонская Е.В.², Власенко Н.С.¹, Шиловских В.В.¹, Мурашко М.Н.¹**

¹*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербурга
maria.krzhizhanovskaya@spbu.ru;*

²*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербурга*

Шрейберзит, $(\text{Fe,Ni})_3\text{P}$, наиболее распространенный метеоритный фосфид, является основным источником фосфора в природной системе Fe-Ni-P и вероятным предшественником пребиотических фосфорорганических соединений на ранних этапах эволюции Земли. Кристаллическая структура минерала содержит три кристаллографически неэквивалентные позиции атомов металла, в которых железо и никель могут изоморфно смешиваться в неограниченных пределах. Распределение этих элементов в структуре может служить индикатором условий кристаллизации шрейберзита и небесных тел, содержащих эти фосфиды.

В составе исследованных кристаллов шрейберзита (Britvin et al., 2021) содержание Ni варьировалось в диапазоне 0.03-1.54 атома на формульную единицу (apfu), т.е. вся Fe-доминантная часть ряда $\text{Fe}_3\text{P-Ni}_3\text{P}$. Из 23 исследованных кристаллов 22 шрейберзита входили в состав магматических и немагматических железных метеоритов и палласитов основной группы. Шрейберзит, самый близкий по составу к конечному члену ряда (0.03 Ni apfu), происходит из пирометаморфических пород бассейна Хатрурим, пустыня Негев, Израиль. Установлено, что замещение Fe/Ni в шрейберзите протекает по одной и той же закономерности во всех исследованных метеоритах. Зависимости нелинейны и могут быть описаны полиномами второго порядка. Однако замещения в позициях M2 и M3 в наиболее распространенной области составов ($0.6 < \text{Ni} < 1.5(\text{apfu})$) хорошо описываются прямой. Анализ полученных результатов свидетельствует о сильном расхождении между изменением параметров элементарной ячейки природного шрейберзита и синтетического $(\text{Fe,Ni})_3\text{P}$. Это указывает на то, что тенденции замещения Fe/Ni в минерале и его синтетических аналогах различны. Правдоподобное объяснение может быть связано с различиями во времени уравнивания системы метеоритного шрейберзита (миллионы лет) и синтетического $(\text{Fe,Ni})_3\text{P}$ (~100 дней). Таким образом, синтетический $(\text{Fe,Ni})_3\text{P}$ нельзя считать полным структурным аналогом природного шрейберзита, что необходимо учитывать при использовании синтетических материалов в реконструкциях природных процессов.

Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 18-17-00079).

Литература:

Britvin S.N., Krzhizhanovskaya M.G., Zolotarev A.A., Gorelova L.A., Obolonskaya E.V., Vlasenko N.S., Shilovskikh V.V., Murashko M.N. (2021) Crystal chemistry of schreibersite, $(\text{Fe,Ni})_3\text{P}$. American Mineralogist 106: 1520–1529.

Рифтогенный и трапповый магматизм Сибирской крупной изверженной провинции

Криволицкая Н.А.¹, Конышев А.А.², Гонгальский Б.И.³, Свирская Н.М.¹

¹ГЕОХИ РАН, Москва nakrivv@mail.ru; nsvirsk@mail.ru;

²Геологический институт, Петрозаводск icelopa@gmail.com;

³ИГЕМ РАН, Москва brgon@mail.ru

Сибирская изверженная провинция является крупнейшей континентальной провинцией на Земле и играет важную роль в решении проблем генезиса крупных магматических провинций (LIPs): в образовании огромных объемов магм, связанных с ними месторождений, а также установлении роли магматизма в биотических кризисах. Для ее формирования предложен ряд моделей, из которых главными являются две – плюмовая (Campbell, Davies, 2006) и деламинации земной коры (Elkins-Tanton, 2005), хотя существуют и другие концепции. Однако, как правило, модельные построения расходятся с реальными геологическими фактами. В частности, в них не находят место разные типы магматизма, связанные с развитием различных тектонических структур, что имеет принципиальное значение для генезиса Сибирской провинции. Согласно данным предыдущих исследователей, рифтогенный магматизм фиксирует начало ее образования, а платформенный – завершает (Альмухамедов и др., 2004), хотя теоретические и модельные построения свидетельствуют об обратном порядке проявления этих процессов (Campbell, Davis, 2006).

В строении Сибирской провинции важную роль играет крупный Енисей-Хатангский прогиб и оперяющие его рифтовые зоны, к которым приурочены внедрения мантийных магм и крупные месторождения. Нашими исследованиями впервые было установлено одновременное поступление рифтогенных и типичных трапповых магм на поверхность в Норильском районе, очаги которых располагались на западе (Енисей-Хатангский прогиб) и востоке (Тунгусская синеклиза) территории (Криволицкая, 2014). Такое совмещение продуктов магматизма разного типа зафиксировано в центральной части Норильского района, где в разрезах чередуются породы контрастного состава – туфы хаканчанской свиты (близкие к породам надеждинской свиты) и базальты туклонской свиты. Карты изопахит для этих свит свидетельствуют об увеличении мощностей этих свит в противоположных направлениях: надеждинской – на запад, а туклонской – на восток. Аналогичное совмещение в разрезах совершенно разных по геохимическому составу пород наблюдается и в других районах. Например, в долине р. Аян среди базальтов моронговской серии установлены высокотитанистые пикриты (Ryabchikov et al., 2001). Далее на восток, в Мамеча-Котуйском районе, щелочные породы чередуются с типичными толеитовыми базальтами и туфами, которые также поступали из совершенно разных источников – мантийных и коровых. Во всех случаях продукты мантийного магматизма (отсутствие Ta-Nb, Pb аномалий, $\epsilon Nd = +4$ – $+6$, $^{87}Sr/^{86}Sri = 0.702$ – 0.703) оказываются заключенными среди пород, характеризующихся коровыми метками (Ta-Nb, Pb аномалии, $\epsilon Nd = \pm 1$, $^{87}Sr/^{86}Sri = 0.706$ – 0.708).

Приведенные примеры свидетельствуют о том, что оба режима, рифтовый и платформенный, действовали одновременно во время образования провинции, что должно учитываться в будущих модельных построениях.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, грант № 22-27-00387.

Литература:

- Криволицкая Н.А. (2011) К проблеме расчленения вулканогенных пород трапповой формации в Норильском районе. ДАН 439 (4): 523–527.
- Al'mukhamedov A.I., Medvedev A.Y., Zolotukhin V.V. (2004) Evolutions of Permo-Triassic basalts of the Siberian Platform in time and space. *Petrology* 12(4): 339–353.
- Campbell I.H., Davies G.F. (2006). Do mantle plumes exist? *Episodes* 29(3): 162–168.
- Elkins-Tanton, L.T. (2005). Continental magmatism caused by litho- spheric delamination. In: Foulger, G.R., Natland, J.H., Presnall, D.C., Anderson, D.L. (eds). *Plates, plumes and paradigms. Special paper. Geological Society of America, Boulder*: 449–461.
- Ryabchikov I.D., Solovova I.P., Ntaflou T., Büchl A., Tikhonenkov P.I. (2001). Subalkaline picrobasalts and plateau basalts from Putorana plateau (Siberian CFB province). II. Melt intrusion chemistry, composition of “primary” magmas and P-T regime at the base of superplume. *Geochemistry International* 39: 484–497.

Ограничения на состав и внутреннее строение железокремнистого ядра Титана

Кронрод В.А., Дунаева А.Н., Кронрод Е.А., Кусков О.Л.

ГЕОХИ РАН, Москва va_kronrod@mail.ru

В результате осуществленных в последние десятилетия научно-исследовательских миссий к Юпитеру и Сатурну (“Галилео”, “Кассини–Гюйгенс”) была получена принципиально новая информация о ледяных спутниках-гигантах Ганимеде, Каллисто и Титане, что позволило построить модели внутреннего строения спутников. В частности, был впервые измерен безразмерный момент инерции Титана. Величины момента инерции и массы Титана допускают построение двух основных типов моделей внутреннего строения спутника. Полностью дифференцированные модели включают водно-ледяную оболочку (с океаном или без него), гидросиликатную мантию и, возможно, силикатное ядро (Fortes, 2011). В частично дифференцированных моделях нет полного разделения льда и железокремнистой компоненты. Мантия спутника состоит из недифференцированной кремнисто-ледяной смеси (Dunaeva et al., 2016). Вопросы о составе, агрегатном состоянии, размерах и физических свойствах ядер спутников, их тепловой эволюции, а также механизмах его формирования до сих пор остаются предметом многочисленных дискуссий. Модели внутренней структуры крупных ледяных спутников (Dunaeva et al., 2016; Fortes, 2011; Kronrod, Kuskov, 2006) и гравитационные данные о моменте инерции, массе и числах Лява накладывают ограничения на состав ядер спутников в соответствии с веществом обычных (L / LL) или углеродистых (C1) хондритов. Числа Лява чувствительны к положению границы жидкость–твёрдое тело и поэтому используются для анализа моделей Титана с вероятным присутствием внутреннего океана.

Согласование модельных чисел Лява k_2 с экспериментально определенными позволило определить для частично дифференцированной модели Титана мощность водно-ледяной оболочки ≈ 400 км и радиус L / LL хондритового ядра ≈ 750 км (Kronrod et al., 2020). Радиус C1 хондритового ядра для полностью дифференцированного Титана оценивается ≈ 2000 км. Были проведены расчеты тепловой эволюции протоядра Титана для различных моделей внутреннего строения с учетом состава, конвективного теплопереноса и возможных процессов дегидратации гидросиликатов в недрах железокремнистого протоядра. Состав ядра моделируется гомогенной смесью силикатов и гидросиликатов. Принимается следующая модель образования протоядра Титана. На последней стадии аккреции температура в приповерхностной области спутника достигает температуры плавления льда. В результате происходит сепарация вещества верхних областей на воду и железокремнистую компоненту, которая затем мигрирует к центру спутника. Образуется область, состоящая из железокремнистой компоненты и льда. Процесс нагрева энергией радиоактивного распада до температуры ~ 500 К, перераспределения льда, воды и породы занимает около 500 млн лет (Castillo-Rogez, Lunine, 2010). В дальнейшем нагрев ядра происходит за счет радиоактивных источников энергии.

В результате проведенных расчетов показано, что при концентрации гидросиликатов $C_{\text{HS}} \geq 0.9$, или радиусе ядра $R_{\text{core}} < 500$ км процессы дегидратации в ядре не происходят. Таким образом, в ядре Титана с первоначальным составом C1 хондритов не может быть образовано внутреннее силикатное ядро.

Работа выполнена в рамках госзадания ГЕОХИ РАН.

Литература:

- Dunaeva A.N., Kronrod V.A., Kuskov O.L. (2016) Physicochemical models of the internal structure of partially differentiated Titan, *Geochem. Int.* 54(1): 27–47.
- Castillo-Rogez J.C., Lunine J.I. (2010) Evolution of Titan’s rocky core constrained by Cassini observations. *Geophys. Res. Lett.* 37: L20205.
- Fortes A.D. (2012) Titan’s internal structure and the evolutionary consequences. *Planet. and Space Sci.* 60: 10–17.
- Kronrod V.A., Dunaeva A.N., Gudkova T.V., Kuskov O.L. (2020) Matching of Models of the Internal Structure and Thermal Regime of Partially Differentiated Titan with Gravity Field. *Solar System Research* 54(5): 405–419.
- Kuskov O.L., Kronrod V.A. (2001) Core sizes and internal structure of Earth’s and Jupiter’s satellites. *Icarus* 151: 204–227.

Согласование сейсмических, селенодезических и геохимических данных о внутреннем строении Луны.

Кронрод Е.В.¹, Мацумото К.², Кусков О.Л.¹, Кронрод В.А.¹

¹*GEOXИ РАН, Москва e.kronrod@gmail.com;*

²*RISE Project, NAOJ, Mizusawa, Japan*

С помощью метода Монте-Карло по схеме цепей Маркова проведено согласование трех наиболее важных, но не связанных напрямую, наборов сейсмических, селенодезических и геохимических данных (времена пробега сейсмических волн по данным «Аполлон», средняя масса (M) и момент инерции (MOI), приливное число Лява (k_2), добротность, модели валового состава Луны (BSM – bulk silicate Moon)) для определения состава и внутренней структуры четырехслойной мантии, переходного слоя пониженной вязкости (LVZ), жидкого внешнего и твердого внутреннего ядра (Kronrod et al., 2022). Отличительной особенностью этого подхода является включение геохимических параметров в качестве наблюдаемых значений при расчете функции правдоподобия в сочетании с расчетами фазовых равновесий. Рассмотрено влияние валового состава с разным содержанием оксида алюминия (модели E с «земными» значениями Al_2O_3 и модели M с более высоким содержанием Al_2O_3) и вариаций температурных профилей на геохимические и геофизические параметры мантии, слоя LVZ и ядра. Результаты инверсии (рис. 1) показывают, что все успешные модели E и M сгруппированы вокруг валового содержания FeO 11-13 масс.% и Mg# 79-81, что указывает на значительную разницу в составе силикатной Земли (BSE – bulk silicate Earth) и ее спутника. Первичная нижняя мантия (= BSM) обогащена Al по сравнению с вышележащими дифференцированными слоями: ~4.5% Al_2O_3 (1 × BSE) для моделей E и ~6 масс.% Al_2O_3 (1.5 × BSE) для моделей M. Полученные в результате инверсии скорости продольных волн в диапазоне 3600–4100 м/с и плотности в диапазоне 6200–7000 кг/м³ для внешнего ядра радиусом 300–350 км согласуются с данными по скоростям (но не плотности) и радиусом внешнего ядра Луны по данным Weber et al. (2011).

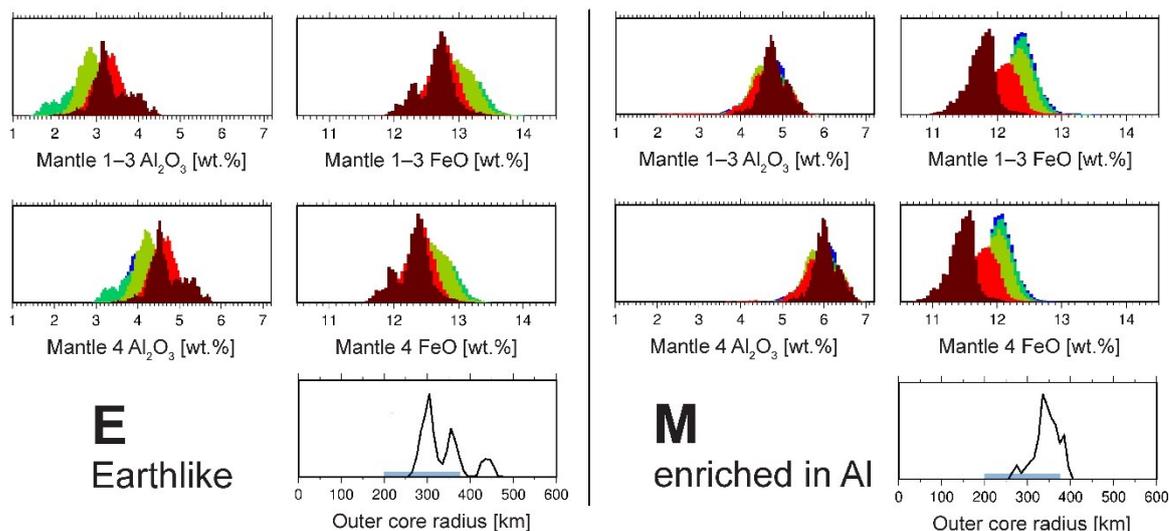


Рис. 1. Результаты инверсии для двух моделей состава – близкого к земному и обогащенному оксидом алюминия.

Работа выполнена в рамках госзадания Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН.

Литература:

- Kronrod E., Matsumoto K., Kuskov O.L., Kronrod V., Yamada R., Kamata S. (2022) Towards geochemical alternatives to geophysical models of the internal structure of the lunar mantle and core. *Advances in Space Research* 69 (7): 2798–2824. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.01.012>
- Weber R.C., Lin P., Garnero E.J., Williams Q., Lognonné P. (2011) Seismic detection of the lunar core. *Science* 331: 309–312. <https://doi.org/10.1126/science.1199375>

Сейсмоакустические исследования небольших акваторий на примере озера Сабакты (Республика Башкортостан)

Крылов П.С., Нурғалиев Д.К., Ясонов П.Г.

*КФУ, ИГиНГТ, Кафедра геофизики и геоинформационных технологий
pskrylov@kpfu.ru*

Изучение донных отложений внутриконтинентальных водоемов позволяет получить данные высокого разрешения об изменении климата за последние тысячелетия. Для обнаружения наиболее полной стратиграфической записи обычно проводятся сейсмоакустические исследования на акватории (Krylov et al., 2019). Однако существует ряд технологических сложностей, обусловленных как отсутствием необходимых плавсредств и аппаратуры, так и невозможностью их использования на малых глубинах. Разработанный в ИГиНГТ КФУ компактный сейсмоакустический комплекс успешно позволяет решить данные проблемы. Работы проводятся с резиновой надувной лодки, которую можно использовать практически на любом водоеме.

В 2019 году было исследовано небольшое озеро Сабакты, диаметр которого едва превышает 1 км. На сейсмоакустическом разрезе отчетливо видна структура залегания донных отложений. Максимальная глубина достигает 7 метров, мощность донных отложений достигает 4.5 м (рис. 1). Оси синфазности отраженных волн образуют субпараллельный рисунок в отрицательной форме рельефа. Несмотря на небольшую глубину, в озере накопилась значительная толща донных отложений, что говорит об относительно большом возрасте озера, и содержится информативный архив климатических событий данного региона за последние несколько тысяч лет. Сейсмический разрез разделен на 2 фации. Первая фация (до 3 м) характеризуется акустически прозрачной картиной. Вероятно, это водонасыщенные глинистые илы, относящиеся к Голоцену. Ниже по разрезу наблюдается вторая фация (до 1.5 м), характеризующаяся более интенсивными отражениями от отложений, вероятно, связанных с ледниковыми отложениями. Далее по разрезу наблюдается акустический фундамент, ниже которого акустическая энергия не проникла. Местами встречаются газонасыщенные отложения. В этих областях наблюдается небольшое поднятие, вероятно, связанное с «набуханием» донных отложений по мере увеличения концентрации газа в осадках.

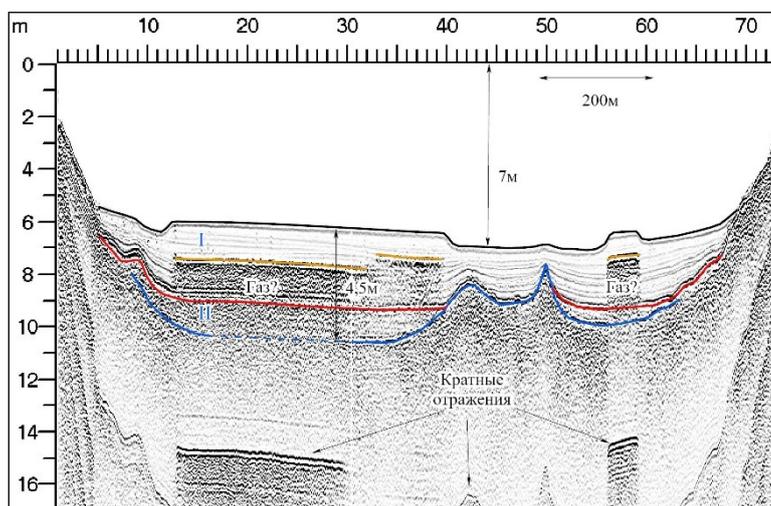


Рис. 1. Сейсмоакустический разрез озера Сабакты.

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной КФУ для выполнения государственного задания № 671-2020-0049 в сфере научной деятельности.

Литература:

Krylov P., Nurgaliev D., Yasonov P. (2019) Seismic investigations of lakes sediments as the basis of paleogeographic and paleoclimatic reconstructions. SGEM 19(1.1): 913–921.

Изучение космического вещества в осадках озера Банное, Южный Урал, Россия

Кузина Д.М.¹, Воронов К.А.¹, Юсупова А.Р.¹, Рогов А.М.²

¹Казанский Федеральный Университет, Институт Геологии и Нефтегазовых Технологий, Казань *di.kuzina@gmail.com*;

²Казанский Федеральный Университет, Междисциплинарный Центр Аналитическая Микроскопия, Казань

Осадки озера Банное изучались с целью обнаружения внеземного вещества. Банное (53°35'48.13" с.ш. 58°37'47.28" в.д.) находится на Южном Урале, Россия. Длина исследованного керна 5.06 метра и, в соответствии с радиоуглеродным датированием, возраст осадков составляет ~12.5 тыс. лет. Сейсмоакустические исследования показали, что осадки стратифицированы и не перемешаны в точках отбора. Известно, что микрометеориты и космическая пыль могут быть обнаружены в различных типах отложений и горных пород (Kuzina et al., 2016; 2017; Печерский и др., 2013; Rudraswami et al., 2011), и что их магнитные свойства могут быть использованы для отбора образцов, содержащих внеземное вещество, и их дальнейших исследований. Термомагнитные исследования были проведены для всех образцов керна. Шесть из них, в которых обнаружилось присутствие железоникелевых сплавов (температура Кюри выше 690°C) и, в некоторых случаях, магнетита (температура Кюри ~580°C) были выбраны для магнитной сепарации и дальнейших исследований.

Дифференциальный термомагнитный анализ был проведен для изучения магнитных минералов. Получены температурные зависимости индуктивной намагниченности до 800°C при скорости нагрева 100°C/мин в магнитном поле 0.4 Тл. Кривые первого и второго нагрева позволяют оценить возможные минералогические превращения в образце. Морфология и элементный состав магнитных сепаратов были исследованы с помощью сканирующего электронного микроскопа «Merlin» Carl Zeiss, в Междисциплинарном центре Аналитическая микроскопия, КФУ.

По данным термомагнитного анализа образцы с Fe-Ni сплавами распределены по керну неравномерно и обнаружены в 48 образцах из 250. Наибольшее количество образцов с железоникелевыми сплавами обнаружено в отложениях возрастом 6200, 8800 и 12000 лет.

Микроскопические исследования показали наличие микрометеоритов во всех исследованных образцах. Форма частиц от круглой до яйцевидной. Размер частиц варьируется от 5 до 30 микрон. Почти все микрочастицы имеют специфическую волнистую поверхность. Обнаружение различий внеземного вещества во времени полезно для понимания изменений в составе падающего на поверхность Земли материала. Также интересным аспектом изучения является выявление интервалов с увеличенным содержанием космических объектов, что позволяет сделать выводы об увеличении потока космического вещества на Землю.

Работа выполнена за счет гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук № МК-4100.2021.1.5.

Литература:

- Kuzina D.M., Nurgaliev D.K., Pechersky D.M. (2016) Detection of the cosmic dust and micrometeorites in sediments using their magnetic properties. *Meteoritics & Planetary Science* 51 (S1): A397.
- Kuzina D.M., Kosareva L.R., Antonenko V.V., Knies J., Fabian K., Nurgaliev D.K. (2017) Magnetic investigations of ocean sediments from Hole 910C for detection extraterrestrial matter. *Meteoritics & Planetary Science*. 52(S1): A188.
- Rudraswami N.G., Parashar K., Shyam Prasad M. (2011) Micrometer and nanometer size platinum group nuggets in micrometeorites from the deep sea sediments of Indian Ocean. *Meteoritics & Planetary Science*. 46: 470–491.
- Печерский Д.М., Гильманова Д.М., Иванов Е.В., Кузьмин М.И., Марков Г.П., Нургалиев Д.К., Цельмович В.А. (2013) Самородное железо в осадках озера Байкал (скважина BDP-98): результаты термомагнитного анализа. *Геология и геофизика* 54(9): 1336–1347.

Геохимия редкометалльных фоскоритов и карбонатитов щелочно-ультраосновного массива Вуориярви, Кольский п-ов.

Липницкий Т.А., Сорохтина Н.В.

ГЕОХИ РАН, Москва tima199710@gmail.com

Щелочной магматизм на Кольском полуострове достиг наибольшей активности в палеозое, объем выплавки щелочных пород для этого периода оценивается в 15000 км³ (Арзамасцев, Митрофанов, 2009). Массив Вуориярви – типичный представитель палеозойских щелочно-ультраосновных интрузий, объединяет участки с контрастной рудной специализацией: Тухтавара с P-Fe-Ti, Нескевара с Nb-REE-Th и Пятянваря с REE-Ba-Sr рудами. Исследована минералогия и геохимия пород карбонатитовой серии редкометалльного месторождения Нескевара, штокверковые тела этих пород располагаются в ЮВ части массива на площади 3 км², прорывают пироксениты и ийолиты, метасоматизируя их. Главными типами пород с редкометалльной минерализацией являются дипсид-амфиболовые фоскориты, флогопит-кальцитовые, тетраферрифлогопит-кальцит-доломитовые и доломит-анкеритовые карбонатиты с наложившей гидротермальной минерализацией, представленной барит-карбонатными жилами. Редкометалльные минералы представлены минералами группы пирохлора (до 8 об.% в рудных участках пород), бадделеитом, цирконолитом, цирконом, водосодержащими силикатами и оксидами Nb.

Карбонатиты по составу петрогенных компонентов и классификации (Woolley, Kempe, 1989), отвечают кальцио-, магнизио- и феррокарбонатитам. Эволюция карбонатитового расплава проходит в сторону увеличения железистости и смены основного карбоната кальцита доломитом и анкеритом. Конфигурация кривых распределения микроэлементов для клинопироксенитов (CPx), фоскоритов (Ph) и карбонатитов (CC) близка (рис. 1а). Кальцит-доломитовые карбонатиты обогащены Nb, Th, TR, Ba и Sr по отношению к более ранним магматическим породам. Хондрит-нормализованное распределение TR (рис. 1б) показывает, что поздние карбонатиты обогащены редкими землями (LREE > HREE). Рудные концентрации TR, Ba и Sr характерны для доломитовых карбонатитов и барит-карбонатных жил.

Работа выполнена по Госзаданию ГЕОХИ РАН.

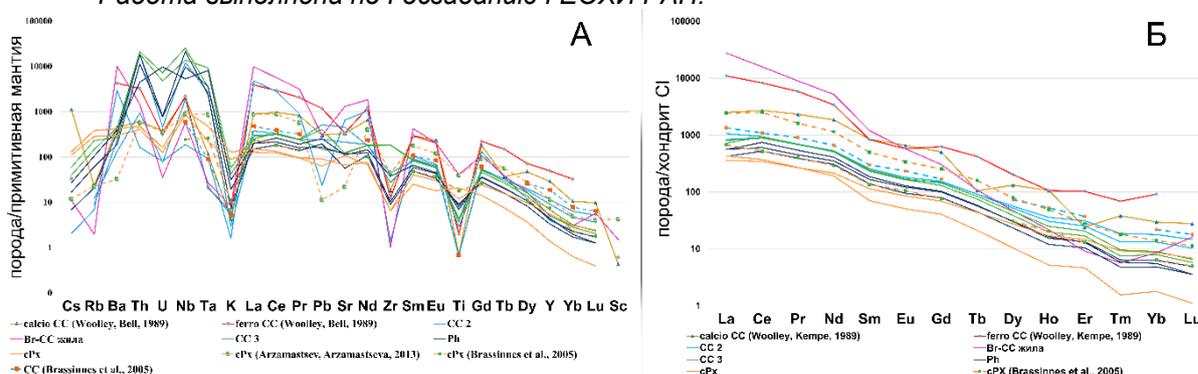


Рис. 1. Распределение микроэлементов в породах участка Нескевара, массив Вуориярви, Кольский п-ов по оригинальным и литературным данным (Arzamastsev, Arzamastseva, 2013; Brassinnes et al., 2005).

Литература:

- Арзамасцев А.А., Митрофанов Ф.П. (2009) Палеозойские плюм-литосферные процессы в северо-восточной Фенноскандии: оценка состава первичных мантийных расплавов и условий магмогенерации. *Петрология* 17: 324–336.
- Arzamastsev A.A., Arzamastseva L.V. (2013) Geochemical indicators of the evolution of the ultrabasic-alkaline series of Paleozoic massifs of the Fennoscandian shield. *Petrology* 21: 249–279.
- Brassinnes S., Balaganskaya E., Demaiffe D. (2005) Magmatic evolution of the differentiated ultramafic, alkaline and carbonatite intrusion of Vuoriyarvi (Kola Peninsula, Russia). A LA-ICP-MS study of apatite. *Lithos* 85: 76–92.
- Woolley A.R., Kempe D.R.C. (1989) Carbonatites: Nomenclature, average chemical compositions and element distribution. In *Carbonatites: genesis and evolution*. Unwin Hyman, London: 1–14.

Влияние карбонатов и водно-углекислых флюидов на процессы гранитообразования при высокотемпературном метаморфизме: природные, экспериментальные и термодинамические данные

Митяев А.С.^{1,2}, Сафонов О.Г.^{1,2}, Варламов Д.А.¹

¹ИЭМ РАН, Черноголовка *classic_ten@mail.ru*;

²Геологический факультет МГУ, Москва

Гранитоидный магматизм – это процесс, ведущий к росту континентальной коры. Образование гранитоидных магм связано с процессами высокотемпературного метаморфизма и анатексиса в нижней и средней коре, где метаморфические минеральные ассоциации могут выступать как релиты от частичного плавления разнообразных коровых субстратов. Метаморфизм в низах коры характеризуется специфическим флюидным режимом, в котором заметную роль играет CO₂. В данной работе обсуждаются некоторые аспекты связи между гранитообразованием и наличием водно-углекислых флюидов в областях высокотемпературного метаморфизма на примере гранулитового комплекса Лимпопо, расположенного между кратонами Каапвааль и Зимбабве (ЮАР). Эксгумация Южной Краевой Зоны (ЮКЗ) комплекса Лимпопо ознаменована мощными проявлениями гранитоидного магматизма, принципиальной особенностью которого является участие в нем богатых CO₂ флюидов. Это подтверждается обилием углекислых флюидных включений в минералах гранитоидов, находками первичных карбонатно-силикатных полифазных микровключений в гранатах и наличием высокотемпературного графита в некоторых образцах (Safonov et al., 2018, 2020), реакциями карбонатизации во вмещающих породах, а также оценками состава флюида на основе минеральных ассоциаций, указывающих на заметное преобладание CO₂ ($X_{CO_2} > 0.5-0.6$) во флюиде (Safonov et al., 2018). Изучение карбонатно-силикатных включений в гранатах и близость изотопного состава углерода флюидных включений и графита в лейкократовых гранитоидах ЮКЗ (Safonov et al., 2018, 2020) с изотопным составом углерода карбонатов из пород зеленокаменных поясов кратона Каапвааль (Митяев и др., 2020) позволило предположить, что источником для магм и флюидов могут являться низкометаморфизованные породы зеленокаменных поясов кратона, на которые были надвинуты гранулиты ЮКЗ.

Экспериментальное исследование процессов частичного плавления карбонатсодержащих пород в условиях высокотемпературного метаморфизма демонстрируют возможность образования гранитоидных магм различного состава совместно с (водно-) углекислыми флюидами в карбонатсодержащем источнике при P-T условиях в средней и нижней коре. Присутствие Са-граната, цоизита, клинопироксена или двупироксеновых ассоциаций (в зависимости от состава протолита) может рассматриваться как минералогический индикатор этого процесса.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 2035-90013 для аспирантов и гранта РНФ № 18-1700206-П.

Литература:

- Митяев А.С., Сафонов О.Г., Реутский В.Н., Изох О.П., Варламов Д.А., Козловский, В.М., Аранович Л.Я. (2020) Изотопные характеристики карбонатов пород зеленокаменных поясов как индикатор возможного источника флюидов в гранулитовых комплексах докембрия: пример из зеленокаменного пояса Гияни и гранулитового комплекса Лимпопо (ЮАР). Доклады Российской академии наук. Науки о Земле 492: 66–70.
- Safonov O.G., van Reenen D.D., Yapaskurt V.O., Varlamov D.A., Mityaev A.S., Butvina V.G., Golunova M.A., Belyanin G.A., Smit C.A. (2018) Thermal and fluid effects of granitoid intrusions on granulite complexes: examples from the Southern Marginal Zone of the Limpopo Complex, South Africa. *Petrology* 26: 633–658.
- Safonov O.G., Mityaev A.S., Yapaskurt V.O., Belyanin G.A., Elburg M., Rajesh H.M., Golunova M.A., Shcherbakov V.D., Butvina V.G., van Reenen D.D., Smit A.C. (2020) Carbonate-silicate inclusions in garnet as evidence for a carbonate-bearing source for fluids in leucocratic granitoids associated with granulites of the Southern Marginal Zone, Limpopo Complex, South Africa. *Gondwana Res.* 77: 147–167.

Реконструкция условий образования титанита в эклогите из кимберлитовой трубки Удачная

Михайленко Д.С.^{1,2}, Корсакова А.В.¹, Аулбах С.³, Губанов Н.В.¹, Якушик М.А.⁴, Шу Ю-Г.².

¹ИГМ СО РАН, Новосибирск mikhailenkodenis@gmail.com; ²Институт геохимии КАН и ЦИГСЗ, Гуанчжоу, Китай yigangxu@gig.ac.cn; ³Институт наук о Земле, Франкфурт-на-Майне, Германия s.aulbach@em.uni-frankfurt.de; ⁴ИЭМ РАН, Черноголовка yakush.mihai@yandex.ru.

Среди глубинных включений в кимберлитах значительную роль играют эклогиты, среди которых преобладают биминеральные высокобарические разности, состоящие из граната и омфацита, в то время как кианитовые и коэсит-кианитовые эклогиты являются более редкими разновидностями (Соболев, 2006). Типичным акцессорным минералом в этих эклогитах является рутил, который является главным минералом-концентратором высокозарядных элементов (HFSE). Наряду с рутилом, другим акцессорным минералом является значительно более редкий титанит (сфен), $[\text{Ca}(\text{Ti}, \text{Al}, \text{Fe}^{3+})\text{SiO}_4(\text{O}, \text{F}, \text{OH})]$, который также является минералом-концентратором HFSE. До настоящего времени титанит в ксенолитах эклогитов из кимберлитов, насколько нам известно, в литературе описан не был.

Ксенолит эклогита Uv-180 найден в свежем кимберлите трубки "Удачная-Восточная". Главные минералы эклогита представлены бледно-оранжевым гранатом (20 об.%), серовато-зеленым омфацитом (57 об.%) и ярко-голубым кианитом (17 об.%), среди которых присутствуют розовые зерна титанита (6 об.%). Акцессорные минералы представлены рутилом, кальцитом и коэситом. Следует отметить неоднородное распределение породообразующих минералов в пределах ксенолита. Распространение титанита в пределах образца неравномерное, без каких-либо пространственных закономерностей. Субидiomорфные зерна титанита (100-300 мкм) диагностированы в межзерновом пространстве между гранатом, омфацитом и кианитом, в то время как включения титанита в породообразующих минералах отсутствуют. Титанит содержит примеси Al_2O_3 (~3 масс.%), F (0.7-1.0 масс.%), P_2O_5 (0.5-0.60 масс.%), Zr (260 гр/т) и Sr (717 гр/т). Редкоэлементный спектр титанита, нормированный к составу хондрита (McDonough, Sun, 1995), демонстрирует значительное обогащение легкими РЗЭ (~1000 хондритовых единиц) с плавным уменьшением к промежуточным и тяжелым РЗЭ (~10 хондритовых единиц). Европиевая аномалия в титаните практически отсутствует $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 1.04$.

Кристаллизация породообразующих минералов (гранат+омфацит+кианит) и акцессорного рутила на пике метаморфизма происходила совместно при 3.5 ± 0.32 ГПа и $920 \pm 65^\circ\text{C}$. Согласно нашим минералого-петрографическим наблюдениям, таким как отсутствие включений титанита в породообразующих минералах и его нахождение в межзерновом пространстве, можно сделать вывод о более позднем образовании титанита в изученном образце, вероятнее всего, в процессе метасоматического воздействия флюида/расплава. Присутствие кальцита в межзерновом пространстве, а также в виде включений в гранате, указывает на существенную роль карбонатного расплава/флюида при кристаллизации первичных породообразующих минералов, а образование кальцит-содержащего симплектита вокруг титанита в изученном образце, вероятнее всего, связано с транспортировкой ксенолита кимберлитовым расплавом к поверхности (например, Carswell et al., 1996). Следует отметить, что следов перекристаллизации рутила в титанит в изученном образце не обнаружено, в отличие от пород Западного Тянь-Шаня, что заслуживает более детального и прецизионного изучения эклогита Uv-180 в дальнейшем.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ № 21-77-10006.

Литература:

- Соболев Н.В. (2006) Коэсит как индикатор сверхвысоких давлений в континентальной литосфере. Геология и Геофизика 47(1): 95–104.
McDonough W.F., Sun S.-s. (1995). The composition of the Earth. Chemical Geology: 223–253.
Carswell D.A., Wilson R.N., Zhai M. (1996) Ultra-high pressure aluminous titanites in carbonate-bearing eclogites at Shuanghe in Dabieshan, central China. Mineralogical Magazine 60(400): 461–471.

Катодолюминесцентная спектроскопия в исследовании цирконов метеоритных кратеров (Вредефорт, Кара, Янисъярви)

Михалевский Г.Б., Замятин Д.А., Замятина Д.А.

ИГГ УрО РАН, Екатеринбург half-lifes@yandex.ru

Циркон является тугоплавким минералом, благодаря чему он сохраняется при высоких давлениях и температурах, реализующихся в результате ударного воздействия метеоритов на породах мишени. В цирконе формируются деформационные микроструктуры, высокобарические полиморфные фазы, происходит разложение на простые оксиды и/или вторичные преобразования под действием флюидов. Их исследование позволяет получать данные о протекавших процессах при формировании метеоритных кратеров. Катодолюминесцентная (CL) спектроскопия является структурно- и химически-чувствительным методом исследования, который в реализации на сканирующем электронном микроскопе (SEM) позволяет анализировать люминесцентные свойства с локальностью ~1 мкм. Настоящая работа посвящена исследованию цирконов с деформационными структурами и вторичными изменениями методом катодолюминесцентной спектроскопии с микронным пространственным разрешением с целью установления характерных особенностей люминесцентных свойств цирконов импактного происхождения.

Спектры, изображения и гиперкарты катодолюминесценции регистрировались в образцах кратеров Вредефорт, Кара и Янисъярви на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6390LV с КЛ спектрометром HORIBA H-CLUE iHR500, в диапазоне длин волн 180-900 нм. Карты дифракции отраженных электронов (EBSD) получены на СЭМ TESCAN MIRA LMS, оборудованном детектором дифракции отраженных электронов Oxford Instruments NordlysNano.

Цирконы представлены зонами с первичной ростовой зональностью и с вторичными изменениями (рис. 1а и 1б). CL-спектры существенно различаются. Зоны вторичных изменений имеют менее интенсивные широкие люминесцентные полосы, но более интенсивные узкие (рис. 1в). В зернах циркона проявляются планарные и сдвиговые деформации, плоские трещины, микродвойники. Исследована зависимость CL-спектров от ориентации кристаллической решетки. Предлагается объяснение природы выявленных особенностей CL-спектров.

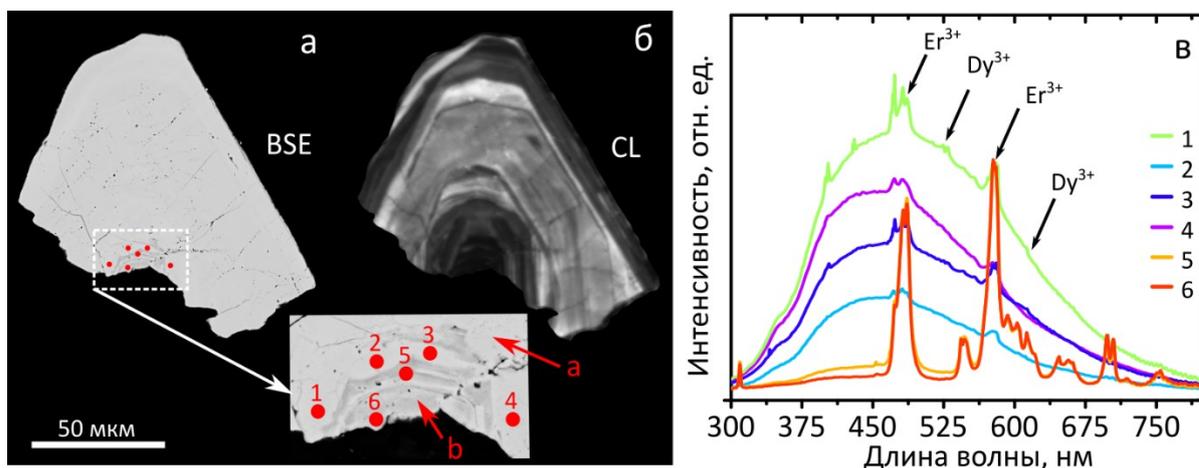


Рис. 1. Циркон с вторичными изменениями кратера Вредефорт. (а) BSE-изображение (а – зоны с ростовой зональностью, б – зоны с вторичными изменениями, 1-6 – точки регистрации CL-спектров); (б) CL-изображение; (в) CL-спектры (1-4 – соответствующие спектры в зонах с ростовой зональностью; 5, 6 – во вторично-измененных зонах).

Работа выполнена в ЦКП УрО РАН «Геоаналитик» и поддержана Российским Научным Фондом, проект № 21-77-10019, <https://rscf.ru/project/21-77-10019/>. Дооснащение и развитие ЦКП «Геоаналитик» осуществляется при поддержке гранта Минобрнауки РФ, Соглашение № 075-15-2021-680.

Первые результаты изучения составов оливина и расплавных включений в пикробазальтовых лавах массива г. Большой Тигиль (Срединный хребет, Камчатка)

Некрылов Н.А.¹, Волынец А.О.¹, Овсянников Г.Н.^{1,2}, Толстых М.Л.³, Горбач Н.В.¹, Щербаков В.Д.², Плечова А.А.³, Певзнер М.М.⁴, Бабанский А.Д.⁵

¹ИВиС ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский *nekrilov.n@gmail.com*;

²Геологический факультет МГУ, Москва; ³ГЕОХИ РАН, Москва;

⁴ГИН РАН, Москва; ⁵ИГЕМ РАН, Москва

В ходе изучения крупной региональной зоны разрывных нарушений, секущей Срединный хребет в северо-восточном направлении в районе массива горы Большой Тигиль, нами были обнаружены и изучены лавы уникального для четвертичного вулканизма Камчатки пикробазальтового состава (Волынец и др., 2021). Согласно результатам К-Аг изотопного датирования, их излияния произошли около 1.5 млн лет назад (Певзнер и др., 2022). Нами были проанализированы составы кристаллов оливина (Ol) и содержащихся в них расплавных включений (Pv) в двух образцах пикробазальтов массива г. Большой Тигиль.

Изученные Ol обладают уникально высокой магнезиальностью для вулканических пород Камчатки, достигающей 92.65 мол.%. Столь высоко-Mg Ol в пределах Камчатки до сих пор был описан только в высоко-K базальтах вулкана Шивелуч (Горбач, Портнягин, 2011). Изученные кристаллы характеризуются бимодальностью составов по содержанию CaO (~0.2 масс.% CaO и ~0.1 масс.% CaO). Низко-Ca группа характеризуется повышенными значениями Fe/Mn (до 78.5) и NiO. Состав высоко-Ca Ol соответствует кристаллизации из расплава, имевшего перидотитовый источник; низко-Ca Ol может отражать присутствие в магматической системе расплавов из источника другого состава, возможно, пироксенитового (Sobolev et al., 2007).

Все кристаллы Ol-хозяина изученных Pv соответствуют высоко-Ca группе. Петрогенные компоненты состава расплавов, рассчитанного с учетом потери железа (Danyushevsky, Plechov, 2011), почти идеально соответствуют валовому составу лав массива г. Б. Тигиль. Измерены содержания летучих компонентов в расплавах, масс.‰: до 0.25 SO₃, 0.026±0.004 Cl и 0.087±0.009 F, что соответствует полученным ранее оценкам для голоценовых вулканитов Срединного хребта (Nekrylov et al., 2021). По методике (Portnyagin et al., 2019) оценены начальные содержания воды в Pv: от ~0.8 до 3.2 масс.‰ (при ΔH₂O/ΔSiO₂ от 0.5 до 2, соответственно).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-05-00085.

Литература:

- Волынец А.О., Горбач Н.В., Толстых М.Л., и др. (2021) Уникальная зона пикробазальтового и высоко-Mg базальтового моногенного вулканизма в Срединном хребте Камчатки. Материалы XXIV Всероссийской научной конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН: 18–21.
- Горбач Н. В., Портнягин М. В. (2011) Геологическое строение и петрология лавового комплекса вулкана Молодой Шивелуч (Камчатка). Петрология 19(2): 140–172.
- Певзнер М.М., Толстых М.Л., Волынец А.О. и др. (2022) Миграция позднеплиоцен-четвертичной вулканической и сейсмической активности (Срединный хребет, Камчатка). Материалы VIII Российской конференции по изотопной геохронологии. Санкт-Петербург: ИГГД РАН: 110–111.
- Danyushevsky L.V., Plechov P. (2011) Petrolog3: Integrated software for modeling crystallization processes, *Geochem. Geophys. Geosyst.* 12: Q07021.
- Nekrylov N., Popov D., Plechov P., et al. (2021) The origin of the Late Quaternary back-arc volcanic rocks from Kamchatka: evidence from the compositions of olivine and olivine-hosted melt inclusions. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 176(9): 1–20.
- Portnyagin M., Mironov N., Botcharnikov R., et al. (2019) Dehydration of melt inclusions in olivine and implications for the origin of silica-undersaturated island-arc melts. *Earth and Planetary Science Letters* 517: 95–105.
- Sobolev A.V., Hofmann A., Kuzmin D., et al. (2007) The amount of recycled crust in sources of mantle-derived melts. *Science* 316 (5823): 412–417.

Оценка объемов поступления ртути на термальных полях Кошелевского вулканического массива (Камчатка)

Нуждаев А.А.

ИВиС ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский nuzhdaev@gmail.com

Современный гидротермальный процесс наряду с вулканизмом являются основными источниками поступления ртути на земную поверхность. При этом Hg является токсичным элементом, оказывающим влияние на биосферу. В последние годы во всем мире остро стоит вопрос о сокращении антропогенного выноса ртути. В связи с этим, для понимания объемов поступления необходимо знать объем природной эмиссии данного элемента. Известно, что для многих гидротермальных систем в районах современного вулканизма характерны повышенные концентрации ртути (Трухин и др., 1986; Рычагов и др., 2009, 2014; Bagnato, 2009, 2018; Sun et al., 2020; Tassi et al., 2016; Cabassi et al., 2021).

В результате работ, проводимых на термальных полях Кошелевского вулканического массива в полевые сезоны 2005-2019 гг., было накоплено большое количество данных о концентрациях ртути в различных типах гидротермальных растворов. Для количественной оценки объемов выноса ртути с термальных полей Кошелевской гидротермальной системы было рассчитано значение потока выноса ртути парогазовыми струями на единицу площади поля. Зная площадь поля, объемы выносимого с поля пара, концентрацию ртути в конденсатах пара, а также количество конденсата, получаемого с единицы объема пара, установлено, что для термальных полей Кошелевской гидротермальной системы эти значения составляют 2.9×10^{-4} г/(сут \times м²) для Нижне-Кошелевского и 2.1×10^{-4} г/(сут \times м²) для Верхне-Кошелевского термального поля.

Таким образом, в результате проведенной работы впервые были посчитаны объемы выноса ртути парогазовыми струями, рассчитаны значения плотности потока ртути для Нижне- и Верхне-Кошелевского термальных полей.

Литература:

- Рычагов С.Н., Нуждаев А.А., Степанов И.И.* (2009) Поведение ртути в зоне гипергенеза геотермальных месторождений (Южная Камчатка). *Геохимия* 5: 533–542.
- Трухин Ю.П., Степанов И.И., Шувалов Р.А.* (1986) Ртуть в современном гидротермальном процессе. Наука, Москва. 199 с.
- Bagnato E., Allard P., Parello F., Aiuppa A., Calabrese S., Hammouya G.* (2009) Mercury gas emissions from La Soufrière Volcano, Guadeloupe Island (Lesser Antilles). *Chemical Geology* 266: 267–273.
- Bagnato E., Viveiros F., Pacheco J.E., D'Agostino F., Silva C., Zanon V.* (2018) Hg and CO₂ emissions from soil diffuse degassing and fumaroles at Furnas Volcano (São Miguel Island, Azores): gas flux and thermal energy output. *Journal of Geochemical Exploration* 190: 39–57.
- Tassi F., Cabassi J., Calabrese S., Nisi B., Venturi S., Capecchiacci F., Vaselli O.* (2016) Diffuse soil gas emissions of gaseous elemental mercury (GEM) from hydrothermal-volcanic systems: an innovative approach by using the static closed-chamber method. *Applied Geochemistry* 66: 234–241.
- Sun W.J., & Cui Y.J.* (2020) Determining the soil-water retention curve using mercury intrusion porosimetry test in consideration of soil volume change. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 12(5): 1070–1079.
- Cabassi J., Venturi S., Di Bennardo F., Nisi B., Tassi F., Magi F., Vaselli O.* (2021) Flux measurements of gaseous elemental mercury (GEM) from the geothermal area of “Le Biancane” natural park (Monterotondo Marittimo, Grosseto, Italy): Biogeochemical processes controlling GEM emission. *Journal of Geochemical Exploration* 228: 106824.

Моделирование структуры Южно-Камбального Центрального термального поля по геофизическим данным (Южная Камчатка)

Нуждаев И.А., Букатов Ю.Ю., Феофилактов С.О.

ИВиС ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский van.one.df@mail.ru

Южная оконечность полуострова Камчатка характеризуется интенсивной и разнообразной геотермальной деятельностью, основная часть которой сосредоточена в Паужетско-Камбально-Кошелевском районе. Авторский коллектив с коллегами многие годы успешно проводит комплексные геофизические исследования на основных объектах этого района. Помимо разведанных Паужетского и Нижне-Кошелевского геотермальных месторождений, научный интерес вызывают термальные поля Камбального вулканического хребта. На высотах от 700 до 1000 м протягивается почти 10-километровая полоса с большим числом рассредоточенных выходов паровых струй. Термопроявления Камбального вулканического хребта объединяются в 3 группы термальных полей: Северо-, Центрально- и Южно-Камбальные. Наиболее интересной для исследований и мощной по выносу тепла (около 2000 ккал/сек) является Южно-Камбальная группа, расположенная в 7 км от активного кратера вулкана Камбальный (Белоусов и др., 1976).

С точки зрения геофизических исследований район Камбального вулканического хребта изучен крайне слабо. Наземные геофизические исследования на этом объекте авторами проведены впервые. Выполнена площадная магнитная съемка магнитометром GSM-19W на эффекте Оверхаузера (GEM, Канада) с шагом между пикетами 5 м, между профилями 25 м (Нуждаев и др., 2019). Электроразведочные работы методом вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ) выполнены симметричной четырехэлектродной расстановкой с использованием многофункционального измерителя МЭРИ-24 (ООО «Северо-Запад», Россия) и электроразведочного генератора АСТРА-100 (ООО «Северо-Запад», Россия). Зондирования проводились в 10 точках с разносами питающей линии до 900 м. Измерения проведены по профилю АОБ, длина которого составила 840 м. Расстояния между пикетами на термальной площадке составили 50 м, за ее пределами порядка 100 м. Полученные кривые зондирований обрабатывались в специализированном программном пакете IPI2win (Феофилактов и др., 2020). Гравиметрическая съемка проведена автоматическим микропроцессорным гравиметром CG-5 Autograv (Scintrex, Канада). Диапазон измерений прибора >7000 мГал, разрешающая способность при снятии показаний 0.001 мГал. Геодезическое обеспечение осуществлялось GPS станциями Leica GR 10 с антеннами AR 10. Одна станция использовалась в качестве базовой, другая перемещалась по профилю. Время записи на точках ≥ 15 мин. Гравиметрические наблюдения выполнены в 23 пунктах по профилю (АОБ) длиной 930 м.

Учитывая все полученные геофизические данные, а также априорную геологическую информацию, построена комплексная модель структуры Южно-Камбального Центрального термального поля по профилю АОБ на глубину до 400 м. Также проведено двумерное моделирование гравимагнитных данных в программном обеспечении GravMagInv2D (ООО ЛОЛГЕО, Россия). Выделены структурные неоднородности геологического разреза, контролирующие разгрузку гидротерм, а также область накопления гидротермальных растворов в центральной части поля.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда проект № 22-27-00019.

Литература:

- Белоусов В.И., Сугробов В.М., Сугрובה Н.Г. (1976) Геологическое строение и гидрогеологические особенности Паужетской гидротермальной системы. ДВНЦ: 23–57.
- Нуждаев И.А., Денисов Д.К., Феофилактов С.О. (2019) Магнитометрические исследования на термальных полях Камбального вулканического хребта (Южная Камчатка). ИВиС ДВО РАН: 163–166.
- Феофилактов С.О., Нуждаев И.А., Денисов Д.К. (2020) Строение зоны разгрузки парогидротерм Южно-Камбального Центрального термального поля по геофизическим данным (Южная Камчатка). ИВиС ДВО РАН: 227–230.

Модель извержений Ключевского вулкана

Озеров А.Ю.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский ozеров@ozеров.ru

Цель исследований – создание модели функционирования базальт-андезибазальтовых вулканов. В качестве главного объекта исследования выбран вулкан Ключевской, для которого характерны все типы базальтовых-андезибазальтовых извержений, вулкан извергается практически ежегодно.

Работы проводились по следующим основным направлениям: геологическому, петролого-геохимическому, вулканологическому, геофизическому, газогидродинамическому. Кроме того, выполнено конструирование приборов, физическое моделирование и синтез составляющих частей модели.

Для решения поставленных задач автором разработаны три оригинальные методики: в сейсмологии – анализа вулканического дрожания (эквидистантный поинтервальный отсчет), в петрологии – парного изучения составов твердофазных микровключений в минерале-хозяине, и в физике – газогидродинамического моделирования вертикальных питающих магматических систем. Спроектирована и изготовлена экспериментальная аппаратура нового поколения – установка физического моделирования динамики извержений (высота 18 метров). Установка позволяет моделировать процессы, происходящие в питающих системах вулканов, и не имеет аналогов в мире.

В итоге проведенных исследований установлены: механизм эволюции магм Ключевского вулкана, механизмы периодичностей в динамике извержений, механизмы структурирования вертикальных магматических потоков, механизмы ГДП-землетрясений. Синтез результатов исследований позволил свести воедино ведущие динамические процессы, обеспечивающие извержение вулкана, и впервые создать модель функционирования базальтового-андезибазальтового вулкана (рис. 1). Модель представляет совокупное поведение главных составляющих компонентов питающей системы вулкана и их взаимодействие на разных этапах деятельности вулкана: 1 – во время вершинного извержения, 2 – в межэруптивный период и 3 – во время побочного извержения.

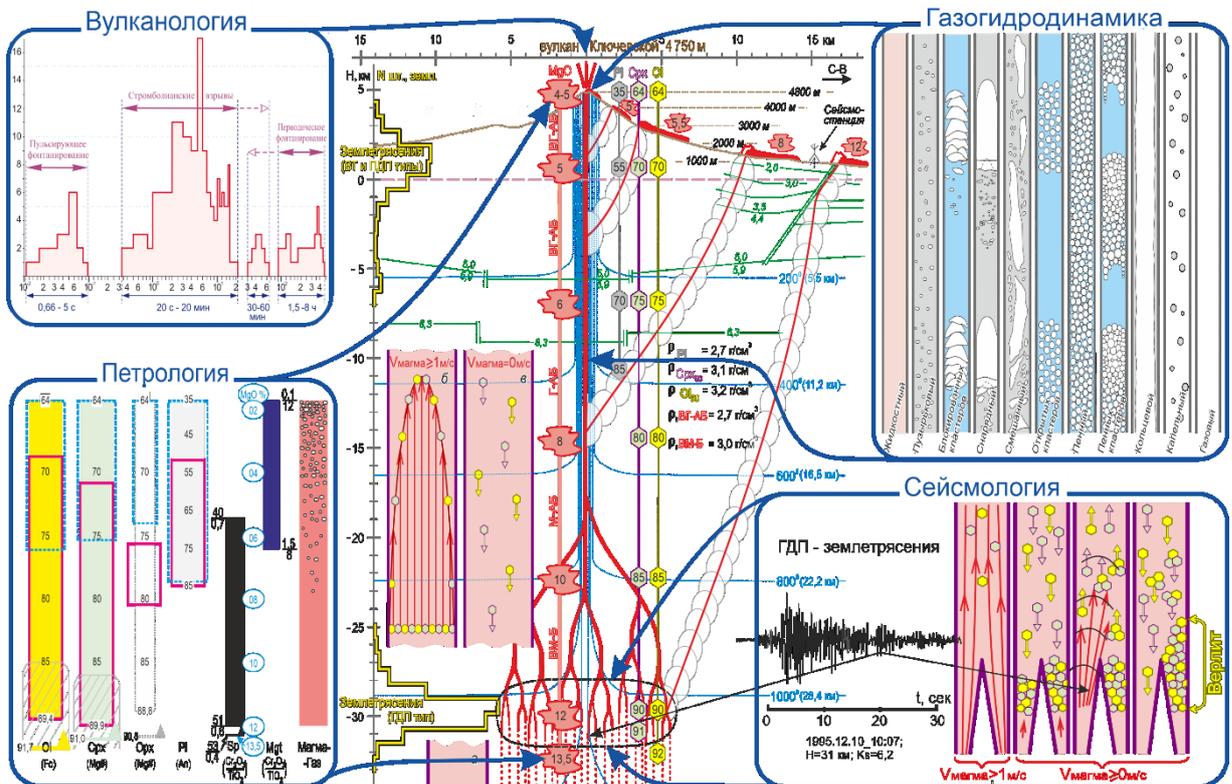


Рис. 1. Вулканолого-генетическая модель функционирования Ключевского вулкана.

Определение источников загрязнения в г. Челябинск с использованием изотопов Zn и Pb

Окунева Т.Г., Селезнев А.А., Киселева Д.В.

ИГГ УрО РАН, Екатеринбург okunevatatjana@mail.ru

Загрязнение окружающей среды является одной из наиболее значимых проблем, влияющих на здоровье населения. Одной из важнейших задач является изучение распределения источников загрязнения. Соотношение изотопов Zn и Pb представляет исключительный интерес, так как данные металлы являются неотъемлемым компонентом различных искусственных материалов, и их геохимические циклы в значительной степени изменены антропогенной деятельностью.

Цель настоящей работы состояла в том, чтобы выделить источники городского загрязнения, используя соотношение изотопов цинка и свинца. Исследование проводилось на примере крупного промышленного города Челябинск, Россия. В качестве геоиндикатора проанализированы пробы современных городских поверхностных отложений.

Материалы и методы. Пробы отложений пониженных участков микрорельефа отбирались по нерегулярной сетке в многоэтажных жилых районах г. Челябинск в 2019 г.

Стадия разложения включала последовательное растворение в смеси кислот HF, HNO₃, HCl. Для хроматографического выделения чистых фракций Pb и Zn использовали ионообменную смолу AG MP-1 (Bio-Rad inc., США). Фракция свинца дополнительно доочищалась от матрицы в соответствии с документом «Методика измерений изотопных отношений свинца в горных породах и минералах методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой с использованием масс-спектрометра высокого разрешения Neptune Plus» № 88-16360-009-2014, разработанным в ИГГ УрО РАН. Соотношения изотопов Zn и Pb измеряли на спектрометре Neptune Plus MC-ICP-MS (Thermo Fisher). Измерение изотопных отношений цинка проведено методом бреккетинга, а свинца по методике TI-нормализации для коррекции масс-дискриминации. Перед анализом в каждый образец добавлен таллий (стандартный раствор Tl Inorganic Ventures, USA). Обработка данных включает в себя коррекцию интерференций по отношению $202\text{Hg}/204\text{Hg} = 4.350370$ и нормализацию по экспоненциальному закону с использованием изотопного отношения $203\text{Tl}/205\text{Tl} = 0.418922$. Для оценки правильности и долговременной воспроизводимости измерительной процедуры использован стандарт изотопного состава цинка JMC-Lyon и свинца NIST SRM-981.

Результаты и обсуждения. Челябинск является крупным промышленным городом с развитой инфраструктурой. Возможными источниками загрязнения окружающей среды могут быть предприятия машиностроения, металлообработки, металлургии, электроэнергетики, химии и нефтехимии, а также автомобильный и железнодорожный транспорт. Для изотопных отношений свинца не происходит фракционирования во время плавки руд, промышленных и экологических процессов. Таким образом, по этим изотопным отношениям можно проследить естественные и антропогенные процессы, влияющие на распространение и накопление свинца. Изотопные отношения свинца показывают свою эффективность в установлении взаимосвязи между загрязнением окружающей среды металлами и дорожным движением. Полученные нами результаты изотопных отношений свинца, свидетельствуют о преимущественном вкладе автомобильного транспорта в загрязнение городов. Совместное использование изотопных отношений цинка и свинца позволяет дифференцировать источники загрязнения, связанные с автомобильным транспортом: выбросы транспортных средств, от дорожной пыли и объектов дорожного обустройства. Полученные нами данные свидетельствуют о том, что основным источником загрязнения являются выбросы от транспортных средств. Именно выхлопные газы вносят значительный вклад в антропосферу города.

Выводы. Использование изотопных отношений цинка расширяет возможности дискриминации источников загрязнения городов. Отложения, образованные на поверхности городов, демонстрируют большой потенциал в качестве геоиндикаторного элемента окружающей среды в городской местности.

Работа выполнена в ЦКП «Геоаналитик» и поддержана РНФ (проект № 19-35-60011).

Миграция Na в кристаллической структуре мурманита: ионный обмен и высокотемпературная трансформация.

Паникоровский Т.Л.¹, Яковенчук В.Н.¹, Калашникова Г.О.¹, Кабанова Н.А.¹,
Житова Е.С.², Кривовичев С.В.¹

¹ФИЦ КНЦ РАН, г. Апатиты t.panikorovskii@ksc.ru;
yakovenchuk@geoksc.apatity.ru; g.kalashnikova@ksc.ru; n.kabanova@kas.ru;
s.krivovichev@ksc.ru; ²Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский zhitova_es@mail.ru

Мурманит, $\text{Na}_2\text{Ti}_2(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ является породообразующим минералом в Ловозёрском массиве (Герасимовский, 1936). Впервые он был найден Вильгельмом Рамзаем в 1890 году в Ловозёрском массиве, а также позже обнаружен и в Хибинском массиве в ходе экспедиций А.Е. Ферсмана. Детально описан Н.Н. Гутковой, которая дала название по местности – мурманит (Гуткова, 1930).

Теоретическое исследование показало наличие 2D системы путей миграции ионов Na^+ в структуре мурманита. Миграция ионов Na^+ наблюдалась как в ходе нагрева мурманита, так и при ионном обмене. Нами был описан характер фазового необратимого перехода из мурманита $\text{Na}_2\text{Ti}_2(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в фазу $\text{Na}_2\text{Ti}_2(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}_2$ при 150°C . Структура исходного была уточнена в пространственной группе $P-1$ с R -фактором 0.077 для 1660 независимых рефлексов $a = 5.3822(6)$, $b = 7.0538(8)$, $c = 11.6477(15)$ Å, $\alpha = 86.385(9)^\circ$, $\beta = 81.967(10)^\circ$, $\gamma = 89.970(9)^\circ$, $V = 436.98(9)$ Å³. Структура дегидратированной фазы уточнена в пространственной группе $P-1$ с R -фактором 0.096 для 1643 независимых рефлексов $a = 5.3089(9)$, $b = 7.0373(13)$, $c = 9.822(4)$ Å, $\alpha = 81.74(2)^\circ$, $\beta = 80.60(2)^\circ$, $\gamma = 89.862(14)^\circ$, $V = 358.18(17)$ Å³. Выход структурной воды вызывает изменение координации титана в H -слое с октаэдрической на пятивершинную. Ионы Na^+ при удалении воды из H -слоя мигрируют в межслоевое пространство (рис. 1). Дегидратированная фаза стабильна до температуры 700°C .

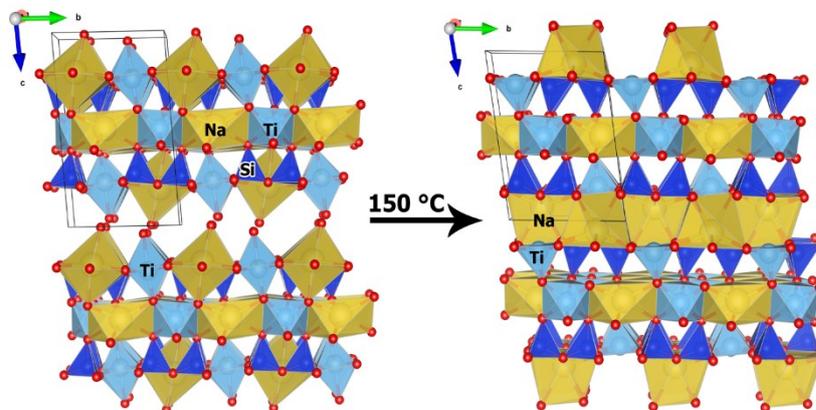


Рис. 1. Необратимый фазовый переход из мурманита в фазу $\text{Na}_2\text{Ti}_2(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}_2$ при 150°C .

Мурманит способен полностью обменивать катионы Na^+ на Cd^{2+} и Pb^{2+} в хлоридных растворах при температуре 160°C . Внедрение свинца в межслоевое пространства мурманита происходит по схеме $2\text{Na}^+ \leftrightarrow \text{Pb}^{2+} + \Upsilon$. Кадмий входит в кристаллическую структуру мурманита по изоморфной схеме $2\text{Na}^+ \leftrightarrow \text{Cd}^{2+} + \Upsilon$, замещая натрий в октаэдрических позициях. Упорядочение занятых и вакантных октаэдрических позиций для Cd -замещённой формы приводит к изменению элементарной ячейки с исходной пр.гр. $P\bar{1}$, $a = 5.3822(6)$, $b = 7.0538(8)$, $c = 11.6477(15)$, $\alpha = 86.385(9)^\circ$, $\beta = 81.967(10)^\circ$, $\gamma = 89.970(9)^\circ$ в диагональную $a = 8.8154(11)$, $b = 8.8363(11)$, $c = 11.694(4)$, $\alpha = 98.786(17)^\circ$, $\beta = 90.954(17)^\circ$, $\gamma = 106.039(11)^\circ$.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ 21-77-10103.

Литература:

- Гуткова Н.Н. (1930) Новый титаносиликат – мурманит из Ловозерских тундр. Доклады Академии наук: серия А: 731–736.
Герасимовский В.И. (1936) Мурманит Ловозерских тундр. Редкие металлы 4: 37–39.

Статистические подходы в рамановской спектроскопии: приложения в минералогии и геоархеологии

Панкрушина Е.А., Киселева Д.В.

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

Скелетные остатки, состоящие из органической и неорганической фракций биоапата (Bentley, 2006) и воды, представляют собой чрезвычайно важные биоархивы, дающие информацию как о прижизненной, так и о посмертной истории человека, зафиксированную в элементном и изотопном составе и особенностях строения. Начальные стадии фоссилизации имеют сходный характер с термическими преобразованиями при невысоких температурах (до ~770 K). Методы рамановской спектроскопии широко используются для изучения локальной молекулярной структуры и ее дефектов в современных и археологических костях и зубах человека и животных (Dal Sasso et al., 2018). Температурно-зависимая рамановская спектроскопия позволяет проводить экспериментальные исследования фрагментов кости или зуба *in situ* при контролируемых условиях нагревания. Традиционные методы обработки спектров основаны на их разложении на элементарные составляющие («Peak Fitting»). Однако часто возникает проблема неоднозначности определения малых вариаций параметров отдельных мод, плохо разрешенных спектров, при высоких температурах наблюдения и т.д. (все это свойственно костной и зубной тканям). В этом случае использование статистических методов спектральной параметризации (таких как автокорреляционная функция (Δcorr) и др.) предпочтительнее для анализа вариаций полного спектрального профиля раман-активных мод без подгонки, обеспечивающей более точную диагностику спектральных изменений под влиянием температуры (Pankrushina et al., 2020).

Настоящее исследование посвящено изучению термического поведения современной и археологической эмали и дентина человека с использованием температурно-зависимой рамановской *in situ* спектроскопии в диапазоне температур 83–873 K для оценки структурных изменений как органических, так и минеральных фракций зуба. Различия спектральных параметров археологических и современных проб (рис. 1) может быть обусловлено в первую очередь избытком ионов F⁻ в положениях ОН-групп, что вызывает смещение положения $\nu_1(\text{PO}_4)$. Вероятно, с этим же связана близость значений изотермического параметра Грюнайзена γ_{IP} археологических образцов и фторапатита. Колоколообразный вид хода зависимости $\Delta\text{corr}_{\text{CH}_3}(\text{T})$ с максимумом при ~400 K можно объяснить денатурацией при повышении температуры. Таким образом, полученные результаты способствуют пониманию термического поведения зубных тканей, их микроструктурных изменений *in situ* и процессов диагенеза.

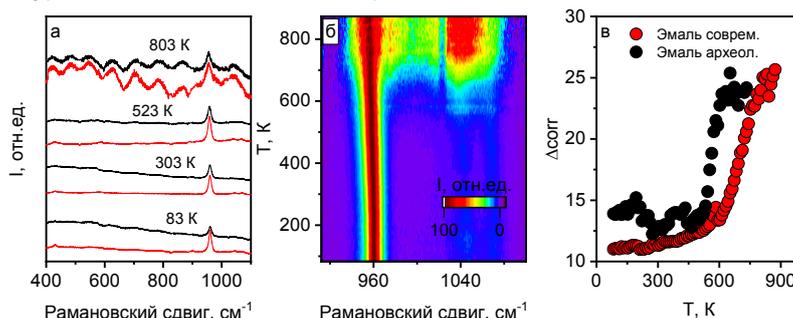


Рис. 1. Рамановские спектры современной и археологической эмали при разных T (а); 2D карта $I(\nu, T)$ эволюции $\nu_1(\text{PO}_4)$ современной эмали (б); зависимости $\Delta\text{corr}(T)$ изученных проб.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-18-00593.

Литература:

- Bentley R.A. (2006) Strontium Isotopes from the Earth to the Archaeological Skeleton: A Review. *Journal of Archaeological Method & Theory* 13: 135–187.
- Dal Sasso G., Asscher Y., Angelini I., Nodari L., Artioli G. (2018) A universal curve of apatite crystallinity for the assessment of bone integrity and preservation. *Scientific reports* 8(1): 1–13.
- Pankrushina E.A., Kobuzov A.S., Shchapova Y.V., Votyakov S.L. (2020). Analysis of temperature-dependent Raman spectra of minerals: Statistical approaches. *Journal of Raman Spectroscopy* 51(9): 1549–1562.

Эклогиты и эклогитизация

Перчук А.Л.^{1,2}

¹*Кафедра петрологии и вулканологии, геологический факультет МГУ, Москва alp@geol.msu.ru; ²ИЭМ РАН, Черноголовка*

Эклогит – одна из самых высокоплотных пород на Земле, встречающаяся преимущественно в метаморфических комплексах высокого и сверхвысокого (UHP, ultra-high pressure) давления. Большинство эклогитов формируется в погружающихся плитах в зонах субдукции и коллизии. Субдукционные эклогиты ассоциируют с глаукофановыми сланцами, серпентинитами, амфиболитами и метаосадочными породами. Коллизионные эклогиты находятся в гнейсовых толщах, именно с ними связаны находки коэсита и алмаза, свидетельствующие о достижении УНТ условий. Эклогиты встречаются также среди ксенолитов в кимберлитовых трубках – эти так называемые мантийные эклогиты являются наиболее высокотемпературными и часто алмазоносными. Их происхождение обсуждается в рамках трех гипотез – субдукционной, магматической и реакционно-магматической.

Эклогиты в метаморфических комплексах, как правило, имеют фанерозойский возраст; палеопротерозойские эклогитовые комплексы редки, при этом ведутся оживленные дискуссии об архейских эклогитах в Карелии. Сокращение количества эклогитов в раннедокембрийских комплексах часто связывается с иным, отличным от современного, стилем субдукции. Возможный стиль ранней субдукции демонстрирует численное моделирование, одновременно показывая, что в погружающихся плитах создавались P-T условия, благоприятные для образования эклогитов (Perchuk et al., 2021). Следовательно, отсутствие эклогитов в раннедокембрийских комплексах, вероятно, обусловлено либо их последующими метаморфическими изменениями, либо отсутствием тектонического механизма вывода этих пород на поверхность.

Эклогиты играют ключевую роль в тектонике плит: обладая отрицательной плавучестью относительно перидотитов мантии, они тянут слэбы на глубину (механизм slab pull), способствуя развитию субдукции и конвекции в мантии. При реализации механизма slab pull исключительно важны два параметра – плотность эклогитов и степень эклогитизации пород базитового состава. Примечательно, что именно эти параметры до сих пор остаются малоизученными. Например, измеренные плотности базальтов при эклогитизации, установленные в ходе экспериментального исследования (Ito, Kennedy, 1973), слабо согласуются с плотностями, которые получаются при моделировании фазовых равновесий в системе MORB+H₂O (Chapman et al., 2019).

Менее всего понятны эффекты, связанные с кинетикой минеральных реакций эклогитизации. Природные наблюдения показывают, что превращения наблюдаются лишь на участках проникновения водного флюида, в то время как «сухие» породы (например, габброиды) могут находиться в условиях эклогитовой фации метаморфизма в метастабильном состоянии неопределенно долго при температурах до 800°C. Учитывая неоднородность распределения связанной воды в структуре океанической коры (первые масс.% в вулканитах, почти безводные габброиды), можно полагать, что эклогитизация и утяжеление слэбов будут происходить крайне неравномерно. В частности, габброиды, доминирующие в разрезах океанической коры, будут эклогитизироваться при давлениях значительно больших, чем это предсказывают минеральные равновесия. Изучение эффекта сдвинутой эклогитизации и его последствий может стать важным направлением в геодинамическом моделировании субдукции.

Финансовая поддержка гранта РФФИ № 20-05-00329.

Литература:

- Austrheim H. (1998) Influence of fluid and deformation on metamorphism of the deep crust and consequences for the geodynamics of collision zones. In: When Continents Collide: Geodynamics and Geochemistry of Ultrahigh-Pressure Rocks: 297–323.*
- Chapman T., Clarke G.L. & Daczko N.R. (2019) The role of buoyancy in the fate of ultra-high-pressure eclogite. Scientific Reports 9: 19925.*
- Ito K., and Kennedy G.C. (1971) An experimental study of the basalt-garnet granulite-eclogite transition. AGU Monograph, 14: 303–314.*
- Perchuk A.L., Gerya T.V., Zakharov V.S., Griffin W.L. (2021) Depletion of the upper mantle by convergent tectonics in the Early Earth. Scientific Reports 11: 21489.*

Гранатовый верлит – наиболее распространенная порода верхней мантии?

Перчук А.Л.^{1,2}, Сердюк А.А.², Пересецкая Е.В.¹

¹Кафедра петрологии и вулканологии, геологический факультет МГУ, Москва, ekaterina.peresetskaya@gmail.com, ²ИЭМ РАН, Черноголовка

Верлиты (в том числе гранатовые) являются наименее распространенными на поверхности Земли разновидностями перидотитов (рис. 1). Среди мантийных ксенолитов в островодужных вулканитах верлиты также встречаются очень редко.

Состав ксенолита шпинелевого лерцолита KLB-1 из вулканического кратера Килбурн Хоул (США), близкий к составу примитивной мантии, был использован для термодинамического моделирования фазовых отношений в системе $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ с помощью программного комплекса *Perple_X* в диапазоне температур 900-2000°C и давлений 0.0001-30 ГПа. Значительную часть полученной фазовой P-T диаграммы (при давлениях верхней мантии) занял парагенезис гранатового верлита. То есть термодинамические и согласующиеся с ними экспериментальные данные предсказывают, что в современной верхней мантии, если она имеет средний состав типа шпинелевого лерцолита KLB-1, доминирующим является парагенезис гранатового верлита, практически отсутствующий в образцах, доставляемых на поверхность глубинными магмами или тектоническими процессами. Кроме того, моделирование показало, что в архейской мантии распространение верлитов могло быть еще более масштабным.

Термодинамическое моделирование показывает, что ограниченное количество верлитов среди мантийных пород, выводимых на поверхность Земли, связано с резким изменением температуры на геотермах литосферной мантии по сравнению с небольшим изменением температуры (0.5°C/км) вдоль адиабаты в астеносферной мантии. Если двигаться вдоль современной континентальной геотермы с тепловым потоком 45 мВт/м² от переходной зоны мантии к поверхности, то сохраняющийся в астеносфере парагенезис гранатового верлита сменится в литосфере на парагенезис гранатового лерцолита. Произойдет это за счет резкого возрастания количества ортопироксена (рис. 1) при снижении температуры вдоль геотермы в литосфере. При подъеме вдоль геотермы 120 мВт/м² (фиксируемой для Килбурн Хоул) модалное содержание ортопироксена будет увеличиваться еще существеннее, в конечном счете точно воспроизводя модалный состав KLB-1 (рис. 1) (Перчук и Сердюк, 2022).

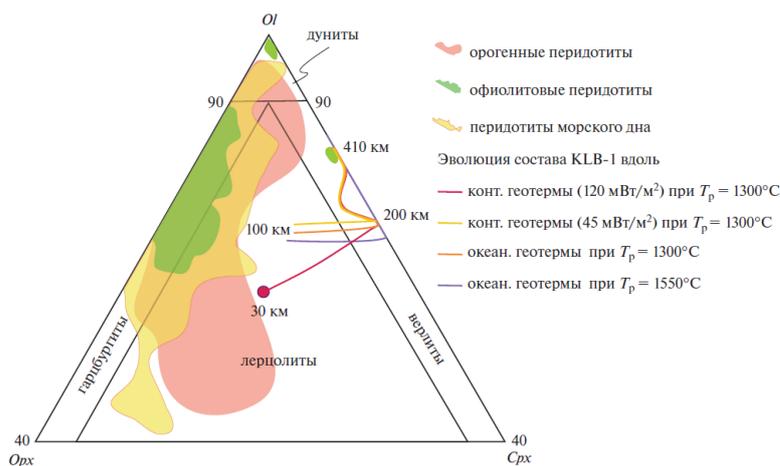


Рис. 1. Треугольная диаграмма в координатах O1–Orx–Srx, показывающая изменение расчетных модалных содержаний этих минералов вдоль геотерм. Красной точкой показан модалный состав, отвечающий химическому составу шпинелевого лерцолита KLB-1 при 1 ГПа (~30 км) и 950°C.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-05-00329.

Литература:

Перчук А.Л., Сердюк А.А. (2022) Фазовые отношения в шпинелевом лерцолите KLB-1 по результатам термодинамического моделирования до 30 ГПа: особенности минерального состава и геодинамические эффекты. *Петрология* 30(2): 194–208.

Рациональная систематика включений в минералах

Плечов П.Ю.

*Минералогический музей имени А.Е. Ферсмана РАН, Москва
pplechov@gmail.com;*

Включением в минерале называется объект, со всех сторон окруженный кристаллом минерала (минералом-хозяином) и полностью изолированный им от других объектов. Основной классификации является их разделение на первичные и вторичные включения. Первичные включения являются прямым источником информации об условиях формирования минералов и составе минералообразующей среды. Вторичные включения отражают историю породы после формирования изучаемого минерала.

В лекции будет приведен обзор различных классификаций включений и предложена рациональная классификация, построенная на двух основных параметрах: 1) информативности включений для реконструкции условий минералообразования, 2) применимости различных методик для изучения включений различных типов.

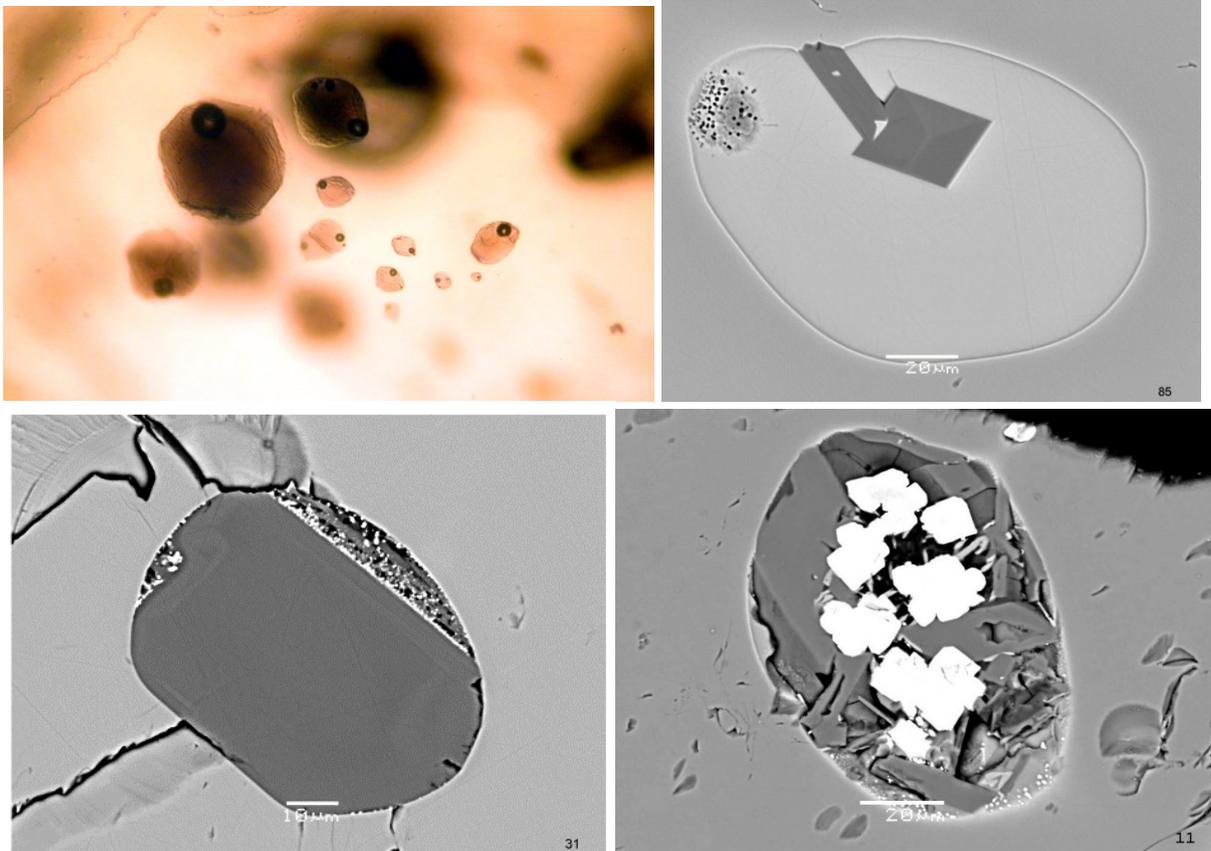


Рис. 1. Различные типы включений во вкрапленниках оливина в базальтах Седанкинского Дола (Камчатка). Верхняя левая: первичные стекловатые расплавные включения, верхняя правая и нижняя левая: первичные включения гетерофазного захвата, нижняя правая: преобразованный микроксенолит (Плечов, 2014).

Будут рассмотрены примеры, основанные на многолетнем опыте изучения включений в минералах вулканических пород Камчатки (рис. 1).

Литература:

Плечов П.Ю. (2014) Методы изучения флюидных и расплавных включений. Москва, КДУ, 266 с.

Родоначальный расплав дунит-клинопироксенит-габбровых комплексов Урало-Аляскинского типа: вопросы происхождения, состава и эволюции

Пушкарев Е.В.

ИГГ УрО РАН, Екатеринбург *pushkarev.1958@mail.ru*

Постановка проблемы. Одной из фундаментальных проблем при обсуждении генезиса дунит-клинопироксенит-габбровых (ДКГ) комплексов Урало-Аляскинского типа является природа высоко-Са ультрамафитов и мафитов (клинопироксенитов, верлитов и тылаитов), объем которых может быть сопоставим с дунитами, но чаще значительно превосходит объем последних. Так, доля клинопироксенитов в ДКГ массивах Урала (Нижнетагильский, Светлоборский, Вересовоборский), Алданского щита (Кондер), Корякии (Гальмознан) составляет 30-40%. В Платиноносном поясе Урала, включающего 14 крупных мафит-ультрамафитовых массивов, доля дунитов не превышает 5-6%, на клинопироксениты и тылаиты приходится до 40%, а габброидами сложено около половины объема пояса. При этом габбровые массивы не несут признаков генетической общности с ультраосновными породами и, по-видимому, являются продуктом внедрения и кристаллизации самостоятельных расплавов основного состава. Следовательно, родоначальный расплав для ДКГ комплексов должен быть способен продуцировать огромные объемы клинопироксена, а в подчиненном количестве оливина и хромшпинелида. Соотношение клинопироксена и оливина в таких расплавах (породах) близко к котектическому, а соотношение $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 > 1$.

Тезис первый: Из многих, известных нам, разнообразных силикатных горных пород, пожалуй, только анкарамиты в полной мере соответствуют требованиям, предъявляемым к расплавам, родоначальным для ДКГ комплексов. Они обладают $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 > 1$, соответствуют ОI-Срх котектике, способны фракционировать клинопироксен, количество которого в 6-10 раз превышает количество оливина. Для них характерно отсутствие ликвидусного плагиоклаза. В аксессуарных количествах в анкарамитах кристаллизуются на ликвидусе хромшпинелид и минералы элементов платиновой группы.

Тезис второй. Особенности химического состава ОI-Срх котектики – высокая магнезиальность и экстремально высокое $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ отношение, предельно низкие содержания щелочей и титана, определяют направление и петрохимические особенности тренда дифференциации анкарамитов. В последовательных продуктах дифференциации нарастают содержания железа, алюминия, титана, щелочей, растет содержание воды, уменьшаются магнезиальность и содержания хрома. На заключительных стадиях процесса, при достижении насыщения по глинозему из остаточного расплава начинает кристаллизоваться плагиоклаз, занимающий интерстициальное положение – криптовая структура. Конфигурация кристаллизационных трендов главных минералов также определяется фракционированием ОI-Срх котектики на раннем этапе и котектик с участием плагиоклаза на позднем. От начальных к конечным стадиям кристаллизации в клинопироксене непрерывно нарастает железистость, увеличиваются содержания титана и натрия, падает содержание хрома. Индикаторное значение имеют вариации содержания глинозема. При фракционировании ОI-Срх котектики содержание Al_2O_3 в клинопироксене растет от 1 до 6-7%, а с началом кристаллизации плагиоклаза снова уменьшается до 1-2%. На ликвидусе анкарамитов кристаллизуется высокохромистый хромшпинелид. В результате фракционирования ОI-Срх ($\pm\text{CrSp}$) котектики в хромшпинелиде увеличиваются содержания глинозема и железа и уменьшается хром. Минерал может достигнуть поверхности сольвуса, где испытывает распад твердого раствора на две фазы, обогащенные Al и Fe^{3+} либо огибает сольвус и продолжает кристаллизоваться в виде титаномагнетита. Характер зональности оливина и клинопироксена отражает динамику внедрения и кристаллизации анкарамитов.

Тезис третий. Формирование высоко-Са анкарамитовых расплавов связано с плавлением метасоматизированной мантии верлитового состава в интервале давлений 20-10 кбар.

Заключение: Высоко-Са расплавы анкарамитового типа могут рассматриваться как наиболее вероятные родоначальные расплавы для ДКГ комплексов Урало-Аляскинского типа.

Работа выполнена по госбюджетной теме № АААА-А18-118052590029-6 при поддержке ЦКП “Геоаналитик” ИГГ УрО РАН (Екатеринбург).

Тылаиты – интрузивные аналоги анкармитов в комплексах Урало-Аляскинского типа

Пушкарев Е.В.

ИГГ УрО РАН, Екатеринбург pushkarev.1958@mail.ru

Термин «тылаит», обозначающий меланократовую оливин-клинопироксеновую породу с порфиroidной структурой, распространенную в Платиноносном поясе Урала (ППУ), впервые ввели Л. Дюпарк и Ф. Пирс в 1902 г. Породы состоят из клинопироксена (50-70%), оливина (10-15%), полевых шпатов (15-20%), флогопита, амфибола, титаномагнетита. Порфиroidная структура обусловлена наличием крупных (5-10 мм), идиоморфных кристаллов клинопироксена в мелкозернистой основной массе, состоящей из всех перечисленных выше минералов. Доля порфиroidных вкрапленников составляет 25-30% или больше. Зерна клинопироксена обладают видимой зональностью и «структурами песочных часов». Полевые шпаты обладают ксеноморфизмом по отношению к темноцветным минералам – криптовая структура. По химическому составу тылаиты можно сравнивать с пикритами или меланократовыми оливиновыми габбро, обогащенными клинопироксеном и оливином, относительно габбровой котектики. В габбровых массивах ППУ типичные тылаиты не встречаются. Они входят в ассоциацию с дунитами и клинопироксенитами и переслаиваются с последними.

При изучении тылаитов ППУ было установлено, что при близких соотношениях SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , CaO и FeO они образуют две группы, резко различные по содержаниям Na_2O , K_2O , TiO_2 , Rb , Sr , редких и редкоземельных элементов. Группу с низким уровнем щелочей образуют тылаиты с битовнитом. В другую группу входят нефелин-ортоклазовые тылаиты с андезином. Нефелин образует тонкие сростания с ортоклазом с перистой структурой. Валовой состав этих агрегатов соответствует тройной точке в системе нефелин-кальсилит-кварц при давлении воды около 1 кбар.

Обе группы тылаитов характеризуются содержаниями MgO в интервале 12-20% и уровнем $\text{SiO}_2=44-48\%$, что соответствует пикритам. Но по сумме щелочей они сильно различаются. Нефелининовые тылаиты близки к границе, выше которой располагаются базаниты и нефелиниты, в которых содержания $\text{SiO}_2<45\%$. Это определяет существенно более высокую долю нефелина в нормативном составе базанитов и нефелинитов по сравнению с тылаитами Урала. Нормативный нефелин в количестве первых процентов фиксируется только в некоторых нефелиновых тылаитах, а в остальных всегда присутствует небольшое количество ортопироксена, что отражает нормальную щелочность пород и подтверждает реакционную природу нефелина.

На классификационных диаграммах составы нефелиновых и битовнитовых тылаитов Урала перекрываются с полем эффузивных анкармитов островных дуг Пацифики, но имеют немного более высокое $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ отношение, в интервале 1.2-2.7. Составы обоих типов тылаитов располагаются вдоль линии Ol-Srx котектики при давлении 20 кбар. Нефелиновые тылаиты обладают существенно более высокими концентрациями Sr , Rb , P , Ti . Для них характерны фракционированные спектры распределения РЗЭ и более высокие содержания этих элементов. От эффузивных анкармитов Тихого океана и Урала они отличаются обогащенностью легкими РЗЭ. Битовнитовые тылаиты имеют более широкий разброс концентраций РЗЭ, что согласуется с вариациями меланократовости пород. Для них характерны пологие спектры распределения РЗЭ с незначительными вариациями La_N/Yb_N отношения от 1 до 2.5. Такой тип распределения элементов больше соответствует геохимии эффузивных анкармитов.

По химическому составу обе группы тылаитов соответствуют эффузивным анкармитам Пацифики и Урала и их можно рассматривать как интрузивные аналоги этих пород. Тылаиты близки к расчетному составу исходного расплава, родоначального для дунит-клинопироксенит-габбровых массивов Урало-Аляскинского типа, однако есть все основания полагать, что тылаиты являются продуктами кристаллизации уже эволюционировавших расплавов, претерпевших дифференциацию с отсадкой некоторой части оливина и клинопироксена.

Работа выполнена по госбюджетной теме № АААА-А18-118052590029-6 при поддержке ЦКП "Геоаналитик" ИГГ УрО РАН (Екатеринбург).

Природа сульфидной минерализации в апофизе Йоко-Довыренского массива (Северное Прибайкалье, Россия)

Пшеницын И.В.¹, Арискин А.А.^{1,2}

¹ГЕОХИ РАН, Москва lotecsi@gmail.com;

²Геологический факультет МГУ, Москва ariskin@rambler.ru

Представлены данные об эволюции несмесиной сульфидной жидкости, которая накапливалась в приподошвенной части Йоко-Довыренского массива. Вкрапленные руды в этом участке связаны с апофизами меланократовых оливиновых габброноритов из нижней части камеры. Эти тела сложены более фракционированным материалом относительно исходной довыренской магмы. Мы считаем, что в минерализованных породах из апофиза DV10 записаны условия ранней стадии эволюции сульфидно-силикатных систем, которые в дальнейшем привели к формированию сидеронитовых. Показано, что в них имеет место структурная запись процессов перколяции и аккумуляции сульфидов, которые следуют за стадией силикатно-сульфидной несмесиности.

Помимо традиционных петролого-минералогических исследований, для расшифровки условий формирования рудоносных пород в габброноритовом апофизе использованы методы петроструктурных и геохимических реконструкций. Первый заключался в обработке и интерпретации данных рентгеновской компьютерной томографии. Второй – в расчете среднего состава сульфидов и интерпретации отношений халькогенов и ЭПГ породах.

На первом этапе, сочетание рентгеновской компьютерной томографии (КТ) (Корост и др. 2019) с сульфидной минералогией позволило выделить четыре типа пород в апофизе DV10: 1 – оливиновые пикродолериты с изолированными сульфидными каплями, 2 – оливиновые габбронориты с сульфидными глобулами, 3 – оливиновые габбронориты с глобулами, переходящими в сидеронитовые домены, 4 – сидеронитовые руды в оливиновых кумулатах. По результатам статистической обработки данных КТ был выявлен структурный тренд зависимости объемного содержания и морфологии сульфидных сегрегаций от степени их связанности в интеркумулусе. Выделенные типы минерализации отражают последовательные этапы перколяции и накопления сульфидной жидкости в поровом пространстве оливиновых кумулатов.

На втором этапе генетическая связь сульфидных капель с сидеронитовыми рудами была подтверждена геохимическими исследованиями: нормализация концентраций благородных металлов и халькогенов к массе сульфидов в изученных образцах (пересчет на 100% сульфидной массы) (Арискин и др., 2018) дает схожие тренды на графиках положительных ковариаций Cu и ЭПГ, Au и Те. Было обнаружено, что наиболее богаты благородными металлами сульфиды из пикродолеритов с сульфидными каплями, тогда как самые бедные сульфиды из сидеронитовых руд. Это свидетельствует о том, что капли представляют наиболее ранние примитивные несмесиные сульфиды.

Совокупность этих данных говорит о единой многоступенчатой генетической эволюции сульфидной жидкости в данных породах, маркирующей различными структурными и геохимическими характеристиками. Такая схема наглядно иллюстрирует связь бедно-вкрапленных руд Центрального участка, относящегося к Байкальскому месторождению, с промышленными сидеронитовыми рудами.

Литература:

Арискин А.А., Николаев Г.С., Данюшевский Л.В., Фиорентини М.Л., Кислов Е.В., Пшеницын И.В. (2018) Геохимические свидетельства фракционирования платиноидов иридиевой группы на ранних стадиях дифференциации довыренских магм. Геология и геофизика 59(5): 573–588.

Корост Д.В., Арискин А.А., Пшеницын И.В. и др. (2019) Компьютерная томография как инструмент исследований платинометалльных анортозитов Йоко-Довыренского массива. Ультрамафит-мафитовые комплексы: геология, строение, рудный потенциал. Улан-Удэ: 162–165.

Дианиты щелочных комплексов Алдана

**Радомская Т.А.¹, Канева Е.В.¹, Шендрик Р.Ю.¹, Митичкин М.А.¹,
Федоренко В.В.¹, Даниловская В.А.²**

¹ИГХ СО РАН, Иркутск taniaojigova@mail.ru;

²ИГМ СО РАН, Новосибирск

В работе приводится характеристика декоративно-поделочного камня дианита из щелочных массивов Алданского щита: Мурунского, Инаглинского и Якокутского. Впервые необычная порода была обнаружена геологами Чаро-Токкинской экспедиции в 70-х годах прошлого века в виде единичных окатанных галек светло-голубого цвета в аллювиальных отложениях Александровского ручья (голец Кедровый, гора Мурун). Исследование показало, что порода сложена преимущественно мелкими волокнистыми кристаллами щелочного амфибола – магнезиостронциевым калий-рихтеритом (Конев и др., 1988) – в соответствии с современной классификацией калиевым рихтеритом (Hawthorne et al., 2012). Поэтому небесно-голубой до тёмно-синего цвета самоцвет Мурунского комплекса стал рассматриваться как одна из декоративных разновидностей нефрита. В 1995 году порода была обнаружена в коренном залегании на контакте грорудитов и монтичеллитовых скарнов, а в начале 1997 года она получила коммерческое название – дианит, в память о погибшей принцессе Диане Уэльской. (Конев, Воробьёв, 1999).

Подобные нефритоподобные породы были обнаружены нами в Инаглинском и Якокутском щелочных массивах.

Серовато-голубой дианит Инаглинского массива имеет метасоматическое происхождение. Он образует на контакте щелочных пегматитов и дунитов незначительные зоны шириной от 1 мм до 10 см. Под микроскопом дианит состоит преимущественно из мелких бледно-голубых игольчатых кристаллов амфибола. Иногда среди плотной амфиболовой массы присутствует незначительное количество чешуек оранжевого тетраферрифлогопита и редких реликтов зёрен хромита с ярко-зелёными каймами, состоящими из хромового эгирина. По химическому составу игольчатый амфибол отвечает рихтериту – $(\text{Na}_{0.59}\text{K}_{0.25})_{\Sigma 0.84}(\text{Na}_{1.05}\text{Ca}_{0.92}\text{Fe}_{0.03})_{\Sigma 2.00}(\text{Mg}_{4.66}\text{Fe}^{2+}_{0.17}\text{Fe}^{3+}_{0.06}\text{Ti}_{0.05}\text{Al}_{0.04}\text{Cr}_{0.01}\text{V}_{0.01})_{\Sigma 5}(\text{Si}_{7.98}\text{Al}_{0.02})_{\Sigma 8}\text{O}_{22}((\text{OH})_{1.89}\text{F}_{0.11})_{\Sigma 2}(\text{Na})^{\text{A}}(\text{NaCa})^{\text{C}}(\text{Mg}_5)^{\text{T}}[\text{Si}_8\text{O}_{22}]^{\text{W}}(\text{OH},\text{F})_2$, где $0.5 < \text{A}(\text{Na}+\text{K}+2\text{Ca})$ с преобладанием Na и K, и $\text{C}(\text{Al}+\text{Fe}^{3+}+2\text{Ti}) < 0.5$. По направлению к щелочному пегматиту количество игольчатого амфибола снижается и возрастает содержание тетраферрифлогопита. Затем следует зона с идиоморфными кристаллами тёмно-зелёного амфибола, вытянутого перпендикулярно пегматитовым прожилкам. По химическому составу данный амфибол отличается от игольчатого и соответствует магнезио-арфведсониту.

Дианит Якокутского массива был обнаружен не в коренном залегании, а в виде единичной глыбы размером ~50×30×30 см в отвалах золотодобычи, расположенных вдоль реки Якокут. Порода обладает насыщенным глубоким синим цветом, но по декоративным качествам уступает дианиту Мурунского массива – хуже принимает полировку. Под микроскопом среди спутанно-волокнистых кристаллов амфибола обнаруживаются мелкие каверны. По составу амфибол соответствует рихтериту $(\text{Na}_{0.54}\text{K}_{0.43})_{\Sigma=0.97}(\text{Na}_{1.42}\text{Ca}_{0.47}\text{Mg}_{0.05}\text{Fe}^{2+}_{0.04}\text{Mn}_{0.01}\text{Sr}_{0.01})_{\Sigma=2}(\text{Mg}_{4.49}\text{Fe}^{3+}_{0.47}\text{Cr}_{0.02}\text{Ti}_{0.02})_{\Sigma=5}(\text{Si}_{7.93}\text{Al}_{0.07})_{\Sigma=8}\text{O}_{22}((\text{OH})_{1.41}\text{F}_{0.59})_{\Sigma=2}(\text{Na})^{\text{A}}(\text{CaNa})^{\text{C}}(\text{Mg}_5)^{\text{T}}[\text{Si}_8\text{O}_{22}]^{\text{W}}(\text{OH},\text{F})_2$, где $0.5 < \text{A}(\text{Na}+\text{K}+2\text{Ca})$ с преобладанием Na и K, и $\text{C}(\text{Al}+\text{Fe}^{3+}+2\text{Ti}) < 0.5$.

Инфракрасные (ИК) спектры отражения амфиболов, слагающих дианиты, исследовались с помощью инфракрасного микроскопа Микран-3 и спектрофотометра Симекс ФТ-801. По ИК-спектрам отражения подтверждено, что в дианитах из Муруна и Якокута преобладает рихтерит. В реакционных зонах контактов ультраосновных и щелочных пород Инаглинского комплекса обнаружены области, сложенные игольчатыми кристаллами рихтерита и более крупными кристаллами магнезио-арфведсонита.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФ № 22-27-00183.

Литература:

- Конев А.А., Воробьёв Е.И. (1999) Дианит – новый самоцвет России. Ювелирный мир 2: 78–79.
Конев А.А., Парадина Л.Ф., Воробьёв Е.И. и др. (1988) Магнезиостронциевый калий-рихтерит – новая разновидность амфиболов. Минерал. журн. 10: 76–82.
Hawthorne F.C., Oberti R., Harlow G.E., Maresch W.V., Martin R.F., Schumacher J.C., Welch M.D. (2012) Nomenclature of the amphibole supergroup. American Mineralogist 97: 2031–2048.

Зональность минералов – отражение смены последовательных равновесий между поверхностным слоем твердых фаз и жидкой фазой

Расс И.Т.

ИГЕМ РАН, Москва rass@igem.ru

Понятие локального равновесия (Коржинский, 1982) подразумевает наличие термодинамического равновесия в каждой точке системы, в каждый момент процесса, если процесс – фракционной кристаллизации, фильтрации растворов или диффузии компонентов – происходит достаточно медленно по сравнению со скоростью установления равновесия между внешней частью твердой фазы и жидкостью, будь то расплав или раствор. Исследование зональности сосуществующих минералов в сочетании с принципом фазового соответствия Л.Л. Перчука (1973) позволяет выявить связи между зональностью минералов и физико-химическими условиями и кинетическими характеристиками их генезиса для магматических и метасоматических пород. Зональность минералов магматических пород возникает при росте минерала из расплава при понижении температуры. Совпадение и/или наследование трендов зональности в одноименных минералах последовательных магматических пород позволяет различать коагматические серии пород, принадлежащие различным котектикам. Исследование зональности сосуществующих пироксенов, магнетитов, перовскитов, апатитов из 7 массивов Маймеча-Котуйской провинции (Полярная Сибирь) и двух массивов Карело-Кольской провинции подтвердило ранее предложенную модель (Кравченко, Расс, 1985) существования в пределах единых кольцевых комплексов двух дифференцированных серий – дериватов двух мантийных щелочно-ультраосновных магм, различных по составу и условиям выплавления (Rass, 2008). Коэффициент распределения элемента между сосуществующими минералами определяется температурой и давлением, при которых они кристаллизуются из того или иного расплава. В Ковдорском фоскорит-карбонатитовом комплексе в значимом количестве случаев наблюдается равенство коэффициентов распределения малых элементов между одними и теми же минералами ранних генераций, или между центрами этих минералов (Расс и др., 2020), что позволяет предполагать их равновесность – необходимое условие возможной несмесимости между существенно обогащенной фосфором и обычной карбонатитовой магмами. Для метасоматических пород распределение компонентов между раствором и образованными фазами определяется инфильтрацией и диффузией раствора и взаимодействием жидкой и твердой фаз в процессе роста последней. Зональность минералов является следствием изменения параметров раствора во времени, которые меняются быстрее, чем происходит диффузия компонентов в твердой фазе, но, в отличие от кристаллизации из расплава, изменение некоторых параметров раствора, обуславливающих метасоматические реакции, может происходить быстрее, чем изменение температуры, и, соответственно, метасоматические процессы могут происходить при практически постоянной температуре. При анализе зависимости распределения компонента по зонам кристалла от распределения компонента в пространстве по зонам метасоматической колонки нами совместно с О.С. Кравченко и В.Л. Русиновым установлено, что при некоторых значениях коэффициентов распределения, меньших единицы, возникает инверсионная зональность в результате совмещения механизмов возникновения зональности, описываемых уравнениями кинетической фракционной модели, и равновесной диффузионной или инфильтрационной.

Литература

- Коржинский Д.С. (1982) Теория метасоматической зональности. М.: Наука, 104 с.
- Кравченко С.М., Расс И.Т. (1985) Щелочно-ультраосновная формация – парагенезис двух коагматических серий. Докл. АН СССР 283(4): 973–978.
- Перчук Л.Л. (1973) Термодинамический режим глубинного петрогенеза. М.: Наука, 318 с.
- Расс И.Т., Петренко Д.Б., Ковальчук Е.В., Якушев А.И. (2020) Фоскориты и карбонатиты: взаимоотношения, возможные петрогенетические процессы и исходная магма (массив Ковдор, Кольский п-ов). Геохимия 7: 627–653.
- Rass I.T. (2008) Melilite-bearing and melilite-free rock series in carbonatite complexes: derivatives from separate primary melts. Canadian Mineralogist 46(4): 951–969.

Петрологические особенности привершинных лав вулкана Вилючинский (Восточная Камчатка)

Рылова С.А., Горбач Н.В., Философова Т.М.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский alekseevka_s@mail.ru.

Вулкан Вилючинский (52°42' 158°17', абс. выс. 2173 м) расположен на восточном побережье Камчатки в 45 км южнее г. Петропавловска-Камчатского. Краткие сведения о морфологии, геологическом строении и составе изверженных продуктов приведены в работах Апрелькова С.Е. (1963), Фаворской М.А. и др. (1965) и Шеймовича В.С. (2000). Петрологические особенности лав вулкана и его эруптивная история ранее детально не изучались. Нашими коллегами инициированы тефрохронологические исследования для определения возраста последних извержений вулкана (Дирксен и др., 2022). Для того чтобы установить принадлежность тефры в разрезе пирокластических отложений к конкретному объекту, необходимы данные о вещественном составе лав и пирокластики вулкана-источника. С этой целью мы приводим характеристику привершинных лав вулкана Вилючинского, образцы которых были отобраны на его юго-западном склоне в июле 2021 г.

Лавы потоков представлены амфибол-пироксеновыми андезитами умереннокалиевой известково-щелочной серии (SiO_2 59.70-61.66 масс.%; FeO^*/MgO 2.04-2.38; K_2O 1.49-1.57 масс.%). Породы имеют серийно порфиоровую структуру и состоят из вкрапленников плагиоклаза (~15 об.%), выделений пироксенов (~5 об.%) и роговой обманки (~3-5 об.%). Крупные вкрапленники плагиоклаза переполнены включениями стекла, имеют ситовидные зоны и резобированные ядра. Вкрапленники роговой обманки заключены в тонкую опалитовую кайму, часто формируют сростки как между собой, так и с плагиоклазом. Состав вулканического стекла в основной массе отвечает риолиту ($\text{SiO}_2=75.2-79.2$ масс.%, $\text{K}_2\text{O}=3.17-4.16$ масс.%)

Отличительной особенностью андезитовых лав является присутствие в них округлых тонкозернистых меланократовых включений, по химическому составу отвечающих андезибазальту ($\text{SiO}_2=54.03$ масс.%, $\text{K}_2\text{O}=0.98$ масс.%). Включения имеют размеры от 1 до 6 см и сложены тонкими удлиненными кристаллами плагиоклаза и пироксенов с интерстициями, выполненными прозрачным стеклом. Включения подобной морфологии, состава и текстуры неоднократно были описаны в андезитовых лавах активных вулканов Камчатки (например, Горбач и др., 2016; Давыдова и др., 2017). Химический состав изученных нами меланократовых включений близок к составу андезибазальтов ранних этапов формирования Вилючинского вулкана (Шеймович, 2000). Такая закономерность позволяет предположить, что излияние привершинных андезитовых лав было вызвано поступлением новой порции базальтовой-андезибазальтовой магмы в гипотетическую близповерхностную магматическую камеру вулкана.

Литература:

- Апрельков С.Е. (1963) Вулкан Вилючинский на Камчатке. Бюллетень вулканологической станции 34: 44–47.
- Давыдова В.О., Щербаков В.Д., Плечов П.Ю., Перепелов А.Б. (2017) Петрологическая характеристика мафических включений в продуктах современных извержений вулкана Безымянный, Камчатка, 2006-2012 гг. Петрология 25(6): 609–634.
- Дирксен О.В., Философова Т.М., Горбач Н.В. (2022) Вилючинский – действующий вулкан? Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXV ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога, 30-31 марта 2022 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН: 34–37.
- Горбач Н.В., Портнягин М.В., Философова Т.М. (2016) Динамика роста экструзивного купола и вариации химического и минералогического составов андезитов вулкана молодой Шивелуч в 2001-2013 гг. Вулканология и сейсмология 6: 37–61.
- Фаворская М.А., Волчанская И.К., Фрих-Хар Д.И. и др. (1965) Магматизм Юго-Восточной Камчатки и его связь с процессами тектонической активизации. М.: Наука. 152 с.
- Шеймович В.С. (2000) Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1: 200 000. Серия Южно-Камчатская. Листы N-57-XXI (Северные Коряки), N-57-XXVII (Петропавловск-Камчатский), N-57-XXXII (сопка Мутновская). Объяснительная записка. М. 302 с.

Микроэлементы в донных осадках мелководных бухт залива Петра Великого

Рюмина А.А., Тищенко П.Я., Шкирникова Е.М.

ТОИ ДВО РАН, Владивосток ryumina.aa@poi.dvo.ru

В период 2018-2021 гг. были проведены геохимические исследования кернов донных отложений бухт Воевода, Новгородская и залива Угловой, которые включали измерения содержания тяжелых металлов (Zn, Cu, Pb, Ni, Co, Cr, Mn) и концентрации органического углерода по глубине керна с интервалом в 10 см. Для всех мелководных бассейнов керны отбирались в отсутствие лугов морской травы *Zostera Marina* (ZM) и в местах произрастания ZM (бухты Воевода, Новгородская).

Содержание металлов в пробах определялось методом атомно-абсорбционной спектроскопии на аппарате AA-3600 (Shimadzu, Япония). Органический углерод в твердой фазе осадков был измерен на анализаторе TOC-VCPN с приставкой для сжигания твердых проб SSM-5000A (Shimadzu, Япония). Гранулометрический анализ выполнялся на лазерном анализаторе частиц Analysette 22 NanoТес (Fritsch, Германия).

Для бухт Воевода и Новгородской были подняты керны темно-серого, почти черного, цвета с характерным запахом сероводорода. В заливе Угловом осадки были серого цвета, чрезвычайно тонкодисперсные и однородные. Гранулометрический анализ для поверхностного, среднего и нижнего горизонта кернов из исследуемых бухт показал, что гравийная фракция отсутствует во всех образцах. Псаммитовая фракция присутствует во всех образцах из бухты Воевода (от 1.39% до 17.1%) и в поверхностном слое для бухты Новгородской (3.64%). Алевриты преобладают для бухты Воевода. В образцах из бухты Новгородской в поверхностном слое преобладает алевритовая фракция (73.98%), но с увеличением глубины керна начинает повышаться содержание пелитовой фракции. В образцах из залива Углового пелитовая фракция преобладает (от 54.83% до 73.04%).

Содержание органического углерода выше в донных осадках, покрытых лугами ZM. В донных осадках свободных от ZM, в пределах верхних 40 см происходит уменьшение содержания органического углерода, а потом оно с глубиной не меняется для всех исследуемых бассейнов.

Концентрации меди и цинка в бухте Воевода существенно больше в керне, взятом в зарослях ZM. Уменьшение их концентрации с глубиной, по нашему мнению, обусловлено употреблением органического вещества детритофагами (инфауной) в пищу. В результате этого процесса в верхней части донных отложений, тяжелые металлы переходят из донных осадков в организмы детритофагов и накапливаются в них. Содержание свинца, никеля, кобальта и хрома для всех акваторий находится примерно в одном диапазоне. Наибольшие концентрации марганца обнаружены в бухте Новгородской. Его повышенное содержание может быть обусловлено не только аллохтонным стоком, но и тем, что он является типоморфным элементом [Иванов и др., 2020].

Для образцов, отобранных в бухте Воевода, обнаружена линейная зависимость между концентрацией металлов и содержанием органического углерода. Эту корреляционную связь можно объяснить физиологическими особенностями ZM. В ее листьях синтезируется полисахарид – зостерин. Это вещество является природным лигандом по отношению к тяжелым металлам [Khozhaenko et al., 2015]. При отмирании травы органокомплексы обогащают донные осадки микроэлементами и органическим углеродом.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ, № 20-05-00381-а и программы фундаментальных научных исследований, тема № 0211-2021-0014.

Литература:

- Иванов Д.В., Валиев В.С., Зиганшин И.И., Шамаев Д.Е., Паймикина Э.Е., Марасов А.А., Маланин В.В., Хасанов Р.Р., Унковская М.В. (2020) Структурная взаимосвязь гранулометрического состава, содержания органического вещества и тяжелых металлов в донных отложениях. *Российский журнал прикладной экологии* 2: 23–30.
- Khozhaenko E.V., Khotimchenko R.Y., Kovalev V.V., Khotimchenko M.Y., Podkorytova E.A. (2015) Metal Binding Activity of Pectin Isolated from Seagrass *Zostera marina* and Its Derivatives. *Marine Pharmacology* 41(6): 485–489.

Рентгенофазовый анализ геоархеологических объектов

Рянская А.Д., Киселева Д.В., Гуляева Т.Я.

ИГГ УрО РАН, Екатеринбург *tosenka2008@gmail.com*

Рентгеноструктурный (рентгенодифракционный) и рентгенофазовый анализ является самым распространенным методом определения структуры и минерального состава широкого круга объектов, а в последнее время широко используется для анализа различных биоминералогических и геоархеологических объектов.

Так, рентгеноструктурный и рентгенофазовый анализ используется для исследования состава и структурного состояния фрагментов ископаемой костной ткани позвоночных. Ископаемые костные и зубные ткани – ценный источник палеонтологической, палеоэкологической и археологической информации. Известно, что диагенетические изменения могут привести к преобразованию кристалличности костной ткани (изменению размеров кристаллитов, появлению дефектов решетки и др.), приводящей к сужению пиков на дифрактограммах (Pucéat et al., 2004). Под кристалличностью понимается степень упорядоченности апатитовой фазы костной ткани на атомном уровне. Анализ уширения линий на дифрактограммах может быть использован для простейшей оценки кристалличности в апатите костной ткани (Piga et al., 2011).

При исследовании древних керамических изделий получить оценки температуры их обжига можно путем идентификации специфических минеральных фаз, например, первичных (минералов, присутствующих в исходном глиняном сырье и не подвергающихся каким-либо изменениям в процессе обжига), новообразованных (кристаллических фаз, образующихся при обжиге), а также вторичных (фаз, образующихся в процессах захоронения обожженной керамики) (Cultrone et al., 2001).

Исследования фазового состава проводятся в ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН с использованием рентгеновского дифрактометра SHIMADZU XRD-7000. Предварительный качественный рентгенофазовый анализ проводится по основным рефлексам с использованием базы данных Powder Diffraction File-2 по аттестованной методике. Количественный полнопрофильный рентгенофазовый анализ проводится с помощью программного комплекса SiroQuant (Sietronics, Австралия) в соответствии с работой (Рянская и др., 2015). Критерием правильности результатов полнопрофильного рентгенодифракционного анализа служит соответствие элементного состава проб, рассчитанного по их фазовому составу, элементному составу, определенному независимым методом (РФА, ИСП-АЭС, ИСП-МС и др.) (Bish, Plotze, 2011). Данный подход реализован в ПО SiroQuant.

В докладе будут освещены вопросы специфики количественного рентгенофазового анализа на примере биогенного апатита ископаемой костной и зубной ткани человека и позвоночных, фрагментов керамических изделий бронзового века.

Работа поддержана грантом РФФ № 22-18-00593.

Литература:

- Рянская А.Д., Шапова Ю.В., Гуляева Т.Я., Галахова О.Л., Петрищева В.Г., Горбунова Н.П., Татарина Л.А. (2015) Полнопрофильный рентгенодифракционный анализ фазово-минерального состава пород-коллекторов нефти и газа с использованием программы SiroQuant (на примере искусственных смесей). ЕЖЕГОДНИК-2014, Тр. ИГГ УрО РАН 162: 267–275.
- Bish D.L., Plotze M. (2011) X-ray powder diffraction with emphasis on qualitative and quantitative analysis in industrial mineralogy. EMU notes in mineralogy. Advances in the characterization of industrial minerals / Ed. G.E. Christidis. L.: EMU and MSGB 9: 35–76.
- Cultrone G., Rodríguez-Navarro C., Sebastián E., Cazalla O., de la Torre M.J. (2001) Carbonate and silicate phase reactions during ceramic firing. Eur. J. Mineral 13: 621–634.
- Piga G., Santos-Cubedo A., Brunetti A., Piccinini M., Malgosa A., Napolitano E., Enzo S. (2011) A multi-technique approach by XRD, XRF, FT-IR to characterize the diagenesis of dinosaur bones from Spain. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 310: 92–107.
- Pucéat E., Reynard B., Lécuyer C. (2004) Can crystallinity be used to determine the degree of chemical alteration of biogenic apatites? Chemical Geology 205: 83–89.

Мёссбауэровская спектроскопия клинопироксенов гранулитов из ксенолитов кимберлитовой трубки Удачная, Якутия

Сапегина А.В.^{1,2}, Воронин М.В.², Перчук А.Л.^{1,2}, Сафонов О.Г.^{2,1}

¹*Кафедра Петрологии и Вулканологии, Геологический факультет МГУ,
Москва ann.sapagina@gmail.com;*

²*ИЭМ РАН им. Д.С. Коржинского, Черноголовка*

Вхождение Fe^{3+} в структуру клинопироксенов влияет на восстановление P-T условий пород высоких ступеней метаморфизма и позволяет оценивать окислительно-восстановительные условия их образования. Чаще всего содержание Fe^{3+} в клинопироксенах устанавливается на основе пересчётов микрозондовых анализов. В известных публикациях (Sobolev et al., 1999; Proyer et al., 2004) было выявлено, что существенные отличия измеренного мёссбауэровской спектроскопией и рассчитанного по микрозондовым анализам отношения $Fe^{3+}/\Sigma Fe$ значительно влияют на результаты геотермометрии в эклогитах. Однако учёт содержания Fe^{3+} в клинопироксенах позволяет не только корректно оценивать P-T параметры метаморфизма, но и открывает возможности для расчёта окислительно-восстановительных условий образования пород.

Присутствию Fe^{3+} в клинопироксенах из основных гранулитов коровых ксенолитов до последнего времени не уделялось большого внимания. Мы отобрали фракции клинопироксенов из трёх образцов Ud01-300, Ud01-127 и Ud79-27 ксенолитов гранулитов из кимберлитовой трубки Удачная (Perchuk et al., 2021) для съёмки методом мёссбауэровской спектроскопии. Полученные отношения $Fe^{3+}/\Sigma Fe$ в клинопироксенах составили 0.22-0.26. По микрозондовым анализам количество Fe^{3+} было рассчитано методом баланса зарядов, а соотношение минералов оценивалось по алгоритму Lindsley (Lindsley, 1984).

Сравнение результатов, полученных обоими методами, показывают, что количества Fe^{3+} в клинопироксенах из изученных ксенолитов, проанализированные мёссбауэровской спектроскопией и рассчитанные по микрозондовым анализам, очень близки и отвечают значительным содержаниям эгириновой молекулы (до 10 мол.%). Выводы предыдущих исследований о значительных ошибках при расчете Fe^{3+} по микрозондовым анализам для клинопироксенов из эклогитов, по всей видимости, не распространяются на неомфацитовые клинопироксены с относительно высокими содержаниями FeO_{tot} (выше 8 масс.%) и низким содержанием Na_2O (ниже 2 масс.%).

Мы проанализировали базы данных с опубликованными анализами клинопироксенов из коровых ксенолитов известных кратонов и межкратонных областей, а также клинопироксены из ферробазальтов траппов, архейских ферродолеритовых даек и ксенолитов габбро с уровней средней-нижней коры, составы которых близки к составу клинопироксенов из ксенолитов тр. Удачная. Кристаллохимический пересчёт анализов клинопироксенов выявил отношение $Fe^{3+}/\Sigma Fe$ в них от 0 до 0.6, что открывает перспективы восстановления P-T- fO_2 условий формирования коровых ксенолитов и некоторых магматических пород.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 18-17-00206-П (руководитель Сафонов О.Г.).

Литература:

- Lindsley D.H. (1983) Pyroxene thermometr. *American Mineralogist* 68(5-6): 477–493.
- Perchuk A.L. et al. (2021) Reduced amphibolite facies conditions in the Precambrian continental crust of the Siberian craton recorded by mafic granulite xenoliths from the Udachnaya kimberlite pipe, Yakutia. *Precambrian Research* 357: 106–122.
- Proyer A., Dachs E., McCammon C. (2004) Pitfalls in geothermobarometry of eclogites: Fe^{3+} and changes in the mineral chemistry of omphacite at ultrahigh pressures. *Contrib Mineral Petrol.* 147(3): 305–318.
- Sobolev V.N. et al. (1999) Precise Mössbauer milliprobe determination of ferric iron in rock-forming minerals and limitations of electron microprobe analysis. *American Mineralogist* 84(1-2): 78–85.

Характеристика кислой пирокластической вулкана Пик Сарычева, о. Матуа, Центральные Курилы

Скильская Е.Д., Кудеева Ш.С., Плутахина Е.Ю., Москалева С.В.

ИВУС ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский wideworldscience@gmail.com

Вулкан Пик Сарычева с абсолютной высотой 1497 м – один из самых активных вулканов Большой Курильской Гряды, расположившийся между островами-вулканами Райкоке (север) и Расшуа (юг). В строении вулкана выделяют полуразрушенную постройку древнего вулкана Матуа с вершинной кальдерой и молодой пирокластической конус Пик Сарычева, отложения которого занимают и перекрывают кальдеру (Мархинин, 1964). В течение прошедших двух веков достоверно известно о 10 извержениях вулкана. Наиболее изученные извержения 1976 и 2009 годов (Мартынов и др., 2015). Ландшафт равнинной части острова сильно усложнен антропогенным воздействием в XX веке (Округин и др., 2018).

Макроскопически пемза довольно плотная порфирированная порода светло-желтого цвета с характерной волокнисто-поровой текстурой. Поры разнообразной формы и размеров с тонкими стенками-перегородками. По содержанию SiO_2 и сумме щелочей состав пемзы меняется от андезибазальтов ($\text{SiO}_2=55.94$ масс.%) до дацитов ($\text{SiO}_2=67.70$ масс.%). По содержанию K_2O пемзы относятся к умеренно-калиевой серии пород.

Порфирированные вкрапленники составляют порядка 30% породы. Они представлены плагиоклазами и амфиболами. В основной массе присутствуют редкие микролиты плагиоклаза, мелкие зерна титаномагнетита, магнетита и ильменита.

Плагиоклаз представлен крупными широкопластинчатыми зональными фенокристаллами и незональными субфенокристаллами, хаотично рассеянными в основной массе породы. Зональность фенокристаллов выражена в резко контрастном строении ядерных и краевых зон. Внутреннее ядро таких плагиоклазов более основное по составу и относится к битовниту An_{71-75} , а внешняя широкая кайма сложена андезин-лабрадором An_{48-51} .

Роговая обманка встречается в виде идиоморфных удлиненно-призматических и ромбических фено- и субфенокристаллов. В шлифе имеет густо-зеленую окраску и отчетливый плеохроизм. Амфиболы относятся к магнезиальной роговой обманке и чермакиту.

Апатит встречается исключительно в виде включений в минералах-вкрапленниках, преимущественно в амфиболе и титаномагнетите.

Андезидацитовая пемза вулкана Пик Сарычева относится к типичным островодужным образованиям известково-щелочной серии пород. По набору минералов вкрапленников и их химическому составу пемза вулкана Пик Сарычева сопоставима с пемзой залива Львиная Пасть (Смирнов и др., 2017). По взаимоотношениям минералов-вкрапленников в пемзах вулкана Пик Сарычева можно сделать заключение о близодновременной кристаллизации плагиоклаза, амфибола, магнетита и апатита. Абсолютное преобладание амфибола среди темноцветных минералов указывает на высокое содержание воды в расплаве (примерно 4-5 масс.%) и значительную степень эволюционирования магматической системы.

Литература:

- Мартынов Ю.А., Рыбин А.В., Дегтерев А.В., Остапенко Д.С., Мартынов А.Ю. (2015) Геохимическая эволюция вулканизма о. Матуа (Центральные Курилы). Тихоокеанская геология 34(1): 13–33.
- Мархинин Е.К. (1964) Вулкан Сарычева. Бюллетень вулканологической станции 35: 44–58.
- Округин В.М., Кудеева Ш.С., Плутахина Е.Ю., Витер И.В., Верещага Е.М. (2018) Новые данные о вулканизме и рудообразовании о. Матуа (Курильские о-ва). Материалы XXXV Крашенинниковских чтений. Петропавловск-Камчатский: КГБУ «ККНБ им. С.П. Крашенинникова»: 255–258.
- Смирнов С.З., Рыбин А.В., Соколова Е.Н., Кузьмин Д.В., Дегтерев А.В., Тимина Т.В. (2017) Кислые магмы кальдерных извержений острова Итуруп: первые результаты исследования расплавных включений во вкрапленниках пемз кальдеры Львиная пасть и Перешейка Ветровой. Тихоокеанская геология 36(1): 52–69.

Масштабы регидратации субдуцированной литосферы на примере высокобарических комплексов северо-восточного Забайкалья и юго-западной Монголии

Скузоватов С.Ю.

ИГХ СО РАН, Иркутск skuzovатов@igc.irk.ru

Присутствие водных флюидов является важным фактором, ускоряющим диффузию, рост минеральных фаз и реакции в процессе метаморфизма, даже не будучи одним из реагентов, влияет на изменение плотности и реологии литосферы и, таким образом, играет важную роль в динамике орогенных поясов. Эксгумация высокобарических пород, как правило, сопровождается их ретроградной регидратацией на различных уровнях литосферы, развитие которой контролируется доступностью флюида. Принципиальной задачей является определение P-T условий и времени регидратации на различных стадиях эволюции высоко- и ультравысокобарических комплексов, в том числе для определения вариаций скорости эксгумации, однако конкретные P-T условия регидратации зачастую не рассматриваются.

В эклогитах континентального происхождения Северо-Муйского блока наблюдаемые составы граната ($X_{Alm} = 0.44-0.43$, $X_{Prp} = 0.20-33$, $X_{Grs} = 0.21-0.24$) и омфацита ($X_{Jd-in-Omp}$ до 0.42) и минеральных включений в нем указывают на наиболее вероятный диапазон условий $\sim 590-725^\circ\text{C}$ и $\sim 17-21$ кбар в бедных флюидом условиях. Петрологический анализ предполагает, что высокотемпературный рост граната и «сухой» пиковый парагенезис характерен для среднезернистых эклогитов, которые являются продуктом метаморфизма пород амфиболитовой фации, где рост граната контролировался дегидратацией амфибола и цоизита/клиноцоизита. Вариации состава граната, наиболее значительные в симплектитовых породах ($X_{Alm} = 0.48-0.56$, $X_{Prp} = 0.20-0.25$, $X_{Grs} = 0.21-0.30$), указывают на различную степень диффузионного переуравновешивания при росте температуры в постпиковых условиях (до $\sim 770-850^\circ\text{C}$ в условиях гранулитовой фации). Анализ состава порфиروبластового амфибола и цоизита показал последовательное формирование водосодержащих парагенезисов от высокобарических (~ 17 кбар) условий до более умеренных условий в присутствии плагиоклаза (до 12 кбар) при привносе H_2O , K и LILE в безводный эклогитовый парагенезис от 0.2-0.4 вес.% в эклогитах с омфацитом до 0.7-1.4 вес.% – в породах с его реликтами.

Реконструкция условий роста граната ($Alm_{47-59}Grs+Andr_{26-38}Prp_{5-24}Sps_{0-5}$) в эклогитах комплекса Алаг-Хадны (ЮЗ Монголия) показала его исходную нуклеацию в поле устойчивости хлорита при $530-550^\circ\text{C}$ и 15-16 кбар, и в поле эпидота-амфибола при $600-620^\circ\text{C}$ и 19-21 кбар. Пиковые P-T условия согласуются с данными по содержанию селадонитового минала в фенгите (Si 3.35-3.40 ф.е.), что подтверждает незначительную роль постпикового переуравновешивания. Эклогиты не подвергались полной дегидратации, а богатый Na высокобарический амфибол и фенгит были стабильны на пике метаморфизма (при минимальных значениях 0.13-0.38 вес.% H_2O). Формирование амфибол- и эпидотсодержащих парагенезисов происходило в преимущественно высокобарических условиях (15-21 кбар) при исходно ограниченном добавлении водного флюида в количестве эквивалентном $\sim 0.3-0.4$ вес.% H_2O относительно пикового парагенезиса, а дальнейшая эволюция состава амфибола при добавлении в парагенезис эпидота предполагает последовательную декомпрессию и более высокий объем задействованного флюида (0.9-1.3 вес.% H_2O).

Сравнение структурно-текстурных и минералогических особенностей эклогитов позволяют предполагать преимущественно изохимический стиль регидратации эклогитов в двух высокобарических комплексах, без существенного привноса большинства главных компонентов, за исключением K и LILE, концентрирующихся в фенгите и амфиболе. Наиболее вероятные диапазоны условий проградной эволюции для эклогитов двух комплексов соответствуют безводному и – напротив – амфибол- и фенгитсодержащему пиковым эклогитовым парагенезисам и существенно различной модальной пропорции граната. Однако масштабы их регидратации и объемы метаморфогенных флюидов могут быть в целом схожи, а условия и степень привноса флюидомобильных элементов контролируются доступностью метаморфогенного флюида на тех или иных уровнях континентальной коры, степенью утолщения коры на стадии эксгумации высокобарических пород и термальным режимом.

Исследования проводятся при поддержке РФФ (грант № 21-77-10038).

Флюидно-магматические системы, связанные с эволюцией кислых магм, обогащенных летучими и флюсующими компонентами.

Смирнов С.З.

ИГМ СО РАН, Новосибирск ssmr@igm.nsc.ru

Летучие и флюсующие компоненты играют ключевую роль в эволюции силикатных магм. Летучими считаются компоненты, обладающие высоким давлением насыщенного пара, определяющую их способность входить в состав подвижных флюидных фаз. Наиболее распространенными летучими компонентами силикатных магм являются H_2O и CO_2 . В подчиненных количествах встречаются соединения серы и азота. В последнее время появляются данные о существенной роли углеводородных соединений в магматических флюидах. В подавляющем большинстве случаев флюсующие компоненты, такие как соединения бора, фтора и хлора, щелочных металлов, также обладают сравнительно высокой летучестью. Однако их главная роль в эволюции магм заключается в значительном снижении температур их солидуса.

В процессе магматической кристаллизации летучие и флюсующие компоненты ведут себя как несовместимые, так как не входят в состав высокотемпературных минералов, образующихся на ее ранних стадиях. Максимальные уровни накопления этих компонентов отмечаются в наиболее поздних остаточных расплавах совместно с другими некогерентными элементами, включая стратегически важные рудные металлы. Таким образом, изучение природы, свойств и параметров образования остаточных расплавов играет ключевую роль в построении моделей развития флюидно-магматических систем, реконструкции природы эндогенных флюидов и связанного с ними минерало- и рудообразования.

Примером, иллюстрирующим развитие флюидно-магматических систем, являются гранитные и пегматитовые магмы, обогащенные водой, бором, фтором и щелочными металлами. Именно с ними связаны гидротермальные и грейзеновые месторождения редких металлов, а также образование пегматитов с редкометалльной минерализацией.

Кислые алюмосиликатные расплавы, возникающие либо в результате глубокой дифференциации глубинных магм или в результате частичного плавления коровых субстратов, характеризуются высокими степенями концентрирования многих компонентов, обладающих некогерентным поведением, включая редкие металлы (Li, Ta, Nb, Sn, W, Mo), летучие и флюсующие компоненты (H_2O , CO_2 , соединения F, Cl и B). Дальнейшее поведение этих компонентов и их история будут определяться процессами кристаллизационной дифференциации, дегазации и жидкость-жидкостной несмесимости (ликвации). В лекции будут рассмотрены теоретические основы физико-химического анализа таких магматических систем на примере современных экспериментальных данных в системах типа «силикат-вода».

На основе данных по РТ параметрам эволюции, фазовому составу магм, химическим составам расплавов редкометалльных гранитных массивов Восточного Забайкалья, Приморья и Горного Алтая; тел гранитных пегматитов Памира и Центрального Забайкалья с редкометалльной минерализацией будут рассмотрены пути эволюции, особенности состава флюидных фаз, флюидно-магматического взаимодействия и особенности перехода от магматической кристаллизации к пневматолитовой и гидротермальной. Будет показаны два разных сценария развития гранитоидных флюидно-магматических систем: гранитный и пегматитовый.

Для реконструкции источников вещества и причин образования син- и постмагматических месторождений редких металлов, связанных с редкометалльными гранитоидами или гранитными пегматитами, необходимо хорошо представлять агрегатное состояние и химический состав флюидов, играющих ведущую роль в транспорте рудного вещества на поздних этапах эволюции магм. В лекции будут рассмотрены эти особенности на примере водных флюидов гранитных пегматитов с редкометалльной минерализацией.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 21-07-00175.

Количественный анализ структур кумулатов расслоенных интрузивов, как ключ к пониманию динамики таких магматических систем

Соболев С.Н.

ГЕОХИ РАН, Москва ssn_collection@bk.ru

Структуры кумулатов. Разные аспекты структуры кумулатов записывают условия их формирования от начала кристаллизации до полного затвердевания породы. Последовательно образуются распределение кристаллов по размеру (CSD) и форме, кластеры зерен, ориентировка, характерные контакты. Позже в адкумуляционном процессе могут преобразовываться границы зерен и двугранные углы. Зональность минералов по составу и включениям дополняет анализ вышеперечисленных деталей структуры.

Распределение кристаллов по размеру и форме. Сравнение CSD и формы кристаллов в кумулатах позволяют выяснить их относительную скорость кристаллизации, т.е. вариации температурного контраста между данными порциями магмы и вмещающей средой. В общем случае, CSD оказывается более крутым, а кристаллы анизометричными при более быстрой кристаллизации. Для кумулатов характерно существование трех главных видов CSD (в логарифмических координатах): линейное, бимодальное и логнормальное. Линейное распределение означает кристаллизацию без резких скачков скорости остывания, бимодальное распределение отвечает ускорению кристаллизации на некотором этапе. Логнормальное CSD – это преобразованное распределение, которое образуется при более эффективном растворении мелких кристаллов (за счет лучшей диффузии вокруг них) и последующим дорастанием крупных в условиях осцилляции температуры.

Примеры структурных наблюдений и петрологические следствия. В узком интервале (~300 м) разреза дунитов Йоко-Довыренского массива удалось выделить все три типа описанных CSD. Линейные распределения сохранились в кумулатах, непреобразованных и изолированных от промывки поровым расплавом во время компакции. Благодаря изоляции в кумулусе сохранился избыточный по отношению к SCSS механически накопленный сульфид. Для наиболее высокотемпературных продуктов первичных довыренских магм (они варьируют в диапазоне ~1200-1300°C по (Ariskin et al., 2018)) в части образцов характерны бимодальные распределения оливина по размеру и иногда его удлинение. Это обусловлено контактом с низкотемпературными порциями во время заполнения камеры. Логнормальные распределения характерны для дунитов, которые остались на месте участков кристаллической каши с долгоживущей проницаемостью, где во время компакции происходила фильтрация порового расплава. Здесь оливин был немного растворен и докристаллизован фильтрующимся расплавом, а сульфид «вымыт».

Другой случай логнормального распределения описан для дунитов и гарцбургитов Мончеплутона (г. Травяная). В обоих типах пород CSD оливина логнормальное, но в присутствии небольшого количества ортопироксена в породе наклон CSD меняется на более пологий, что совершенно однозначно отражает процесс растворения преимущественно мелких кристаллов в ходе перитектической реакции. В Монче обращает на себя внимание габитус ортопироксена, различный для ортопироксенитов и гарцбургитов. Так, в ортопироксенитах он сильно вытянут, что означает более быструю кристаллизацию, чем в гарцбургитах, где ортопироксен гораздо более изометричный и крупный.

Бимодальное распределение нефелина было отмечено в урритах одной из пачек расслоенного комплекса Ловозерского плутона. Существование двух популяций нефелина сопровождается в некоторых зернах реликтами тонких контрастных зон, обогащенных кремнием и железом. Эти зонки были кристаллизованы между двумя основными популяциями и, возможно, маркировали этап прохождения магмы по каналу с сопутствующей дегазацией. Тогда крупный нефелин относится к интрателлурической популяции из предыдущей камеры, а мелкий кристаллизован в самой камере Ловозера во время затвердевания рассмотренной пачки.

Литература:

Ariskin A., Danyushevsky L., Nikolaev G., Kislov E., Fiorentini M., McNeill A., Kostitsyn Y., Goemann K., Feig S., Malyshev A. (2018) The dovyren intrusive complex (southern Siberia, Russia): Insights into dynamics of an open magma chamber with implications for parental magma origin, composition, and Cu-Ti-PGE fertility. *Lithos* 302-303: 242–262.

Условия образования магм Кумрочского вулканического комплекса

Тобелко Д.П.¹, Портнягин М.В.²

¹ГЕОХИ РАН, Москва dariatobelko@gmail.com;

²Geomar Helmholtz Centre for Ocean Research, Kiel, Germany

В большинстве субдукционных зон область между глубоководным желобом и вулканическим фронтом амагматична вследствие низкой температуры мантийного клина. Редким исключением является Кумрочский вулканический комплекс на восточной Камчатке (Успенский, Шапиро, 1984), расположенный на аномально близком расстоянии от субдуцирующей плиты – оцененные глубины не превышают 50-70 км.

В этой работе было детально изучено 9 образцов базальтов и андезибазальтов. Примечательной особенностью оливинов из пород Кумрочского вулканического комплекса является высокое содержание в них NiO – 8700 г/т (0.69 масс.% NiO), что выше, чем 6300 г/т (0.50 масс.% NiO) по данным (Nishizawa et al., 2017). Эти концентрации являются максимальными из известных для оливина из пород Камчатки.

В результате проведенных исследований на основе микроэлементной термобарометрии получено, что родоначальные расплавы Кумрочского вулканического комплекса содержали в среднем 7-11 масс.% H₂O (рассчитанные значения), кристаллизовались при температуре 1100 ± 70°C (Fo > 80) (Coogan et al., 2014, Mallmann, O'Neill, 2013), летучести кислорода 1.5 ± 0.6. Для оценки возможного вклада пироксенитового источника в образование магм использовался критерий из работы (Sobolev et al., 2007). Максимальный вклад пироксенитов установлен для высоко-магнезиального андезито-базальта с 56 масс.% SiO₂, минимальный – для базальтов с SiO₂ ~ 52 масс.%. Полученные данные по составу оливина и температуры кристаллизации магм, не превышающие 1150°C для оливина Fo > 89, свидетельствуют об образовании серии магнезиальных пород хребта Кумроч в результате низкотемпературного плавления мантийного источника, представлявшего собой смесь перидотита и пироксенита (рис. 1).

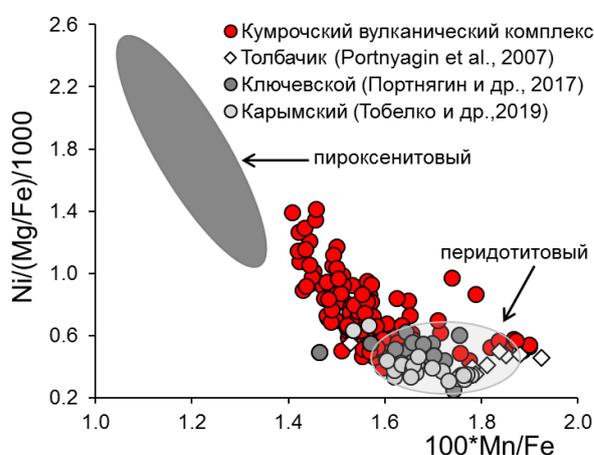


Рис. 1. Состав вкрапленников оливина из 9 образцов пород Кумрочского вулканического комплекса. Полями показаны составы оливинов, кристаллизующихся из магм, имеющих перидотитовый и пироксенитовый источники (Sobolev et al., 2007). Для сравнения показаны данные для Карымского вулкана (Восточный вулканический пояс) и для вулканов ЦКД – Ключевской и Толбачик.

Литература:

- Успенский В.С., Шапиро М.Н. (1984) Позднечетвертичный ареальный вулканизм хребта Кумроч (Восточная Камчатка). Вулканология и сейсмология 3: 57–65.
- Coogan L.A., Saunders A.D., Wilson R.N. (2014) Aluminum-in-olivine thermometry of primitive basalts: Evidence of an anomalously hot mantle source for large igneous provinces. Chem. Geol. 368: 1–10.
- Mallmann G., O'Neill H.S. (2013) Calibration of an Empirical Thermometer and Oxybarometer based on the Partitioning of Sc, Y and V between Olivine and Silicate Melt. Journal of Petrology 54(5): 933–949.
- Nishizawa E., Nakamura H., Churikova T. et al. (2017) Genesis of ultra-high-Ni olivine in high-Mg andesite lava triggered by seamount subduction. Scientific reports 7: 11515.
- Sobolev A.V., Hofmann A.W., Kuzmin D.V., Yaxley G.M., Arndt N.T. et al. (2007) The Amount of Recycled Crust in Sources of Mantle-Derived Melts. Science 316: 412–417.

Условия и эволюция метаморфизма метапелитов структуры Кэмпбелл, Центральная Зона комплекса Лимпопо, ЮАР

Ушакова С.А.¹, Сафонов О.Г.^{2,1,3}, Япаскурт В.О.¹, ван Ринен Д.Д.³

¹Геологический факультет МГУ, Москва *sonya.ushakova.2017@gmail.com*;

²ИЭМ РАН, Черногоровка *oleg@iem.ac.ru*;

³Department of Geology, University of Johannesburg, Johannesburg, South Africa

В эволюции Центральной зоны (ЦЗ) гранулитового комплекса Лимпопо (ЮАР), расположенного между кратонами Каапвааль и Зимбабве, выделяются три этапа (Kröner et al., 2018): D1/M1 3.1-3.2 млрд лет; D2/M2 2.66-2.61 млрд лет и D3/M3 2.01-2.03 млрд лет. В ходе D2/M2 образовались главные структурные элементы ЦЗ, а D3/M3 – это преимущественно термальное событие, которое знаменовалось реактивацией зон сдвигово-пластических деформаций (ширзон), заложившихся в ходе события D2/M2. Вследствие термального и флюидного воздействия во многих породах ЦЗ были стерты свидетельства события D2/M2, так что разделение событий D2/M2 и D3/M3 в ЦЗ является проблематичным. Например, Л.Л. Перчук и др. (Perchuk et al., 2008) выявили, что в метапелитах ширзон в пределах структуры Кэмпбелл – одной из мегаструктур, сформированных в ходе события D2/M2, зафиксировано лишь палеопротерозойское событие. Однако для пород этой структуры известны U-Pb возраста, отчетливо делящиеся на группы 2.01 и 2.6 млрд лет (van Reenen et al., 2008). Данная работа посвящена поиску свидетельств неоархейского события в метапелитах структуры Кэмпбелл на основе дополнительного исследования образца метапелита О6-19, изученного Л.Л. Перчуком и др. (Perchuk et al., 2008).

Текстура породы выражена в чередовании меланократовых (микроширзоны) и лейкократовых (лейкосомы) областей. Картирование порфиروبластов граната (Grt) из лейкосомы показали наличие обогащенных СаО реликтов (рис. 1). Они образовались в ходе распада раннего граната при снижении давления и “залечиванием” трещин гранатом с меньшим X_{Ca} с включениями силлиманита (Sil) и кварца (Qz). Каймы плагиоклаза (Pl) вокруг граната (рис. 1) отражают реакцию Grs (в Grt) + Sil + Qz = An (в Pl) при декомпрессии. Моделирование ассоциаций метапелита О6-19 с помощью программного комплекса PERPLE_X показало, что гранат с составом реликтов формировался при 9.5-10 кбар и 810-830°C в ассоциации с биотитом, полевыми шпатами, кварцем, рутилом, силлиманитом и гранитным расплавом. Порода испытала субизотермическую декомпрессию в присутствии гранитного расплава до давлений 5.5-6.0 кбар в ходе эксгумации в составе ЦЗ (Safonov et al., 2021). Уменьшение X_{Mg} граната к краям зерен при Fe/Mg обмене с кордиеритом и биотитом соответствовало остыванию до температур порядка 650°C в ходе события D3/M3. Анализ содержания H₂O и CO₂ в кордиерите с помощью КР-спектроскопии и обилие водно-солевых включений указывают на водный состав флюида на этом этапе.

Исследование выполнено в рамках гранта РФФ № 18-17-00206-П.

Литература:

- Kröner A., Brandl G., Brandt S., Klemd R., Xie H. (2018) Geochronological evidence for Archaean and Palaeoproterozoic polymetamorphism in the central zone of the Limpopo Belt, South Africa. *Precam. Res.* 310: 320–347.
- Perchuk L.L., van Reenen D.D., Varlamov D.A., van Kal S.M., Tabatabaeimanesh, Boshoff R. (2008) P–T record of two high-grade metamorphic events in the Central Zone of the Limpopo Complex, South Africa. *Lithos* 103: 70–105.
- Safonov O.G., Yapaskurt V.O., Elburg M.A., van Reenen D.D., Rajesh H.M., Smit C.A., Perchuk A.L., Butvina V.G. (2021) Melt-to shear-controlled exhumation of granulites in granite–gneiss domes: petrological perspectives from metapelite of the Neoarchean Ha-Tshanzi structure, Central Zone, Limpopo Complex, South Africa. *J. Petrol.* 62: 1–26.
- van Reenen D.D., Boshoff R., Smit C.A., Perchuk L.L., Kramers J.D., McCourt S., Armstrong R.A. (2008) Geochronological problems related to polymetamorphism in the Limpopo Complex, South Africa. *Gondwana Res.* 14: 644–662.

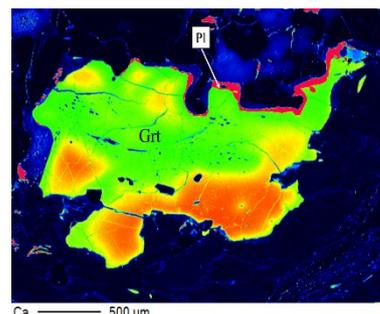


Рис. 1. Реликты более раннего граната в метапелите О6-19

Зональные гранаты эклогит-глаукофансланцевых комплексов и их РТ интерпретация

Федькин В.В.

ИЭМ РАН, Черноголовка vfedkin@iem.ac.ru

В высокobarных эклогит-глаукофансланцевых комплексах (ЭГСК) в условиях постоянной тектонической активности и меняющегося режима метаморфизма блоки высокobarных основных пород часто включены в виде отдельных будин, прослоев и линз в метаосадочные или гранитоидные толщи, не имеющие признаков HP метаморфизма. Существуют две точки зрения для объяснения данного явления: модель когерентного формирования слоистых толщ (CU-модель) и модель тектонического меланжа (TM-модель) (Lü, Bucher, 2018). Методами минералогической термобарометрии и детального микросондового анализа состава и зональности ключевых наиболее информативных минералов (граната, клинопироксена и др.) проведена оценка значимости этих концепций при формировании контрастных пород Максютковского (Южный Урал) и Атбашинского (Южный Тянь-Шань) ЭГСК.

Оба комплекса входят в состав Урало-Монгольского складчатого пояса и принадлежат к его внешней и внутренней ветвям, соответственно. Эклогитовые минеральные ассоциации в их составе образовались в широком диапазоне температур (350-750°C), но имеют различия по уровню глубинности своего происхождения: более глубокий для Максютковского комплекса – в области устойчивости коэсита и алмаза при $P=3.0-3.2$ ГПа, и менее глубокий – в области стабильности парагенезиса Ab-Jd-Qtz в интервале $P=1.2-1.9$ ГПа – для Атбашинского террейна. Массовые определения параметров образования минеральных ассоциаций из пород контрастного состава демонстрируют принципиально разную историю их формирования. Гранаты из эклогитов Максютковского комплекса демонстрируют сложную многоактную, часто реверсивную зональность своего состава. Максимальные значения ключевых параметров граната (X_{Prp}) и равновесного с ним омфациита (X_{Jd}) на 15-25 единиц выше аналогичных показателей Атбашинских эклогитов, подчеркивая разницу в глубинности их формирования. РТ тренды эволюции параметров метаморфизма эклогитовых образований часто имеют противоположные направления. Прогрессивные и регрессивные тренды образуют сопряженные пары в соответствии с отдельными этапами развития комплекса (Fedkin, 2020).

В Атбашинском комплексе в центральных частях крупных эклогитовых будин прогрессивная зональность граната и омфациитовый состав пироксена ($X_{Jd}=0.4-0.6$) фиксируют преимущественно проградные РТ тренды метаморфизма с параметрами до $T=650-700^\circ\text{C}$ и $P=14-15$ кбар. Такие условия характерны для ранней стадии формирования комплекса и сохранились в телах эклогитов в результате тектонического меланжа. Они не связаны с последующим формированием вмещающих пород, которые в контактах с эклогитами фиксируют более низкие параметры, вплоть до $P=0.8-1.0$ ГПа и $T=300-550^\circ\text{C}$. В краевых частях эклогитовых тел и в окружающих их породах намечается тенденция разворота РТ трендов по часовой стрелке («clockwise»). Прогрессивная зональность породообразующих фаз (Grt, Crx и др.) меняется на обратную, фиксируя начало ретроградного этапа метаморфизма. Максимальные параметры метаморфизма на этой стадии для обоих комплексов не превышают $P=0.5-0.6$ ГПа и $T=550-600^\circ\text{C}$. В кристаллических сланцах матричного комплекса образуется пироксен второй генерации с минимальной долей жадеитового компонента ($X_{Jd}=0.03-0.08$). В равновесии с гранатом такой состав показывает параметры, принципиально отличные от HP условий образования эклогитовых будин. На поздних стадиях развития ЭГСК широкий спектр вмещающих сланцев и эклогитов образуют единую серию РТ трендов, свидетельствующую о совместном, когерентном характере их образования.

Работа выполнена в рамках госзадания FMUF-2022-0004, рег. № 1021051302305-5-1.5.2; 1.5.4, и Программы Фулбрайт Института Международного образования, 2015 г.

Литература:

- Fedkin V.V. (2020) Four Stages of the Thermal Evolution of Eclogites from the Maksyutov Complex (South Urals). *Russian Geology and Geophysics* 61(5-6): 543–558.
- Lü Z., Bucher K. (2018). The coherent ultrahigh-pressure terrane of the Tianshan meta-ophiolite belt, NW China. *Lithos* 314-315: 260–273.

Экспериментальное исследование выщелачивания металлов из вмещающих меднопорфировое оруденение пород (Северо-Восток России)

Филатова О.Р., Лубкова Т.Н., Яблонская Д.А.

Геологический факультет МГУ, Москва orlova8313@yandex.ru

В ходе освоения сульфидных месторождений образуются отвалы вмещающих пород и забалансовых руд. Взаимодействие геологических материалов отвалов с атмосферными осадками и кислородом приводит к окислению сульфидных минералов и формированию кислых высокоминерализованных дренажных вод со сверхнормативным содержанием сульфат-иона и металлов. Такие дренажные воды негативно воздействуют на природные водотоки и сопряженные компоненты окружающей среды, что обуславливает необходимость выявления рисков их формирования на начальном этапе освоения месторождений (Lottermoser, 2010).

Прогнозная оценка выщелачивания металлов проводилась для пород Баимской площади, вмещающих меднопорфировое оруденение (Чукотский автономный округ). Предварительно были проведены статические тесты, показавшие, что породы имеют высокий потенциал кислотообразования. Экспериментальное моделирование выщелачивания металлов проводили для трех образцов вмещающих оруденение пород (монцодиориты, монцодиорит-порфиры, диоритовые порфириды) с использованием модельных растворов: дистиллированная вода с рН 5/4 (I), раствор серной кислоты с рН 3, σ 400 мкСм/см (II) и раствор серной кислоты с 1 г/л Fe^{2+} (введено в форме $FeSO_4 \cdot 7H_2O$), рН 3.3, σ 2700 мкСм/см (III). Растворы I и II имитируют маломинерализованные воды разной кислотности, III – кислые рудничные воды с высоким содержанием Fe^{2+} . Эксперимент проводили по схеме 10-ти ступенчатого выщелачивания: 30 г образца заливали 150 мл раствора, через сутки раствор отфильтровывали через мембрану МФАС-ОС-2 и анализировали фильтрат (рН, σ , содержание макро- и микрокомпонентов).

Значение рН фильтратов I и II варьировало от 7.4 до 8.0 ед. для всех образцов вмещающих пород, фильтратов III – изменялось от 4.4–4.8 ед. до 2.7–3.3 ед. на начальном и конечном этапе эксперимента соответственно. Электропроводность фильтратов I и II монотонно снижалась от 600–1400 мкСм/см до 130–400 мкСм/см, фильтратов III – составляла 2700–3000 мкСм/см в течение всего эксперимента (сопоставимо с σ исходного выщелачивающего раствора). По макрокомпонентному составу фильтраты I и II преимущественно сульфатно-гидрокарбонатные кальциевые и магниевые-кальциевые. В катионном составе фильтратов III, ожидаемо сульфатных, наблюдается смена преобладающего иона кальция на ион магний, а также, вследствие растворения силикатных минералов, натрия и калия.

Взаимодействие модельных растворов I и II с вмещающими породами приводит к развитию нейтрального дренажа и выщелачиванию элементов, подвижных в нейтральной и щелочной среде. Так, содержание Mo в экспериментальных растворах превышает ПДК для вод рыбохозяйственного значения (Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552) в $n \cdot 10$ раз. По комплексу типоморфных элементов (Cu, Mo, Zn, Cd, Pb, Fe, Mn) фильтраты I и II преимущественно относятся к категории низкометалльных вод ($\Sigma Me < 10^3$ мкг/л).

Взаимодействие модельного раствора III с высоким содержанием Fe^{2+} , окисляющегося до Fe^{3+} , приводит к активации процессов окисления сульфидов (в присутствии Fe^{3+}) и выщелачиванию элементов, подвижных в кислой среде. Содержание Cu превышает ПДК в $n \cdot 10 \cdot 10^4$ раз, Zn и Pb – в $n \cdot 10^2$ раз. Также происходит растворение силикатных минералов и выщелачивание Al ($n \cdot 10^2$ ПДК). По комплексу микроэлементов фильтраты III относятся к категории высокометалльных дренажных вод (ΣMe от 10^3 до 10^5 мкг/л).

Таким образом, потенциально кислотопродуцирующие вмещающие породы Баимской площади при взаимодействии с маломинерализованными растворами разной кислотности могут продуцировать нейтральные или слабощелочные преимущественно низкометалльные дренажные воды. Контакт вмещающих медно-порфировое оруденение пород с кислыми рудничными водами, обогащенными Fe^{2+} , может привести к активации процессов окисления сульфидов и выщелачиванию подвижных в кислой среде элементов (Cu, Zn, Pb).

Литература:

Lottermoser B.G. (2010) Mine Wastes. Characterization, Treatment and Environmental Impacts, 3rd ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 400 p.

Использование метода нейтронного рассеяния для анализа поведения воды в пористых средах

Филимонов А.В.¹, Вахрушев С.Б.², Кумзеров Ю.А.²

¹*Академический университет им. Ж.И. Алферова РАН, Санкт-Петербург filalex@inbox.ru;* ²*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург s.vakhrushev@mail.ioffe.ru*

Методом неупругого рассеяния нейтронов проведено исследование атомной динамики в процессе фазового перехода – плавление/затвердевание воды, находящейся в условиях ограниченной геометрии (в каналах хризотилового асбеста). Установлено, что вода в ограниченной геометрии имеет высокую степень упорядочения протонов. Обнаружена новая модификация льда. Отличительной особенностью является упорядочение водорода на связях, которое ранее наблюдалось только в фазах высокого давления.

Вода обладает богатым разнообразием кристаллических форм, из которых в настоящее время достоверно известно тринадцать. Структуры этих кристаллических модификаций обладают тем общим свойством, что каждая молекула воды в них образует ровно четыре водородных связи с соседними молекулами воды, причем эти связи направлены к вершинам правильного или немного искаженного тетраэдра. Во всех случаях (кроме льда X) молекула воды сохраняет свою целостность, являясь в двух из четырех водородных связей донором и в двух других – акцептором атома водорода. Особенно неоднозначным становится процесс плавления/замерзания воды в условиях ограниченной геометрии. Параметры перехода и структура льда существенно зависят от размера пор и каналов, характера интерфейсов топологии системы.

Целью работы являлось исследование эволюции атомной динамики в процессе фазового перехода – плавление/затвердевание воды в каналах хризотилового асбеста. Эта система крайне интересна, так как может быть рассмотрена как аналог биологических мембран и напитанных водой горных пород. Динамика жидкостей в условиях ограниченной геометрии сильно отличаются от динамики в объемном состоянии. Трансформация динамики воды является наиболее изученной, ввиду ее практического значения.

Проведенные нами ранее измерения неупругого рассеяния нейтронов выявили явные отличия от поведения объемной воды. Были проведены попытки исследования структуры замерзшей воды методами рентгеновской дифракции, однако не удалось выявить четкой дифракционной структуры, соответствующей одной из известных форм льда, что может быть объяснено малостью кластеров льда в наноканалах асбеста. Для решения этой задачи был поставлен эксперимент по неупругому рассеянию нейтронов в воде, внедренной в наноканалы высокоориентированной матрицы хризотилового асбеста.

Нами был проведен эксперимент по неупругому рассеянию нейтронов на воде, внедренной в наноканалы высокоориентированной матрицы хризотилового асбеста. Эксперимент проводился на спектрометре SEQUOIA импульсного нейтронного источника SNS (ORNL, USA). Интервал температур составлял $7 < T < 280$ К, т.е. перекрывал как область существования жидкой воды, так и возможные температуры замерзания, как в объемных образцах, так и в воде в условиях ограниченной геометрии. Измерение картин рассеяния нейтронов проводилось в двух вариантах геометрии эксперимента: с осями канала, ориентированными вдоль вектора передачи импульса Q в плоскости нейтронного рассеяния; перпендикулярно к плоскости рассеяния. Это позволило нам проследить предпочтительное направление колебаний атомов водорода, соответствующих различным спектральным диапазонам.

Выводы: 1) Вода в ограниченной геометрии в исследуемых волокнах имеет высокую степень упорядочения протонов; 2) Обнаружена новая модификация льда. Отличительной особенностью является упорядочение водорода на связях, которое ранее наблюдалось только в фазах высокого давления; 3) Кристаллическая структура матрицы (наличие групп –ОН, перпендикулярных оси канала) «навязывает» анизотропию колебаний внедренным молекулам воды.

Сравнительный анализ оценки параметра пористости горных пород объёмными и плоскостными методами

Хасанов И.И., Малёвин И.В.

*РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва Khasanov.i@gubkin.ru;
ilya.pix111@gmail.com*

Среди большого количества методов изучения горных пород можно выделить те, в которых информация о пористости определяется косвенно на основе изучения различных двумерных поверхностей, представленными либо поверхностными сколами, либо срезами (спилами) горных пород. Данная работа представляет собой попытку установить степень связи и корреляции значений просветности (поверхностной пористости) на срезах, ориентированных различным образом, со значениями пористости образцов для различного типа пород-коллекторов нефти и газа с помощью томографических исследований.

Целью работы является количественная и качественная оценка достоверности характеристики объёмных показателей пустотного пространства посредством его изучения плоскостными методами.

В задачи данного исследования входят:

- Подбор образцов различных типов пород-коллекторов, с различным типом пустотного пространства, относящихся к различным продуктивным горизонтам различных нефтегазоносных областей.
- Проведение томографических исследований выбранных образцов.
- Создание методики и соответствующего ей программного кода, предназначенного для формирования искусственных срезов различной ориентировки внутри томографического объема.
- Проведение экспериментов по выделению и определению просветности для каждого выбранного случайным образом среза.
- Статистический и сравнительный анализ полученных результатов.

Начальной стадией этого исследования является выбор и подготовка образцов. Большая часть коллекторов нефти и газа приходится на карбонатные и терригенные горные породы, в связи с этим в исследовании использовались 8 образцов, относящиеся к этим типам горных пород и представленных образцами керна из продуктивных скважин. Далее каждый образец исследуется методами компьютерной рентгеновской томографии.

Для написания основного программного кода данного исследования был выбран язык Matlab. Основная логика алгоритма заключается в формировании дискретной плоскости внутри трехмерной матрицы. Результатом работы скрипта является двумерная бинарная матрица.

При помощи данного алгоритма из трехмерной матрицы формируется 30000 слайсов, расположенных и ориентированных случайным образом, и соответственно для каждого слайса считается его просветность. Такое количество слайсов было выбрано исходя из времени, затраченного на их формирование, и репрезентативности данного объема.

В ходе исследования было проанализировано 4 образца терригенных горных пород и 4 образца карбонатных. Для каждого образца были построены диаграммы распределения просветности, а также посчитаны коэффициенты асимметрии.

По результатам исследования можно сделать вывод, что оценки емкостных параметров плоскостными методами характеризуются высокой степенью неточности. Их результаты в высокой степени зависят от литологических особенностей исследуемого образца, а именно, от его литологического состава, структуры и распределения пустотного пространства.

Минералогия гранитного пегматита Амиго, СВ Памир, Таджикистан

Хайруллина А.И.¹, Гриценко Ю.Д.²

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва *khayrullina-1999@bk.ru*;

²Минералогический музей имени А.Е. Ферсмана РАН, Москва
ygritsenko@rambler.ru

Проявление Амиго расположено на территории Таджикистана в Северо-Восточной части Памира в 120 км к СЗ от пос. Мургаб на приводораздельной, цирковой части сая Джалан, на высоте 4900 м. Этот район сложен мраморами, кристаллическими сланцами и гнейсами сарыджилгинской свиты протерозойского возраста (PR₃sr), местами прорванными телами амфиболитов, гранитов и гранит-пегматитов (Скригитиль, 1996). В зоне, состоящей из сахаровидного альбита, кальцита, доломита, развиты светло-серые прозрачные призматические кристаллы мариалита. Состав мариалита отвечает формуле $\text{Na}_{2.55}\text{Ca}_{1.45}\text{Al}_{3.12}\text{Si}_{7.88}\text{O}_{24}[\text{Cl}_{0.75}(\text{SO}_4)_{0.16}(\text{CO}_3)_{0.1}]$. В контактовой зоне в агрегатах кальцита и альбита установлены единичные изометричные кристаллы размером до 70 мкм фосфата иттрия. Вероятнее всего – это чёрчит-(Y) – $\text{YPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, характерный минерал гранитных редкометалльных пегматитов Кольского полуострова, Южного Урала, массива Кент (Казахстан) (Подпорина и др., 1983). Состав (масс.%): P_2O_5 : 29.37-32.35; CaO: 0.36-0.83; Y_2O_3 : 38.2-42.7; Gd_2O_3 : 1.58-3.08; Dy_2O_3 : 2.94-4.44; Yb_2O_3 : 2.58-3.28; V_2O_5 : 1.61.

Был изучен турмалин из различных ассоциаций пегматита Амиго: турмалин-1 образует крупные длиннопризматические кристаллы в графической зоне и зоне альбитизации; турмалин-2 образует крупные кристаллы в миароловых полостях с топазом, альбитом-клевеландитом; турмалин-3 образует длиннопризматические чёрные кристаллы в ассоциации с синим бериллом; турмалин-4 – турмалин миароловых полостей, встречается в виде игольчатых чёрных кристаллов с бесцветным бериллом и флюоритом. Берилл образуется в 3 различных ассоциациях: 1) светло-зеленые призматические кристаллы берилла-1 размером до 2 см в альбит-микроклиновой зоне; 2) берилл-II бесцветный, идеально прозрачный; 3) берилл-III имеет ярко синюю зонально-секториальную окраску. Средний состав берилла центральной части отвечает $\text{Na}_{0.26}\text{Be}_3(\text{Al}_{1.8}\text{Mg}_{0.25}\text{Fe}_{0.28})\text{Si}_{5.91}\text{O}_{18}$, краевой части $\text{Na}_{0.13}\text{Be}_3(\text{Al}_{1.8}\text{Mg}_{0.03}\text{Fe}_{0.03})\text{Si}_{5.91}\text{O}_{18}$. Гроат с соавторами (Groat et al., 2010) описали берилл, содержащий 5.92 масс.% FeO, на территории Южного Юкона. Гидроксил-апатит образует изометричные кристаллы в периферической зоне кристаллов берилла-2. Данный апатит содержит довольно высокие концентрации серы – до 4.42 масс.% SO_3 . Подобный сульфат-содержащий апатит был найден в Крестморе, Округ Риверсайд, Калифорния, США (Pasero et al., 2010) там, по данным (Pasero et al., 2010), содержание сульфат-иона достигает 1.5 атома на формулу.

Необычным оказался состав многих минералов пегматита Амиго. Источником повышенных концентраций ряда элементов послужили вмещающие ангидритоносные породы. Происходила реакция флюидов с вмещающей средой в момент приоткрытия пегматитовой системы.

Литература:

- Подпорина Е.К., Бурков В.В., Данилова К.Н. (1983) Nd-чёрциты из коры выветривания метаморфических пород Казахстана. Доклады академии наук СССР: 195–198.
- Скригитиль А.М. (1996) Драгоценные камни в пегматитах Восточного Памира. Мир камня 11: 11–17.
- Groat L.A., Rossman G.R., Dyar M.D., David T., Piccoli P.M.B. and Schultz A.J., Ottolini L. (2010) Crystal Chemistry of dark blue aquamarine from the true blue showing, Yukon territory, Canada. The Canadian Mineralogist 48: 597–613.
- Pasero M., Kampf A.R., Ferraris C., Pekov I.V., Rakovan J. and White T.J. (2010) Nomenclature of the apatite supergroup minerals. European Journal of Mineralogy 22: 163–179.

Деформации титанита и монацита из импактного кратера Кара по данным EBSD-анализа

Чебыкин Н.С.¹, Замятин Д.А.¹, Ковалева Е.И.², Давлетшина А.А.¹

¹ИГГ УрО РАН, Екатеринбург *tchebykinnikolai@yandex.ru*;

²University of the Western Cape, Bellville *ekovaleva@uwc.ac.za*

Формирование ударных кратеров вызывает деформации, плавление и испарение пород мишени, образование высокобарических и высокотемпературных минеральных фаз. Внутренние структуры ударно-деформированных акцессорных минералов титанита и монацита являются потенциальными геотермометрами импактных процессов. Химические составы титанита и монацита варьируют в широком диапазоне. Сопоставление образующихся деформационных микроструктур титанита и монацита представляет интерес для понимания зависимости деформационного отклика на импактные воздействия от химического состава и структуры минералов. Настоящая работа посвящена исследованию деформационных микроструктур и химического состава титанита и монацита образца КН-21-10-V зювитов Карской астроблемы, с обнажения на реке Нганораха-яха. Определение состава, регистрация BSE-изображений и EBSD-карт выполнялась на сканирующем электронном микроскопе Tescan MIRA LMS, оснащённом приставками Oxford Instruments EDS X-max80 и EBSD Nordlys Nano.

Обнаружены монацит и титанит с деформационной микроструктурой блочного строения, разориентированные на углы до 12° (рис. 1а,г); в монаците наблюдаются сдвиговые деформации вдоль планарных трещин (рис. 1а,б). В титаните и монаците диагностированы полисинтетические микродвойники (рис. 1б,д), которые имеют внутреннюю разориентацию до 4°. Двойники в монаците направлены параллельно планарным трещинам и сдвигам, образованы сдвигом вдоль плоскости (001) в направлении [100], что эквивалентно повороту на 180° вокруг вектора <100>. Двойники в титаните образованы вдоль плоскости (100) с поворотом относительно основного зерна на 60°. Определен химический состав и построены элементные карты монацита и титанита, выполнено сопоставление элементных и ориентационных карт. Сделаны выводы о взаимосвязи ориентационных карт с элементным составом.

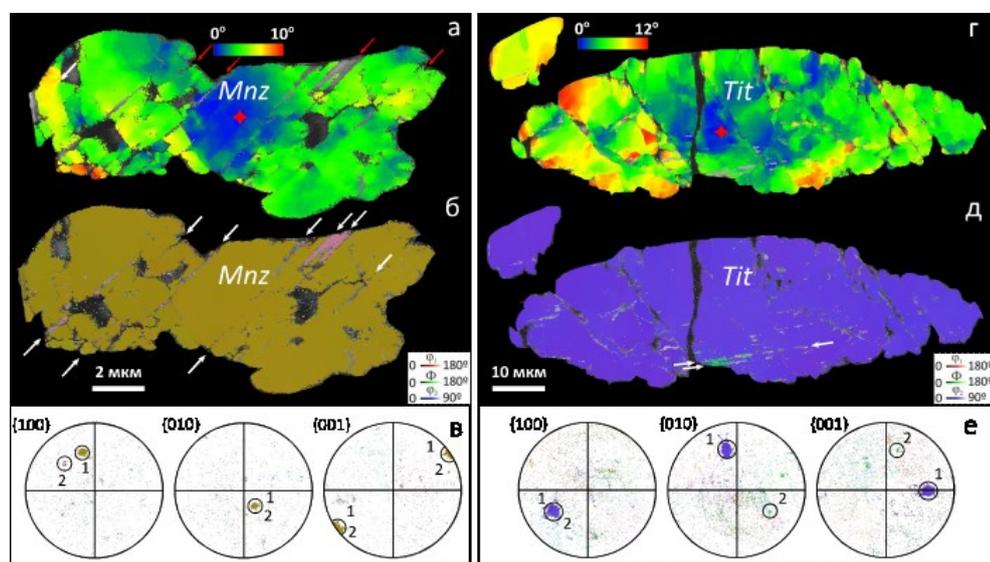


Рис. 1. Монацит Mnz_b_0 (а, б, в) и титанит Tit_c_121 (г, д, е) зювитов кратера Кара. (а, г) – карты внутреннего отклонения ориентации в зернах относительно произвольно выбранной точки (красный крестик); (б, д) – карта ориентаций монацита и титанита, цветовая кодировка задана углами Эйлера; белыми стрелками показаны микродвойники, красными – направление сдвиговых деформаций. (в, е) – полюсные фигуры, показывающие ориентации осей монацита и титанита. *Mnz* = монацит, *Tit* = титанит.

Работа выполнена в ЦКП УрО РАН «Геоаналитик» и поддержана Российским Научным Фондом, проект № 21-77-10019, <https://rscf.ru/project/21-77-10019/>.

Устойчивость полей аккумуляции, абляции и баланса массы ледника Джанкуат (Центральный Кавказ)

Чеховских А.М., Поповнин В.В.

Географический факультет, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
chehovskiy.medved@yandex.ru

Ледники являются важнейшими природными резервуарами пресной воды и чувствительными индикаторами климатических изменений, отражающихся на динамике и балансе массы как отдельных ледников, так и оледенении горных стран. В мире насчитывается порядка 215 000 горных ледников (Farinotti et al., 2019), однако прямыми исследованиями охвачено менее 5% их количества (Glacier..., 2020), а постоянные ежегодные измерения баланса массы проводятся лишь чуть более чем на 150 ледниках по всему миру (Kurzboeck, Huss, 2021). В связи с этим мониторинг баланса массы и анализ компонентов внутреннего и внешнего массообмена ледников остается важнейшей фундаментальной проблемой гляциологии.

Ежегодные колебания твердых атмосферных осадков, температуры воздуха и других атмосферных характеристик в горах определяют баланс массы ледников через ежегодные изменения толщины и плотности снежного покрова и величины таяния снега, фирна и льда на поверхности ледника. Аккумуляция (накопление) и абляция (таяние) в пределах границ ледника распределяются крайне неравномерно. Распределение аккумуляции и абляции на леднике происходит под влиянием локальных факторов, связанных с климатическими и метеорологическими условиями, геоморфологическими факторами. В результате на ледниках ежегодно формируется уникальная схема расположения величин аккумуляции, абляции и баланса массы, называемая гляциологическим полем.

Целью исследования является оценка пространственно-временной изменчивости поля баланса массы и его компонентов горного ледника Джанкуат, начатая В.В. Поповниным (1989) и Д.А. Петраковым (2000). Ледник Джанкуат расположен на северном склоне Главного Кавказского хребта и является одним из наиболее изученных ледников Кавказа и России в целом с 55-летним рядом прямых полевых измерений. В работе мы анализируем данные по аккумуляции за период с 1976 по 2009 гг., данные по абляции и балансу массы с 1987 по 2009 гг. Для возможности сравнения полей накопления и абляции использована локальная система координат и программное обеспечение ESRI ArcMap 10.6.1 для отображения этих полей.

Визуальный анализ нарисованных полей накопления и абляции показывает несколько областей на леднике с постоянными максимумами и минимумами значений этих параметров. Для количественной оценки пространственной и временной изменчивости накопления и абляции были рассчитаны коэффициенты вариации и линейной корреляции. Коэффициент вариации накопления колеблется от 0.20 до 1.32 (среднее значение $C_v = 0.35$, или 86 г/см^2), коэффициент вариации абляции колеблется от 0.13 до 0.71 (среднее значение $C_v = 0.26$, или 74 г/см^2). Для оценки стабильности полей накопления и абляции были использованы 5 типов корреляций между точечными значениями, отдельными высотно-морфологическими зонами и единым ледниковым полем. Результаты расчетов показывают, что высотно-морфологическая зона как отдельное поле более устойчива, чем единое ледниковое поле. Применение данной методики позволит повысить точность расчетов и уменьшить объем полевых работ без потери точности результатов.

Литература:

- Петраков Д.А. (2000) Устойчивость полей внешнего массообмена горного ледника: Диссертация на соискание ученой степени канд. геогр. наук. М.: МГУ, 218 с.
- Поповнин В.В. (1989) Бюджетная эволюция репрезентативного ледника Джанкуат (Центральный Кавказ). Диссертация на соискание ученой степени канд. геогр. наук. М.: МГУ, 305 с.
- Global Glacier Change Bulletin No. 3 (2016-2017). Zemp M. et al. (eds.) World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland, 274 p.
- Kurzboeck C., Huss M. (2021) Measurement, documentation and evaluation of glacier monitoring data.
- Farinotti D., Huss M., Fürst J.J., Landmann J., Machguth H., Maussion F., Pandit A. (2019) A consensus estimate for the ice thickness distribution of all glaciers on Earth. Nat. Geosci. 12: 168–173.

Геохимическое пересечение Камчатки: новые изотопные данные

Чурикова Т.Г.^{1,2}

¹ИВУС ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский tchurikova@mail.ru;

²GZG, Университет Геттингена, Германия

Химический состав примитивных островодужных пород дает представление как о составе мантийного клина, так и о вкладе субдукционной составляющей в источник расплавов. Однако в долгосрочном круговороте элементов между внутренними и внешними резервуарами Земли все еще остается ряд вопросов, связанных с сохранением подвижных элементов в субдукционных системах за счет метасоматоза мантии, с транспортировкой химических элементов от источника к поверхности, с ролью тех или иных процессов, происходящих в зонах субдукции и т.д. Северное вкрест-дуговое Камчатское геохимическое пересечение (СКП), объединяющее 13 верхнеплейстоценовых и голоценовых вулканов и два крупных лавовых поля моногенных конусов, протянувшееся на 220 км от вулканов Восточного фронта до Срединного хребта в тыловой зоне дуги, является одним из наиболее геохимически изученных траверсов в мире. Его породы анализировались на петрогенные, редкие и халькофильные элементы, а также на изотопные вариации Sr, Nd, Pb, Hf и O. Чтобы ответить на указанные вопросы, мы также проанализировали породы СКП на ряд “нетрадиционных” изотопных систематик.

Высокоточные (± 0.05 ; 2SD) изотопные данные для Cu были выполнены для MORB и OIB, а также в породах СКП. MORB и OIB имеют однородный изотопный состав Cu ($+0.09 \pm 0.13$; 2SD), свидетельствуя о том, что фракционирование изотопов Cu при частичном плавлении мантии ограничено. В породах же СКП значения $\delta^{65}\text{Cu}$ имеют большой диапазон от -0.19 до $+0.47$, что дает четкое свидетельство участия субдукционных флюидов, вызывающих значительные изотопные вариации Cu. Средние значения $\delta^{65}\text{Cu}$ для камчатских лав ($+0.13 \pm 0.26$; 2SD) превышают значения для твердой Земли ($+0.06 \pm 0.20$; 2SD), что, вероятно, связано с флюидным метасоматозом мантии и утяжелением изотопов Cu.

Изотопный баланс Zn в островодужных магмах связывают с добавкой субдукционного компонента в мантийный клин. Породы СКП имеют $\delta^{66}\text{Zn}$ от 0.16 до 0.31‰, что близко к базальтам MORB, BABB и адакитам. Отсутствие корреляций $\delta^{66}\text{Zn}$ с геохимическими индикаторами дифференциации магмы (в т.ч. MgO, SiO₂ и Zn/FeT) свидетельствует о том, что фракционирование оливина, пироксена и магнетита оказывает малое влияние на изотопный состав Zn в лавах Камчатки, а отсутствие корреляций с индикаторами субдукционных компонент (в т.ч. Ba/La, Ba/Th, Sr/Y, Hf/Lu и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) говорит о незначительном переносе Zn от субдуцирующей плиты в Камчатский мантийный клин.

Отношения халькофильных элементов (As/Ce и Sb/Ce) уменьшаются от фронта к тылу дуги, что указывает на уменьшающийся приток субдукционных флюидов к мантийному клину. Однако Li/Y (от 0.07 до 1.78) и $\delta^7\text{Li}$ (от +1.8 до +5.4 ‰) имеют ограниченные вариации и аналогичны мантии MORB. Изотопно-тяжелый Li из субдукционных флюидов, вероятно, уравнивается в субдуговой мантии, которая действует как буфер для систематики Li. Наши данные (отсутствие корреляций $\delta^7\text{Li}$ с MgO и K₂O) также свидетельствуют о незначительном изотопном фракционировании лития при плавлении и последующей дифференциации.

Вариации $\delta^{11}\text{B}$ вкрест дуги (от +7 во фронте до -6 в тылу дуги) согласуются с переменным добавлением изотопно-тяжелого субдукционного компонента к обедненной мантии MORB. Тем не менее, изотопные составы отдельных вулканических центров демонстрируют смешение между изотопно-различными расплавами с разной степенью эволюции и дегазации. В то время как запасы летучих в породах и расплавных включениях изменяются в период до извержения, отношения несовместимых элементов и составы изотопов бора более точно отслеживают исходные составы мантии и добавку субдукционного компонента.

Соотношения изотопов таллия (Tl) являются новым инструментом, который можно использовать для изучения процессов рециркуляции земной коры в дуговых лавах. Эксперименты по дегазации таллия (Tl) из силикатного расплава показывают, что отношения изотопов Tl обогащаются тяжелым изотопом с контролируемой диффузией потерей легкого изотопа Tl. Данные для пород СКП показывают, что дегазация Tl в виде TlCl играла важную роль в контроле изотопного состава Tl, изменяя первичное значение в остаточной лаве.

Работа поддержана грантами DFG-РФФИ № 98-05-04103, 00-05-04000, 16-55-12040.

Взаимодействие кора-мантия при формировании степнинского комплекса, Южный Урал

Шагалов Е.С., Холоднов В.В.

Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург shagalov@igg.uran.ru

Степнинский или Кацбахский гранит-лейкогранитовый комплекс состоит из Вандышевского, Уйского и Косогорского массивов, находящихся в Уйско-Новооренбургской зоне смятия (УНЗ), и Степнинского и Бирюковского массивов, расположенных в соседней (восточнее) Сухтелинско-Арамилской зоне (например, Ферштатер, 2013). Уйский и Вандышевский массивы находятся в узле пересечения Степнинского разлома со структурами УНЗ. Границы массивов комплекса пересекают тектонические контакты линейных блоков сайтовской ($R_2?$ st), булатовской (S_1-D_1 bl), копаловской (D_{2-3} kp) и сосновской толщ (C_1 ss). В массивах комплекса известны ксенолиты вмещающих пород.

U-Pb-возраста по цирконам из гранита Уйского массива образуют три кластера. Первый образует дискордию (по 8 точкам) с нижним пересечением 289.8 ± 4.3 млн лет и верхним пересечением 3513 ± 190 млн лет (СКВО = 0.94). Нижнее пересечение близко возрасту Степнинского массива ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возраст циркона из всех разновидностей пород массива – 283 ± 3 млн лет [Bea et al., 2005]). В свою очередь, верхнее пересечение соответствует возрасту Тараташского блока на севере Башкирской мегазоны Урала, являющегося самым восточным выходом архейско-протерозойского фундамента Восточно-Европейской платформы (ВЕП) (например, Краснобаев, Чередниченко, 2004). Второй кластер образуют несколько зёрен с конкордантным возрастом 265.8 ± 1.5 млн лет (СКВО = 0.013, конкордантность = 0.91). Самый молодой кластер с возрастом 198 ± 22 млн лет. Это соответствует некоторой тектоно-термальной активизации структуры, в которой расположены массивы.

Цирконам Уйского массива свойственны широкие вариации начального изотопного состава гафния. $\epsilon\text{Hf}_{(269)}$ изменяется от -10.5 до 1.1. Модельный возраст, рассчитанный по одностадийной модели, варьирует от 859 ± 47 до 1367 ± 29 млн лет, что соответствует времени жизни Машакской рифтовой структуры, также расположенной среди Башкирской мегазоны. Модельный возраст источника по двухстадийной модели, основанной на выплавлении магмы из средней континентальной коры, несколько древнее – 1233 ± 77 – 2057 ± 47 млн лет.

ϵNd_i для пород Вандышевского и Уйского массивов лежит в диапазоне -1.0 – -4.4 и -9.9, соответственно. Значения для пород Степнинского массива различаются в зависимости от содержания кремнезёма и фазы внедрения, ранние габброиды +5.3 – +5.42, поздние габброиды и гранитоиды -0.42 – -1.28 (Ферштатер, 2013). Модельные Nd-возраста по разным моделям варьируют от 688 до 2010 млн лет, удревняясь с увеличением кремнекислотности пород.

Соотношение изотопов Nd и Hf лежит на границе распространения значений базальтов океанических островов и нижнекоровых гранулитов.

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ варьирует в небольших пределах 0.70471-0.70547, с обратной корреляцией величины отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ и содержания кремнезёма в породах Степнинского массива и прямо в Вандышевском и Уйском массивах. Что, наряду со значениями ϵNd_i , также неоднозначно указывает на источник типа EM либо нижней континентальной коры.

Таким образом, изотопные характеристики пород комплекса указывают на участие в генерации магм обогащённых источников: относительно молодых – «уральских» структур, в том числе рифтогенного характера, и древних нижнекоровых пород края ВЕП, затянутых в область магмогенерации в результате субдукционных процессов.

Исследования выполнены в рамках Государственного задания ИГГ УрО РАН, номер гос.регистрации № АААА-А18-118052590029-6 в ЦКП "Геоаналитик" ИГГ УрО РАН.

Литература:

- Краснобаев А.А., Чередниченко Н.В. (2004) Цирконовый архей Урала. Докл. РАН. 400(4): 510-514.
- Ферштатер Г.Б. (2013) Палеозойский интрузивный магматизм Среднего и Южного Урала. РИО УрО РАН, Екатеринбург. 368 с.
- Bea F., Fershtater G.B., Montero P., Smirnov V.N., Molina J.F. (2005) Deformation-driven differentiation of granite magma: The Stepninsk pluton of the Uralides, Russia. Lithos 81: 209–233.

Петрография лампрофиров Хибинского и Ловозёрского массивов

Шайхутдинова Д.Р., Шкурский Б.Б.

*Геологический факультет МГУ, Москва d_shaikhutdinova_cryst@geol.msu.ru;
shkurskybb@yandex.ru*

Хибинский и Ловозёрский плутоны входят в группу наиболее крупных щелочных интрузий мира. Они расположены в северо-восточной части Фенноскандинавского щита, совместно с Кургинским плутоном, вулканогенными образованиями и крупными роями даек и трубок взрыва составляют единый палеозойский вулcano-плутонический комплекс. Изученные ультрамафические субвулканические породы интересны тем, что они, предположительно, наименее дифференцированы и могут отражать состав родительских магм, послуживших исходными расплавами для формирования всего разнообразия горных пород данных массивов. Примитивные породы в крупных плутонах сохраняются редко, в то время как жильные тела последней фазы внедрения способны транспортировать часть непроэволюционировавшей магмы из наиболее глубинного источника.

Получены петрологические характеристики щелочных лампрофиров (предположительно дайкового комплекса) Хибинского и Ловозёрского щелочных массивов. Изучены петрографические особенности и содержание главных элементов, что позволило определить данные породы как мончикиты по классификации лампрофиров (Rock, 1991). Выявлены вариации составов фенокристаллов, зачастую имеющих двучленное строение, фиксирующее резкую смену условий их роста. Это также было подтверждено методами геотермометрии и геобарометрии. Температуры образования фенокристов оливина в мончикитах Хибин и Ловозера отличаются не более чем на 100°C и варьируют в диапазоне 1191-1305°C. Двучленное строение фенокристов клинопироксена и амфибола и повышение температуры во II генерации в мончикитах Хибинского массива может быть объяснено следующим образом: а) кристаллизация на более высоком гипсометрическом уровне и последующее опускание к более горячему дну магматической камеры или магмовода; б) поступление в промежуточный очаг второй (Галахов, 1975) порции расплава.

Анализ концентраций элементов-примесей был проведен с целью получения более полного петрохимического лица изученных пород. Связь щелочных лампрофиров Ловозёрского и Хибинского массивов с воздействием плюма на докембрийскую деплетированную мантию подтверждается общим сходством их спектров с базальтами океанических островов. Всплески концентраций некогерентных элементов в выплавках так же связаны с привнесением плюмового вещества, обогащенного Nb, Ta, Zr, Hf, LILE и LREE.

Литература:

*Галахов А.В. (1975) Петрология Хибинского щелочного массива. Л.: Наука. 194 с.
Rock N.M.S. (1991) Lamprophyres. Blackie, Glasgow and London: 5–96.*

Минералогические и геохимические индикаторы тихоокеанских водных масс, привносимых в воды Чукотского моря через Берингов пролив

Шаповалова М.В., Астахов А.С.

ТОИ ДВО РАН, Владивосток, e-mail: shapovalova.mv@poi.dvo.ru;
astakhov@poi.dvo.ru

Арктический регион – это мощный элемент климатической регуляции, степень влияния которого сложно переоценить. Воздействуя прямо или косвенно на различные механизмы, арктический регион формирует климатический облик Земного шара. За последние десятилетия остро встал вопрос о степени влияния человеческой деятельности на данный регион и способах оценки этого влияния. Для адекватной оценки нынешних условий в восточном секторе Арктики нами применяется метод палеореконокструкций, он позволяет оценивать уже произошедшие изменения в прошлом и соотносить их с условиями в наше время.

Арктический водный бассейн имеет массу особенностей в осадконакоплении и отражает периоды усиления и уменьшения влияния Тихого океана. Одним из наиболее показательных индикаторов при этом является минералогический состав донных осадков. Нами выделяется фракция легко переносимых глинистых минералов (2 мк) в которой мы определяем минералогический состав. Зная источник минералов, характерных для того или иного водного бассейна, можно определять и степень влияния их друг на друга.

Целью работы явилось обобщение информации по изменчивости вещественного состава голоценового чехла Чукотского моря. В основу исследования были положены собственные наработки, данные из баз данных ТОИ ДВО РАН (Astakhov et al., 2015, 2020) и результаты изучения их минерального состава по данным различных авторов (Kobayashi et al., 2016; Nwaodua et al., 2014; Ortiz et al., 2009; Swärd et al., 2018).

Проводимое исследование показывает состоятельность метода палеореконокструкции для определения палеоокеанологических условий на границе Чукотское море – Тихий океан, базирующегося на минералогии и геохимии данного региона.

Исследования проведены в рамках работы по гранту РНФ № 21-17-00081.

Литература:

- Astakhov A.S. et al. (2015) Sediment geochemistry and diatom distribution in the Chukchi Sea: Application for bioproductivity and paleoceanography. Oceanography 28(3): 190–201.*
- Astakhov A.S. et al. (2020) Reconstructing ice conditions in the southern Chukchi Sea during the last millennium based on chemical composition of sediments and diatom assemblages. Mar Geol.: 106220.*
- Kobayashi D. et al. (2016) Distribution of detrital minerals and sediment color in western Arctic Ocean and northern Bering Sea sediments: Changes in the provenance of western Arctic Ocean sediments since the last glacial period. Polar Sci 10(4): 519–31.*
- Nwaodua E.C. et al. (2014) Diffuse spectral reflectance of surficial sediments indicates sedimentary environments on the shelves of the Bering Sea and western Arctic. Marine Geology 355: 218–233.*
- Ortiz J.D. et al. (2009) Provenance of Holocene sediment on the Chukchi-Alaskan margin based on combined diffuse spectral reflectance and quantitative X-Ray Diffraction analysis. Glob Planet Change 68(1): 73–84.*
- Swärd H. et al. (2018) Sedimentary proxies for Pacific water inflow through the Herald Canyon, western Arctic Ocean. arktos 4(1): 1–13.*

Элементы минералогической зональности Мутновского золото-серебряного месторождения

Швейгерт П.Е., Жегунов П.С., Москалёва С.В.

ИВУС ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский schweigertpe@gmail.com

Мутновское золото-серебро-полиметаллическое месторождение расположено в Елизовском районе Камчатского края, в 60 км к югу от Петропавловска-Камчатского, относится к Южно-Камчатскому рудному району. Месторождение приурочено к олигоценовой Жировской палеовулканической постройке, располагающейся на пересечении субмеридионального отрезка Южно-Камчатской системы рудоконтролирующих сбросов с Мутновским глубинным разломом северо-восточного простирания. Основное рудоконтролирующее значение имеют крутопадающие разломы субмеридионального направления, к которым приурочено большинство продуктивных жил.

Рудные тела месторождения сосредоточены в пределах крутопадающей жильной зоны «Определяющая», имеющей субмеридиональное простирание. Золото-серебряное оруденение распространено, в первую очередь, на северном фланге жильной зоны, приурочено к заключительному этапу формирования гидротермальной системы и не вписывается в прослеженную для полиметаллического оруденения концентрическую зональность, что свидетельствует о других закономерностях его формирования и даёт повод рассматривать отдельно.

Основным жильным минералом рудных тел северного фланга является кварц, широко развиты карбонаты, присутствует адуляр. Рудная минерализация присутствует в количестве не более 10%, представлена пиритом, сфалеритом, галенитом, блёклыми рудами. В сравнении с южными флангами месторождения ниже количество арсена, выше роль самородного золота и серебра, сульфосолей серебра (Петренко, 1999).

Цель работы – проанализировать потенциал оконтуривания ареала распространения золото-серебряной формации в пределах северных флангов жильной зоны методами минералогии. Для изучения минерального состава и текстурно-структурных особенностей рудных тел был опробован по рудным интервалам керн трёх скважин, разнесённых по простиранию жильной зоны на 350 м. Отобранные образцы проанализированы методами: оптической микроскопии в шлифах и сканирующей электронной микроскопии – в аншлифах.

В шлифах отмечены полосчатые, брекчиевые текстуры, участками коломорфные структуры кварца. По простиранию жильной зоны в южном направлении отмечается падение количества адуляра от 15-20% до 10-15%. По результатам анализа аншлифов была отмечена положительная корреляция между долями в минеральном составе образца адуляра и самородного золота. С участками, обогащёнными адуляром, связаны скопления рудных минералов в целом, однако, в крайней южной из опробованных скважин, относительно обеднённой адуляром, золото встречается редко, и в то же время возрастает роль гессита, появляются сульфосоли сурьмы, характерные для серебро-полиметаллической формации. В южном направлении также падает от 0.16 до 0.08 рассчитанное по данным химического анализа проб Au/Ag отношение.

Прослеженная тенденция однонаправленна, из чего можно предположить, что пик интенсивности золото-серебряного оруденения находится севернее крайней северной опробованной скважины. Массив данных, который удалось составить на настоящий момент, непредставителен для формирования однозначных выводов касательно контуров ареала распространения золото-серебряной формации, имеет смысл наращивать его по покрытию территории в северном направлении и увеличивать плотность опробования по всей площади. В случае подтверждения намеченных закономерностей может быть прослежена концентрическая зональность золото-серебряного оруденения, аналогичная зональности распространения серебро-полиметаллической формации, что имеет практическую ценность для проектирования разведки и эксплуатации месторождения.

Автор выражает благодарность ООО «Компания СТЭППС ИСТ» за предоставленный материал.

Литература:

*Константинов М.М. (2000) Золото-серебряные месторождения, Москва. 239 с.
Петренко И.Д. (1999) Золото-серебряная формация Камчатки, СПб. 116 с.*

Инфракрасная микроспектроскопия для идентификации изоструктурных минералов

Шендрик Р.Ю., Богданов А.И., Радомская Т.А., Митичкин М.А., Канева Е.В.

ИГХ СО РАН, Иркутск r.shendrik@gmail.com

Для идентификации минералов и первичной характеристики геологических образцов требуются неразрушающие, чувствительные к химическому составу и кристаллической структуре методы. Одним из широко используемых методов является инфракрасная (ИК) спектроскопия с Фурье преобразованием. Не так давно стали доступными ИК-микроскопы с высоким быстродействием и светосилой, что позволяет получать спектры от образцов размером от 10 мкм в течение нескольких секунд.

Существует несколько методик, используемых в ИК микроскопии. До настоящего времени широко использовалась методика нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО или ATR). В этом методе к поверхности образца плотно прижимается измерительный кристалл. Необходимо значительное давление на образец, так как ИК излучение проникает в него на глубину не более 3 мкм. Однако исследуемые минералы отличаются по форме, размеру, хрупкости. Далеко не всегда получается прижать образец на НПВО кристалле. Более того, излишнее усилие может привести к повреждению поверхности образца или даже его разрушению. Альтернативным методом является использование модуля регистрации отраженного от поверхности образца ИК излучения. Основной проблемой такого метода является отсутствие базы данных, содержащей спектры отражения известных минеральных образцов.

ИК-спектроскопия также является методом, с помощью которого возможно различить изоструктурные минералы. В данной работе предлагается методология и приводятся примеры получения ИК-спектров отражения редких минералов Мурунского массива: тинаксит ($K_2NaCa_2TiO[Si_7O_{18}(OH)]$) и токкоит ($K_2Ca_4[Si_7O_{18}(OH)](OH,F)$) (Kaneva, Shendrik, 2022), карлтонит ($KNa_4Ca_4Si_8O_{18}(CO_3)_4(OH,F)\cdot H_2O$) и фторкарлтонит ($KNa_4Ca_4Si_8O_{18}(CO_3)_4(F,OH)\cdot H_2O$) (Kaneva et al., 2020). Измерения проводились с помощью ИК-микроскопа Микран-3 и спектрофотометра Симекс ФТ-801. Для проведения анализа использовались образцы в шашках, подготовленные для электронно-зондового микроанализа и полировки. Также проводилось картирование исследуемых образцов методом ИК-спектроскопии отражения.

В спектрах отражения тинаксита и токкоита наблюдается различие в области колебаний тетраэдрически-полиэдрического каркаса. В образцах карлтонита и фторкарлтонита наблюдаются различия как в области колебаний каркаса, так и в области колебаний комплексов $(CO_3)^{2-}$. С помощью квантово-химических расчетов показано, что эти различия связаны с разным координированием комплексов $(CO_3)^{2-}$ молекулами воды в структуре.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФ № 22–27–00183.

Литература:

- Kaneva E., Radomskaya T., Suvorova L., Sterkhova I., Mitichkin M. (2020) Crystal chemistry of fluorcarletonite, a new mineral from the Murun alkaline complex (Russia). *European Journal of Mineralogy* 32: 137–146.
- Kaneva E., Shendrik R. (2022) Tinaksite and tokkoite: X-ray powder diffraction, optical, and vibrational properties. *Crystals* 12: 377.

Геохимические, изотопные и петрологические характеристики молодого вулканизма Большого Кавказа – происхождение игнимбритов и лав Эльбруса, Чегема и Тырныауза

Щербаков В.Д.¹, Биндеман И.Н.², Газеев В.М.³

¹Геологический факультет МГУ, Москва vsh@geol.msu.ru;

²Университет Орегона, Юджин, США bindeman@uoregon.edu;

³ИГЕМ РАН, Москва vik.gaz.54@mail.ru

В складчатом сооружении Большого Кавказа обнажены значительные объемы игнимбритов, лав и молодых гранитов плиоцен-плейстоценового возраста. Вулканическая история региона включает игнимбриты, связанные с Чегемской кальдерой (2.92 млн лет) и районами Тырныауза (1.98 млн лет) и Эльбруса (1.98 и 0.7 млн лет) и многочисленными молодыми лавовыми потоками Эльбруса. На основе петролого-геохимических данных и изотопного состава Hf и O, полученных для риолитовых игнимбритов Чегемской кальдеры, игнимбритов, риолитов, гранитов и лав районов Эльбруса и Тырныауза, мы исследуем происхождение и эволюцию молодого кислого магматизма Большого Кавказа. Игнимбриты Чегемской кальдеры (2.92 млн лет) и ранние игнимбриты района Эльбруса, с источником в районе Тырныауза (1.98 млн лет), представляют собой гомогенные биотитовые риолиты и характеризуются сходным валовым и минеральным составом, а также близкими соотношениями несовместимых элементов, что свидетельствует об их родственном происхождении. В то же время 0.7 млн лет игнимбриты Эльбруса в сравнении с игнимбритами Чегема имеют повышенные концентрации одновременно совместимых (Cr, Sr, Ca, Ni и др.) и несовместимых элементов (Cs, Rb, U), более высокие значения $\delta^{18}\text{O}$ (+9 и +7.8‰) и более низкое значение ϵHf (+0.5 и +3.5), что указывает на фракционирование магмы и ассимиляцию корового материала долгоживущим риолитовым магматическим резервуаром. Эльджуртинские граниты Тырныауза и ранние игнимбриты района Эльбруса (1.98 млн лет) имеют идентичный состав породообразующих минералов, макро- и микрокомпонентный состав и один возраст, что свидетельствует о том, игнимбриты Эльбруса, вероятно, извергались из района современного Тырныауза, а Эльджуртинские граниты являются застывшим магматическим резервуаром, питавшим это извержение. Молодые игнимбриты Эльбруса (0.7 млн лет) и лавы представлены Bt-Amp-Orх дацитами, и минеральная ассоциация последующих дацитовых лав Эльбруса становится более мафической в сравнении с риолитами; состав и текстуры вкрапленников, поведение макро- и микроэлементов указывают на гибридное происхождение лав в результате смешения риолитов с магмами более основного состава. Состав этих основных магм близок к трахиандезибазальтам, потоки которых обнажаются по периферии вулкана Эльбрус. Все изученные молодые вулканические породы характеризуются обеднением HSFE и обогащением LILE, Li, Pb, что подчеркивает тесную связь молодого кремнекислого магматизма с магмами надсубдукционной геохимической специфики. Важной геохимической особенностью является обогащение U до 8 ppm и Th до 35 ppm. Микроэлементный состав пород указывает на то, что исходная риолитовая магма игнимбритов Чегемской кальдеры сформировалась при ~80-90% фракционировании базальтов островодужной специфики. Изотопный состав O-Hf-Sr показывает, что коровые изотопные метки кислых вулканитов возникают за счет фертилизации перидотитов, продуцирующих родоначальные базальтовые магмы, субдуцированным осадочным материалом.

Минеральный и химический состав донных осадочных отложений озера Сабакты как индикатор палеоклимата

Юсупова А.Р., Нурғалиева Н.Г. Кузина Д.М.

*Казанский федеральный университет, ИГиНГТ, Казань anrjusupova@kpfu.ru;
nouria.nourgaliyeva@kpfu.ru; di.kuzina@gmail.com*

Озеро Сабакты (53°36'55" с.ш., 58°39'22" в.д.) расположено на территории Южного Урала, в пределах Республики Башкортостан. Площадь озера составляет 2.4 км², длина – 2.3 км, средняя ширина – 1 км, средняя глубина – 2.8 м; максимальная глубина – 6 м, площадь водосбора составила 9.0 км² (Гареев, 2001, 2012, 2015-2020).

Для хронологической оценки и подробного изучения гранулометрического состава, геохимических особенностей, минерального состава была выбрана самая длинная (298 см) керновая колонка. Отбор образцов для детального изучения проводился с учетом сейсмоакустических данных (Krylov et al., 2019) и литологической неоднородности. Для реконструкции разреза были использованы данные радиоуглеродного датирования, опубликованные в (Юсупова, 2021), согласно которым возраст изучаемых отложений составляет ~22.5 тыс. лет.

С целью индикации средовых и климатических изменений был проведен гранулометрический анализ (17 проб), электронная микроскопия (10 проб), рентгеновский дифракционный анализ (15 проб), рентгенофлуоресцентный анализ и изотопный анализ (67 проб).

Результаты геохимического и минерального состава донных осадочных отложений озера Сабакты позволили представить историю осадконакопления исследуемого озера редуцированным плейстоценовым циклом и пятью голоценовыми циклами. Выделены фазы мелкого озера в интервалах ~11000-10300, 6700-~4900 и ~4300-3200 лет назад. Фазы увеличения глубины озера наблюдаются в интервалах ~9600-9000, ~7900-7200 и ~5000-~4600 лет назад.

Проведенное исследование показывает, что минеральный и химический состав донных осадочных отложений озера Сабакты выступает чувствительным индикатором циклической истории средовых и климатических условий озерного осадконакопления в региональном и глобальном отношении.

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной КФУ для выполнения государственного задания № 671-2020-0049 в сфере научной деятельности, часть работ выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-35-90058.

Литература:

- Гареев А.М. (2001) Реки и озера Башкортостана. Уфа: Китап. 259 с.
Гареев А.М. (2012) Реки, озёра и болотные комплексы Республики Башкортостан. Уфа: Гилем, 246 с.
Гареев А. М. (2015-2020) Сабакты. В: Башкирская энциклопедия. Гл. ред. М.А. Ильгамов. Уфа: ГАУН «Башкирская энциклопедия».
Krylov P.S, Nurgaliev D.K, Kuzina D.M. (2019) High resolution seismic studies of shallow lake Sabakty (Russia). SGEM Conference 19 (4.2): 229–234.
Юсупова А.Р. (2021) Предварительные данные о магнитных свойствах донных отложений озера Сабакты (Южный Урал, Россия). Материалы Международного молодежного научного форума "ЛОМОНОСОВ-2021". [Электронный ресурс]. М.: МАКС Пресс, С. 2.

Особенности датирования мерзлых отложений методом оптически стимулированной люминесценции

Яковлева М.О.¹, Курбанов Р.Н.², Мюррей Э.³

¹ *Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва yakovlevam@geogr.msu.ru;* ² *ИГ РАН, Москва;* ³ *Северная лаборатория люминесцентного датирования, DTU, Aarhus*

Оптически стимулированная люминесценция (ОСЛ) – современный, активно развивающийся и широко используемый метод абсолютного датирования. Он определяет время, когда минерал в последний раз подвергся воздействию солнечных лучей. В качестве дозиметра выступают повсеместно распространённые минералы кварц и полевой шпат. Несмотря на то, что ОСЛ сегодня признан одним из наиболее достоверных методов определения возраста четвертичных отложений, его применение в зоне распространения многолетнемерзлых пород носит локальный характер.

В данной работе описан метод отбора проб и лабораторной обработки мерзлых отложений. Шесть образцов были взяты из скважины глубиной 90 метров, расположенной на северо-востоке Гыданского полуострова, в то время как образцы для датирования в работах предшественников отбирались из обнажений Евразии, Северной Америки и Антарктиды (Mangerud et al., 1999, 2004; Astakhov, 2004; Svendsen et al., 2004; Ramsey, 2015).

Из-за суровых климатических условий и транспортной труднодоступности севера Западной Сибири этот регион остаётся слабо изучен: остаётся открытым вопрос о существовании и количестве оледенений и морских трансгрессий-регрессий. Работа также освещает эволюцию взглядов на стратиграфию региона и противоречивые гипотезы гляциализма и маринизма. Полученные результаты датирования методом оптически стимулированной люминесценции по протоколу single aliquot regeneration (SAR) сопоставлены с морскими изотопными стадиями (MIS 7 – MIS 2), современной региональной стратиграфической схемой и опорными разрезами верхнего плейстоцена (Astakhov, Nazarov, 2010). Описаны особенности неполного обнуления минералов во время седиментации в криолитозоне, насыщение сигналом зёрен кварца в полярных областях, постседиментационные криогенные процессы в деятельном слое. Из-за существенного влияния льдистости образцов на погрешность ОСЛ возраста особое внимание было уделено анализу взаимосвязи между изменениями влажности (льдистости) отложений в позднем плейстоцене и криогенной текстурой.

Литература:

- Astakhov V. (2004) Middle Pleistocene glaciations of the Russian North. *Quaternary Science Reviews* 23: 1285–1311.
- Astakhov V., Nazarov D. (2010) Correlation of Upper Pleistocene sediments in northern West Siberia. *Quaternary Science Reviews* 29: 3615–3629.
- Mangerud J., Jakobsson M., Alexanderson H., Astakhov V., Clarke G. K. C., Henriksen M., Hjort C., Krinner G., Lunkka J.-P., Moller P., Murray A., Nikolskaya O., Saarnisto M., Svendsen J.I. (2004) Ice-dammed lakes and rerouting of the drainage of northern Eurasia during the Last Glaciation. *Quaternary Science Reviews* 23: 1313–1332.
- Mangerud J., Svendsen J.I., Astakhov V.I. (1999) Age and extent of the Barents and Kara ice sheets in Northern Russia. *Boreas* 28: 46–80.
- Ramsey M.A. (2015) OSL dating of High-elevation alluvial sediments: McMurdo Dry Valleys, Antarctica. Diss. Ms.Sc, North Dakota. 73 p.
- Svendsen J.I., Alexanderson H., Astakhov V.I., Demidov I., Dowdeswell J.A., Funder S., Gataullin V., Henriksen M., Hjort, C., Houmark-Nielsen M., Hubberten, H.W., Ingolfsson O., Jakobsson M., Kjaer K., Larsen E., Lokrantz H., Lunkka J.P., Lysa A., Mangerud J., Matushkov A., Murray A., Möller P., Niessen F., Nikolskaya O., Polyak L., Saarnisto M., Siegert C., Siegert M.J., Spielhagen R.F., Stein R. (2004) Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia. *Quaternary Science Reviews* 23: 1229–1272.

Геохимические особенности метаморфизма базитов района г. Куропачья, Беломорский Подвижный Пояс

Якушик М.А.^{1,3,4}, Сафонов О.Г.^{1,2}, Козловский В.М.³, Голунова М.А.^{1,3}

¹ИЭМ РАН, Черноголовка yakush.mihai@yandex.ru; ²Геологический факультет МГУ, Москва; ³ИГЕМ РАН, Москва; ⁴ГИН РАН, Москва

История геологического развития Беломорского подвижного пояса (БПП) включает в себя несколько этапов деформаций и метаморфизма, включая мигматизацию, а также гранитоидный и базитовый магматизм. В мигматизированных тоналит-трондьемит-гранодиоритовых (ТТГ) гнейсах в районе г. Куропачья заключены тела эклогитов и эклогитоподобных пород, схожих внешне и по минеральному составу с эклогитами. Однако, в эклогитоподобных породах не фиксируются такие же высокие значения давления, как в эклогитах.

Метабазиты обоих типов претерпели заметные ретроградные преобразования, что выражается в изменении как текстуры пород, так и их минерального состава. От центров будин к их контактам с вмещающими гнейсами постепенно исчезает массивная текстура пород и формируется гнейсовидность. Изменение минерального состава выражается в уменьшении количества и, в конечном счете, исчезновении граната, уменьшается количество амфибола, который сменяется эпидотом. Таким образом, в переходной зоне между будинами и гнейсами формируются лейкократовые эпидот-амфибол-кварц-плагноклазовые породы.

Для тел схожего генезиса и эволюции Р-Т в БПП в районе Красной губы были выделены отношения (Ti/Y, Ti/Zr, Zr/Y, La/Sm, Nb/Th) которые не изменяются в процессе эклогитизации и образовании амфиболитов (Расс и др., 2012). Метабазиты г. Куропачьей по этим отношениям показывают подобие метабазитам Красной губы: породы эклогитовых тел, сохранивших первичную текстуру, соответствуют составам метагаббро, а эклогитоподобные породы – составам габброноритов. Спектры РЗЭ пород центральных зон будин эклогитов близки к N-MORB. Породы приконтактных зон заметно обогащены легкими РЗЭ, в них возрастают содержания К, Rb, Ba, Nb, Ta, Pb, Sr. Для пород центральных зон будин характерна отрицательная аномалия Li, тогда как в приконтактной зоне с гнейсом содержание Li резко возрастает. В совокупности вышесказанного можно сделать вывод, что в породах приконтактных зон возрастает роль элементов, характерных для вмещающих гнейсов.

В кварце из эклогитовых частей центральных зон будин флюидные включения представлены водно-солевыми разностями, подобными флюидным включениям из эклогитов Берген Аркс, Норвегия (Svensen et al., 2001). Включения группируются вдоль залеченных трещин (псевдотворичные). Температуры их замерзания указывают на присутствие в растворах LiCl, MgCl₂, CaCl₂, KCl в концентрациях 22-5 масс.% NaCl эквивалента. В кварце пород краевых частей будин и во вмещающих гнейсах также присутствуют водно-солевые включения, но они не поддаются исследованию из-за существенно меньшего размера.

Таким образом, различия в перераспределении вещества между будинами и вмещающими гнейсами определяют взаимодействие одного и того же флюида с породами разного состава. Увеличение концентраций РЗЭ и отношений легких РЗЭ к тяжелым РЗЭ при образовании амфиболитов в краевых частях будин объясняется привнесением РЗЭ этими флюидами в ходе мигматизации вмещающих гнейсов и появлением в них эпидота, концентрирующего легкие РЗЭ.

Исследование выполнено в рамках гранта РФФИ № 18-17-00206-П и № 21-77-10006.

Литература:

- Svensen H., Jamtveit B., Banks D.A., Austrheim H. (2001) Halogen contents of eclogite facies fluid inclusions and minerals: Caledonides, western Norway. *J. Metamorph. Geol.* 19: 165–178.
- Расс И.Т., Козловский В.М., Корпечков Д.И., Ножевник В.М. (2012) Геохимия метабазитов Красной губы, Беломорский подвижный пояс. Доклады РАН 442: 233–238.

Combustion complexes of the Middle East as mineralogical models of the early Earth evolution

Britvin S.N., Vereshchagin O.S., Krzhizhanovskaya M.G., Gorelova L.A., Murashko M.N.

*Institute of Earth Sciences St. Petersburg State University, St. Petersburg
sergei.britvin@spbu.ru*

Mineral assemblages typical of the early stages of planetary history – nebular accretion, Earth crust formation, and even prebiotic systems preceded the emergence of primordial life – are reproduced in the combustion metamorphic complexes of the Dead Sea area (Gross, 1977; Britvin et al., 2015; Sokol et al., 2019). The discoveries made in Israel, Palestinian Authority and Jordan have brought a suite of refractory aluminates – common constituents of calcium-aluminum inclusions (CAI): grossite CaAl_4O_7 , hibonite $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$ and their terrestrial counterparts, as well as unique representatives of the perovskite group minerals. Phosphides, which were formerly considered as being meteoritic minerals, are represented by 12 species belonging to the Fe–Ni–P and Fe–Ni–Mo–P systems (Britvin et al., 2020). Exotic sulfides, such as oldhamite CaS , and daubreelite FeCr_2S_4 , which are rather typical for reduced enstatite meteorites (e.g., Galuskina et al., 2017), and hypercaline sulfides such as KFeS_2 . Condensed phosphates, including cyclophosphates (P_4O_{12})⁴⁻ – the likely candidates as a source of phosphorus in the prebiotic phosphorylation reactions (Britvin et al., 2021). The occurrence of these mineral assemblages in the geologically juvenile (<16 Ma) rocks of the Hatrurim Formation in Southern Levant indicates that *P–T* and redox conditions governed pyrometamorphic processes were rather similar to the conditions occurred at the early stages of planetary and Earth evolution. Consequently, the combustion complexes of the Middle East can serve as relevant models for the study of the mineral-forming processes at the early stages of planetary formation.

The studies were conducted at the Geomodel and X-ray Diffraction Studies Centers of SPSU, under financial support of the Russian Science Foundation, grant № 18-17-00079.

References:

- Britvin S.N., Murashko M.N., Vapnik Ye., Polekhovskiy Yu.S., Krivovichev S.V. (2015) Earth's phosphides in Levant and insights into the source of Archaean prebiotic phosphorus. *Scientific Reports* 5: 8355.
- Britvin S.N., Murashko M.N., Vapnik Ye., Polekhovskiy Yu.S., Krivovichev S.V., Vereshchagin O.S., Shilovskikh V.V., Krzhizhanovskaya M.G. (2020) Negevite, the pyrite-type NiP_2 , a new terrestrial phosphide. *American Mineralogist* 105: 422–427.
- Britvin S.N., Murashko M.N., Vapnik Ye., Vlasenko N.S., Krzhizhanovskaya M.G., Vereshchagin O.S., Bocharov V.N., Lozhkin M.S. (2021) Cyclophosphates, a new class of native phosphorus compounds, and some insights into prebiotic phosphorylation on early Earth. *Geology* 49: 382–386.
- Galuskina I.O., Galuskin E.V., Prusik K., Vapnik Y., Juroszek R., Ježak L., Murashko M. (2017) Dzierżanowskite, CaCu_2S_2 – a new natural thiocuprate from Jabel Harmun, Judean Desert, Palestine Autonomy, Israel. *Mineralogical Magazine* 81: 777–789.
- Gross H. (1977) The mineralogy of the Hatrurim Formation, Israel. *Geological Survey of Israel Bulletin* 70: 1–80.
- Sokol E.V., Kokh S.N., Sharygin V.V., Danilovskiy V.A., Seryotkin Y.V., Liferovich R., Deviatiiarova A.S., Nigmatulina E.N., Karmanov N.S. (2019) Mineralogical diversity of Ca_2SiO_4 -bearing combustion metamorphic rocks in the Hatrurim Basin: implications for storage and partitioning of elements in oil shale clinkering. *Minerals* 9: 465.

Magmatism and geodynamics of the Archaean active margin of Kola paleocontinent

Dokukina K.A.

GIN RAS, Moscow ksdokukina@gmail.com

The Meso-Neoproterozoic Belomorian eclogite province (BEP) contains numerous evidences of geodynamics settings that are typical for the plate tectonics. There are ophiolite and supra-subduction metasomatized mantle rocks, derivatives of continental arc and slab window magmatism; high-pressure complexes of subduction origin (eclogites and garnet pyroxenites). This set of the rocks makes it possible to apply the models and approaches adopted for the Phanerozoic active margins to the study of Archean rocks. The Archean Karelia and Kola paleocontinents that consist predominantly of granite-greenstone terranes together with the Belomorian accretionary–collisional orogen are the main tectonic units in the eastern Fennoscandian Shield. The Belomorian tectonic province is a NW-trending segment of the Archean nucleus of the Fennoscandian Shield and is distinguished by repeated episodes of intense deformation and high- to moderate-pressure metamorphism during the Archean and Paleoproterozoic. The Keret tectonic nappe at the southern margin of the Kola continent contains 3.00–2.70 Ga tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) gneisses and greenstones and is separated from the Belomorian accretionary–collisional orogen by the Central Belomorian greenstone belt, which is composed of an older mafic–ultramafic sequence ≥ 2.85 Ga. The belt is interpreted as an ancient suture zone. The BEP contains eclogite bodies that are hosted in TTG gneisses of the Keret Unit of the Kola active continental margin (Mints et al., 2014). There are two eclogite associations: (1) the subduction-type Salma association and (2) the Gridino mafic dykes. Protoliths of the Salma eclogites represent a sequence oceanic layered gabbros and basalt flows that contain layers, lenses, and interpillow sediments formed at ~ 2.9 Ga in a slow-spreading ridge. The subduction began in a time span 2.9–2.87 Ga, and eclogite-facies events occurred between ca.2.87 and ca.2.78 Ga. The dykes represent typical fissure intrusions and underwent metamorphism to eclogite facies. The dykes divide into two compositions (Fe-Ti gabbro and Mg-Cr gabbronorite) which represent alternating episodes of arc and slab window magmatism. The tectonic model of the BEP accepted by us was discussed for several years. The previous model (Mints et al., 2014) presented a flat subduction of the oceanic lithosphere beneath the Kola continental margin without a mantle wedge forming. The subduction recorded by the Salma assemblage was significantly warmer than the known examples of the modern “warm” subduction, and could be referred to as “hot subduction”. The petrologically derived P–T path for the Salma eclogite assemblage closely resembles the “hottest” trajectory that was corresponding lowest spreading rate (0.5–1 cm/year). We believed that the explanation of the hot-type subduction in the Salma case, which suggests involvement of the slow-spreading ridge subduction, seems to be quite plausible. The geochemical and geochronological parameters of the eclogites from the Salma and Gridino associations allowed us to represent formation of the dyke swarm back to 2.87–2.82 Ga as a result of mafic magma injections into the crust of the Kola active continental margin due to plunging of slow-spreading ridge. A significant difference between the last model (Dokukina, Mints, 2019) and the previous one is the formation of the mantle wedge, during melting of which typical arc magmatism occurs. The new model takes account of forming of (1) TTG gneisses, comprising blocks of subduction eclogites, that have geochemical characteristics from andesite to adakite that are commonly associated with melting of the subducting ocean slab; (2) Gridino Mg, Cr-rich gabbronorite dykes as products of high degrees of melting of the mantle wedge; and (3) Fe-Ti gabbro dykes as features of the slab window mantle magmatism. The eclogite-facies metamorphism of the Gridino dykes 2.82–2.78 Ga ago explains by delamination of the crust at the active margin and the subsequent subduction of separate crustal sheets at the active margin, including the mafic dykes.

The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (projects No. 20-05-00190).

References:

- Mints M.V., Dokukina K.A., Konilov A.N. (2014). The Meso-Neoproterozoic Belomorian eclogite province: Tectonic position and geodynamic evolution. *Gondwana Research* 25: 561–584.
- Dokukina K., Mints M. (2019). Subduction of the Mesoproterozoic spreading ridge and related metamorphism, magmatism and deformation by the example of the Gridino eclogitized mafic dyke swarm, the Belomorian Eclogite Province, eastern Fennoscandian Shield. *Journal of Geodynamics* 123: 1–37.

Behaviour of platinum-group elements during the formation of awaruite (Ni₃Fe) mineralization in peridotites of Kamchatka and Koryak Highlands

Kutyrev A.V.

IVS FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky anton.v.kutyrev@gmail.com

Natural Fe-Ni alloys such as awaruite are common in meteorites and, presumably, the Earth's core, where they host significant platinum-group elements (PGE). However, PGE concentrations in hydrothermal Fe-Ni alloys from terrestrial rocks are little known. In this work, we examine the geochemistry of awaruite and related minerals from several placer deposits sourced from the supra-subduction ophiolitic (Kamchatsky Mys, Karaginsky Island and Mamet) and Ural-Alaskan (Galmoenan) complexes of Kamchatka and the Koryak Highlands (Far East Russia) in order to assess the abundance of PGE in awaruite and constrain their mobility under hydrothermal conditions.

Studied awaruite from ophiolitic and Ural-Alaskan type complexes formed via desulfurization of pentlandite during serpentinization. Three groups of PGM are associated with awaruite from Kamchatsky Mys:

- 1) Pt-Fe alloys such as ferronickelplatinum (Pt₂FeNi) or unnamed Ni₂FePt alloys;
- 2) Os-Ir-Ru phases of various composition (Os-Ir-Ru-Fe-(Ni) alloys or hexaferrum);
- 3) Pd-Sb minerals which form together with serpentine during hydrothermal alteration.

Despite the abundance of PGM inclusions, no significant PGE concentrations have been measured in awaruite from the Kamchatsky Mys, Karaginsky Island or Mamet ophiolites. This is attributed to low PGE concentration in precursor sulphides and preferential partitioning of PGE into discrete secondary PGM within awaruite. In contrast, pentlandite relicts in awaruite from placers related to the Galmoenan Ural-Alaskan type complex contain exceptionally high, previously unreported, Os (up to 538 ppm, Fig. 1). Awaruite that forms on behalf of this pentlandite is also enriched in Os; however, this is likely due to contamination by inclusions of Os-rich pentlandite. Therefore, it appears that PGE do not easily partition to the awaruite crystal lattice during low-temperature processes in ophiolitic or Ural-Alaskan type complexes studied here. Nonetheless, awaruite still acts as an important host for secondary PGM inclusions and thus may influence the PGE budget of the host rocks.

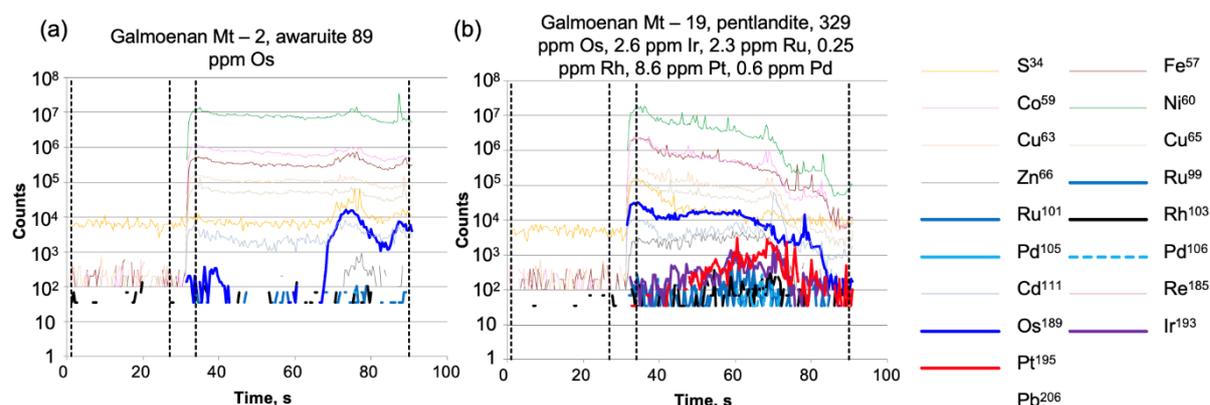


Figure 1. Selected downhole time-resolved spectra of LA-ICP-MS spot analysis of pentlandite and awaruite from Galmoenan complex.

Alkiviadis Kontonikas-Charos, Dmitry P. Savelyev, Tamara Yu. Yakich, Vadim S. Kamenetsky, Elena A. Sandimirova and Svetlana V. Moskaleva are greatly acknowledged for their assistance in this research.

This investigation was primarily supported by the Russian Foundation for Basic Research Grant № 20-05-00290 A.

Metamorphic evolution of the Archean Tokmovo megablock and of surrounding Paleoproterozoic orogenic belts (Volgo-Uralia segment, East European craton)

Pilitsyna T.A.^{1,2}, Samsonov A.V.¹, Erofeeva K.G.¹, Varlamov D.A.³

¹*IGEM RAS, Moscow allafia@yandex.ru;* ²*FSBI IMGRE, Moscow;*

³*IEM RAS, Chernogolovka dima@iem.ac.ru*

The Early Precambrian Volga-Uralia crustal segment represents the eastern part of the East European Craton. It is completely buried beneath a thick sedimentary cover and data on its structure and composition are based on geophysics and deep wells core research (Bogdanova et al., 2016). GGT nature of Tokmovo block is supported by study of the core samples, which comprise three main types of rocks: predominated Bt-Opx plagiogneisses (formed 2.72-2.86 Ga – U-Pb zirconium dating), tonalites with zirconium depleted in heavy REE (2.62 Ga) and metabasites, which metamorphic event (due to zirconium rims) in the range age from 2.72 to 2.63 Ga is an object of this research.

A one stage metamorphic evolution has been recorded in these rocks. Maximum values of the metamorphic thermodynamic parameters were identified in the Grt-Opx-Cpx-Hbl granulites within the cores of garnets and orthopyroxenes and correspond to middle-pressure granulite facies metamorphism (9-11 kb, 720-810°C). Lowest values correspond to the amphibolite facies (5-7 kb, 680°C) (tools: Lavrentieva, Perchuk, 1990; Perplex 6.8.8). The uniformity of garnets, absence of inclusions and oscillatory zoning, a strong decrease in pressure against gradual decrease in temperature indicate one-stage metamorphism and that it was carried out according to the "Aldan" type – an uplift with cooling along the steep Archean geotherm.

The Osnitsk-Mikashевичи Moscow orogenic belt (OMMB) rocks (TTG-gneisses and metagabbroanorthites), framing the Tokmovo block from the north, have U-Pb age of 1.97-2.02 Ga (Samsonov et al., 2018) and P-T grades of metamorphism of Px-Hbl-schist and fine-medium-grained Cpx-Hbl-plagiogneiss correspond to the amphibolite facies (5-7 kb, 750-770°C).

In the outline part of the Vyatka belt, framing the block from the east, supracrustal rocks (2.08–2.10 Ga) are developed, metamorphism of the Opx-Grt-Bt schists corresponds to the amphibolite facies (6.3-8.3 kb, 600-700°C for peak, 4.8-5.5 kb, 590-640°C for regressive stage). In peak and 2.9 kb for regressive by TWQ 2.34 (T is nearby the same).

The Tokmovo megablock represents a fragment of the Archean crust, which has preserved the Archean metamorphic history, whereas the Paleoproterozoic belts framing it experienced HT/LP-type metamorphism, which is typical of collisional orogens (Savko et al., 2015).

References:

- Bogdanova S.V., Gorbatshev R., Garetsky R.G.* (2016) EUROPE. East European Craton. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences: 1–18.
- Holdaway M.J.* (2000) Application of new experimental and garnet Margules data to the garnet-biotite geothermometer. *American Mineralogist* 85: 881–892.
- Holdaway M.J.* (2001) Recalibration of the GASP geobarometer in light of recent garnet and plagioclase activity models and versions of the garnet-biotite geothermometer. *American Mineralogist* 86: 1117–1129.
- Lavrentieva I.L., Perchuk L.L.* (1990) Orthopyroxene-garnet geothermometer: experiment and theoretical processing of database. *Doklady Akademii Nauk SSSR* 310(1): 179–182.
- Samsonov A.V., Bogdanova S.V., Postnikov A.V. et al.* (2018) Paleoproterozoic OMMB: new geochronology and petrology data for the Russian segment and tectonic implication. Abstract for the 33rd NGWM. Denmark: 54–55.
- Savko K., Samsonov A., Salnikova E. et al.* (2015) HT/LP metamorphic zoning of the eastern part of the Voronezh crystalline massif: age, conditions and geodynamic setting of the formation. *Petrology* 23(6): 607–623.

Why and how the Earth's crust melts: insight from experiments

Safonov O.G.^{1,2}

¹*IEM RAS, Chernogolovka oleg@iem.ac.ru;*

²*Geological Faculty, Moscow State University, Moscow*

Study of crustal xenoliths in volcanics and geophysical data infer (e.g. Rudnick, Fountain, 1995) that the lower continental crust is predominantly composed of basic-to-intermediate rocks metamorphosed under upper-amphibolite to granulite facies conditions. In contrast, the middle crust consists of voluminous amphibolite-facies tonalite-trondjemite-granodiorite (TTG) gneisses. Since the Archean, such layered structure of the continental crust has been created owing to several processes. Accumulation of mantle-derived basaltic magmas formed lower crust, as well as provided heat and fluids to trigger metamorphism and anatexis of overlying supracrustal rocks (e.g. Bohlen, Mezger, 1989). Granitic magmas mediated a diapiric rise of high-grade gneissic masses accompanied by an opposite sinking of an upper-crustal greenstone material (Perchuk et al., 2011).

Since the Bowen and Tuttle's experiments, debates continue about whether high temperatures are the only cause of the melting of the crust, or is it impossible without the presence of fluids, and if the fluid is necessary, what is its composition and sources? Some models supported by experimental studies consider granulites at different levels of the crust as restites after fluid-deficient or dehydration partial melting (e.g. Clemens, 1990). The major factor for such melting is a high heat flow. It is generally substantiated by findings of ultrahigh-temperature, >900°C, granulite terrains worldwide (e.g. Kelsey, Hand, 2015). Radioactive heat in thickened crust and an elevated heat flow in the back-arc basins are invoked to attain the dehydration melting (e.g. Clark et al., 2011). Mantle-derived basic and even hot granitoid melts are able to transfer heat to provoke melting. According to experiments, dehydration melting of aluminous metasediments and graywakes at 800-850°C adequately explains formation of S-type granites.

However, the dehydration melting not always is able to explain appearance of I-type granites by melting of TTG gneisses and amphibolites. Following to experimental results, these sources produce sufficient melt volumes just above 900°C. Addition of external aqueous fluids is highly necessary to produce such magmas (e.g. Weinberg, Hasalová, 2015). Complex H₂O-CO₂-salt fluids provoke generation of charnockites and A-type alkali-rich granitoid-syenite complexes (Aranovich et al., 2013; Safonov et al., 2014).

The study is supported by the Russian Scientific Foundation (project 18-17-00206)

References:

- Aranovich L.Y., Newton R.C., Manning C.E. (2013) Brine-assisted anatexis: Experimental melting in the system haplogranite-H₂O-NaCl-KCl at deep-crustal conditions. *Earth Planet. Sci. Lett.* 374: 111–20.
- Bohlen S., Mezger K. (1989) Origin of granulite terranes and the formation of the lowermost continental crust. *Science* 244: 326–329.
- Clark C., Fitzsimons I.C., Healy D., Harley S.L. (2011) How does the continental crust get really hot? *Elements* 7: 235–240.
- Clemens J.D. (1990) The granulite–granite connection. In: Vielzeuf, D., Vidal, P. (Eds.), *Granulites and Crustal Evolution*. Kluwer Academic Publ, Dordrecht, 25–36.
- Kelsey D.E., Hand M. (2015) On ultrahigh temperature crustal metamorphism: phase equilibria, trace element thermometry, bulk composition, heat sources, timescales and tectonic settings. *Geosci. Front.* 6: 311–356.
- Perchuk L.L., Gerya T.V., van Reenen D.D., Kramers J.D., McCourt S. (2011) Formation and evolution of Precambrian granulite terranes: a gravitational redistribution model. *Geological Society of America Memoirs*. 207: 289–310.
- Rudnick R.L., Fountain D.M. (1995) Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspectives. *Reviews in Geophysics* 33: 267–309.
- Safonov O.G., Kosova S.A., van Reenen D.D. (2014) Interaction of biotite-amphibole gneiss with the H₂O-CO₂-(K, Na)Cl fluids at 550 MPa and 750 and 800°C: experimental study and applications to dehydration and partial melting in the middle crust. *J. Petrol.* 55: 2419–2456.
- Weinberg R.F., Hasalová P. (2015) Water-fluxed melting of the continental crust: A review. *Lithos* 212-215: 158–188.

Mustard gold of the Evevventa occurrence (Northern Kamchatka, Russia)

Zhegunov P.S., Kuttyrev A.V., Moskaleva S.V.

IVS FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky pavel.zhegunov@bk.ru

Gold concentrations may climb up to high values in the hypergenesis zones of epithermal deposits. Such zones often comprise so-called mustard gold – an extremely fine-grained, usually porous aggregates of native gold and other minerals, including Fe oxides (Okrugin et al., 2014; Tolstykh et al., 2019). Mustard gold is formed as a result of the oxidation of Au(Ag) tellurides in the late hydrothermal or hypergenic stage (Okrugin et al., 2014; Tolstykh et al., 2019; Zhao et al., 2009).

The Evevventa epithermal (LS) ore occurrence is located in the northeastern part of the Central Kamchatka volcanic belt. It is hosted by lavas and pyroclastic rocks of the Middle Miocene-Early Pliocene host. The ore bodies are comprised of quartz and adularia-quartz veins and stockworks, as well as hydrothermal breccias. The hypogene ore assemblage is composed of the following minerals: pyrite and other base metal sulfides, tellurides and Au-Ag selenides (krennerite, hessite, petzite, and naumannite). The following hypergene Au-Ag mineral assemblage was formed in the oxidation zone: uyttenbogaardtite, petrovskaitite, acanthite, chlorargyrite, and mustard gold.

Mustard gold is a microporous aggregate of gold and iron hydroxides. Gold forms anhedral and euhedral grains ranging in size from 25 μm to 120 μm . Silver, O, S, Mn, Fe, and Te impurities are detected in mustard gold. The mustard gold analyses plotted on the O – Fe+Mn+Te+S – Au(+Ag) chart are aligned along the line connecting the native gold and the O – Fe+Mn+Te+S line. This trend likely shows the ratio of fine gold particles to the Fe-oxide matrix (Tolstykh et al., 2019). The origin of this type of mustard gold is related to the late (possibly hypergenic) stage of primary ores transformation (Tolstykh et al., 2019). At the Evevventa ore occurrence, mustard gold is likely a product of krennerite oxidation. In Kamchatka, mustard gold was previously found in the gold-telluride epithermal deposits Maletoyvayam (Tolstykh et al., 2019) and Aginskoye (Okrugin et al., 2014).

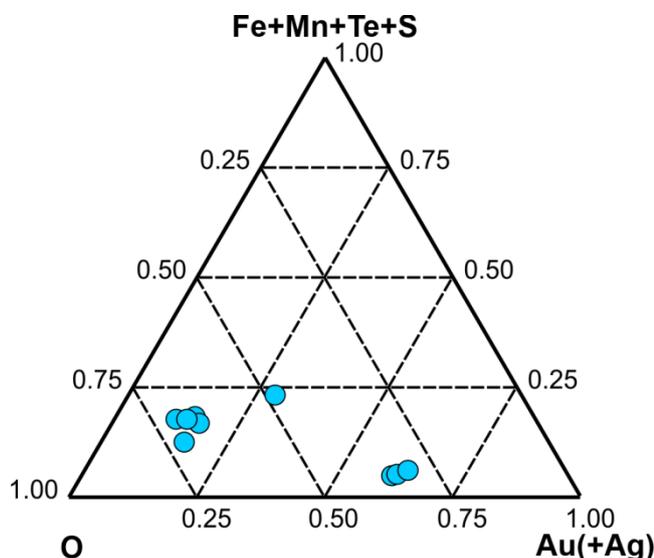


Fig. 1. The composition of mustard gold of the Evevventa occurrence.

References:

- Okrugin V.M., Andreeva E., Etschmann B., Pring A., Li K., Zhao J., Brugger J. (2014). Microporous gold: Comparison of textures from Nature and experiments. *American Mineralogist* 99(5-6): 1171–1174.
- Tolstykh N. D., Palyanova G. A., Bobrova O. V., Sidorov E. G. (2019). Mustard gold of the Gaching ore deposit (Maletoyvayam ore Field, Kamchatka, Russia). *Minerals* 9(8): 489.
- Zhao J., Brugger J., Grundler P.V., Xia F., Chen G., Pring A. (2009). Mechanism and kinetics of a mineral transformation under hydrothermal conditions: Calaverite to metallic gold. *American Mineralogist* 94(11-12): 1541–1555.

Научное издание

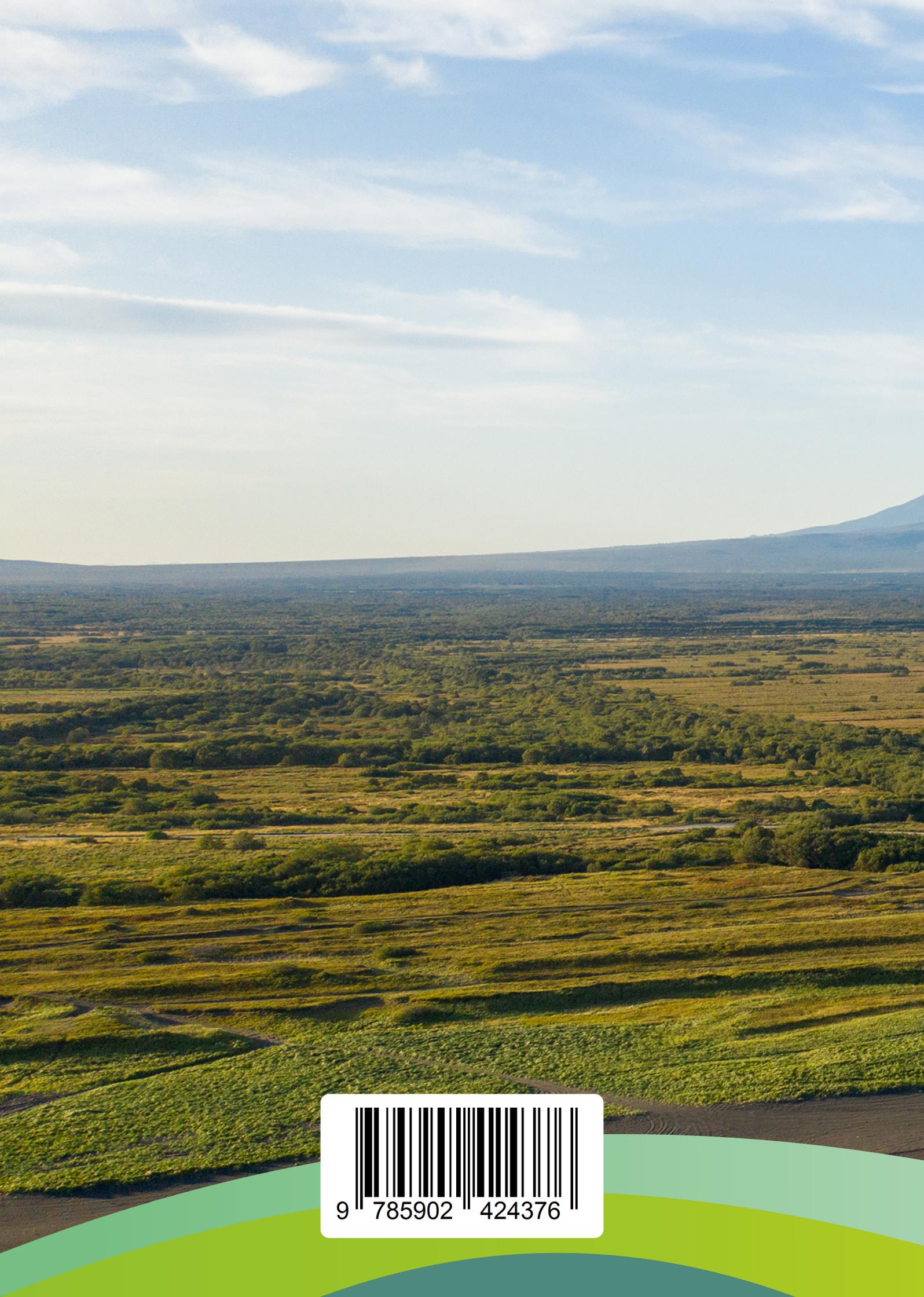
**Материалы XII Международной школы по наукам о Земле
имени профессора Л.Л. Перчука (ISES-2022)**

7-19 сентября 2022 г.

Сдано в набор 24.08.2022
Подписано к печати 24.08.2022
Дата выхода: 31.08.2022
Формат 60x84/8
Бумага типографская
Гарнитура «Arial»
Усл.-печ. л. 13.25

Заказ № СТ-22-001830

Отпечатано с готового оригинал-макета, подготовленного в ИВиС ДВО РАН,
в ООО "СЭТО-СТ", 683024, г. Петропавловск-Камчатский, пр. 50 лет Октября, 1/2.
тел. 8(4152) 43-17-14



9 785902 424376