



Институт экспериментальной минералогии
имени академика Д.С. Коржинского РАН

В КИЛЬВАТЕРЕ БОЛЬШОГО КОРАБЛЯ:

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ
МАГМАТИЗМА,
МЕТАМОРФИЗМА И
ГЕОДИНАМИКИ

Материалы IV конференции, посвященной
90-летию со дня рождения заслуженного
профессора МГУ Л.Л. Перчука

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки**



**ИНСТИТУТ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МИНЕРАЛОГИИ**
имени академика Д.С. Коржинского Российской академии наук

**В КИЛЬВАТЕРЕ БОЛЬШОГО КОРАБЛЯ:
современные проблемы магматизма, метаморфизма
и геодинамики**

материалы IV конференции, посвященной 90-летию со дня рождения
заслуженного профессора МГУ Л.Л. Перчука

24-25 ноября 2023
Черноголовка, Россия

Черноголовка
2023

УДК 549.1
ББК 26
Г36

В КИЛЬВАТЕРЕ БОЛЬШОГО КОРАБЛЯ: современные проблемы магматизма, метаморфизма и геодинамики, материалы IV конференции, посвященной 90-летию со дня рождения заслуженного профессора МГУ Л.Л. Перчука. 24-25 нояб. 2023 г. Черноголовка, Россия. -Черноголовка, 2023, 51 с.

Организационный комитет:

Аранович Л.Я. (ИГЕМ РАН, Москва) сопредседатель
Перчук А.Л. (МГУ, Москва) сопредседатель
Сафонов О.Г. (ИЭМ РАН, Черноголовка) сопредседатель
Арискин А.А. (МГУ, Москва)
Бобров А.В. (МГУ, Москва)
Геря Т.В. (ЕТН, Цюрих)
Когарко Л.Н. (ГЕОХИ РАН, Москва)
Котельников А.Р. (ИЭМ РАН, Черноголовка)
Лиханов И.И. (ИГМ СО РАН, Новосибирск)
Осадчий Е.Г. (ИЭМ РАН, Черноголовка)
Персиков Э.С. (ИЭМ РАН, Черноголовка)
Плечов П.Ю. (Минмузей РАН, Москва)
Силантьев С.А. (ГЕОХИ РАН, Москва)
Шаповалов Ю.Б. (ИЭМ РАН, Черноголовка)
Шацкий В.С. (ИГМ СО РАН, Новосибирск)

Программный комитет:

Сафонов О.Г. (ИЭМ РАН, Черноголовка) сопредседатель
Перчук А.Л. (МГУ, Москва) сопредседатель
Аранович Л.Я. (ИГЕМ РАН, Москва) сопредседатель
Бутвина В.Г. (ИЭМ РАН, Черноголовка)
Ковальская Т.Н. (ИЭМ РАН, Черноголовка)

Учёные секретари:

Варламов Д.А., Тихомирова Е.Л. (ИЭМ РАН, Черноголовка)

Место проведения:

г.Черноголовка, ул. Школьный бульвар 1Б, Большая гостиная Дома ученых

Все материалы представлены в авторском варианте

ISBN 978-5-6041841-9-6



ISBN 978-5-6041841-9-6

© ИЭМ РАН, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Азимов П.Я., Лезжов А.М., Серебряков Н.С. Высокобарные бесплагноклазовые гранат-пироксен-амфиболовые породы Беломорья: альтернатива эклогитам в флюидонасыщенной системе	7
Александрович О.А., Иванов М.В. Константа и степень диссоциации NaCl в водном флюиде при температурах 400°C–1000°C и давлениях от 0.5 до 20 кбар. Расчет методом молекулярной динамики	8
Аранович Л.Я., Перцев А.Н. Сколько источников у базальтов MORB?	9
Арискин А.А., Тессалина С.Г., Кислов Е.В., Пшеницын И.В., Николаев Г.С., Соболев С.Н. Re-Os изотопная систематика довыренских ультрамафитов, Cu-Ni-сульфидных руд и ЭПГ-анортозитов	10
Бабарина И.И. Хрупко-пластические переходы в корневых частях коллизионных орогенов	11
Бобров А.В. Пироксены высокого давления	12
Бутвина В.Г., Лиманов Е.В., Воробей С.С., Якушик М.А., Голунова М.А., Сафонов О.Г., Ван К.В. Экспериментальное изучение индикаторных реакций модального мантийного метасоматоза.	13
Бушмин С.А., Иванов М.В., Кольцов А.Б., Лебедева Ю.М., Савва Е.В. Состав и свойства флюидов при метасоматических преобразованиях метаморфических пород в Р-Т условиях средней коры (амфиболитовая фация)	14
Вивдич Э.С., Балтыбаев Ш.К., Юрченко А.В. Метаморфические минеральные реакции и парагенезисы в породах Мейерской тектонической зоны (юго-восток Фенноскандинавского щита, Россия)	15
Владимиров В.Г., Смолякова А.Е. Реологические следствия синтектонического контактового метаморфизма	16
Гирнис А.В. Распределение элементов-примесей между минералами и силикатным расплавом: некоторые итоги более 50 лет экспериментального изучения	17
Докукина К.А., Шешуков В.С., Конилов А.Н., Ван К.В. Метаморфизованные плагиогранитные жилы в эклогитах Салмы, Беломорская эклогитовая провинция	18
Дунаева А.Н., Кронрод В.А., Кусков О.Л. Термореологическая модель каменно-ледяной мантии Титана	19
Дымшиц А.М., Дорогокупец П.И. Фазовые превращения в гранатах в условиях переходной зоны Земли: приложение к вопросам глубинной геодинамики	20
Еремин М.Д., Перчук А.Л., Захаров В.С., Геря Т.В. Субдукция и магматизм на активной окраине по результатам численного моделирования	21

Иванов М.В. Термодинамическая модель четверной флюидной системы $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}-\text{CaCl}_2$ при P-T параметрах средней и нижней коры	22
Кислов Е.В. Метаморфизм и метасоматоз в формировании апосерпентинитового нефрита Харгантинского месторождения, Западный Хамар-Дабан	23
Козловский В.М., Григорьева В.М. Амфиболиты Кемлудских островов и особенности их эклогитизации	24
Козловский В.М., Курдюков Е.Б., Голунова М.А. Архейские гранулит-чарнокит-эндербитовые комплексы Карелии. Петрология и физико-химические условия формирования	25
Конилов А.Н., Пожиленко В.И., Ван К.В. Эклогиты горы Куропачьей как эталон Беломорской эклогитовой провинции	26
Кронрод В.А., Кронрод Е.В., Кусков О.Л. Оценки валового состава луны по сейсмическим и теплофизическим моделям	27
Кузюра А.В., Спивак А.В., Литвин Ю.А. Влияние C-O-H-флюида на перитектическую реакцию оливина в алмазообразующей карбонат-силикатной системе при 6 ГПа	28
Лахманова Л.А., Бутвина В.Г., Голунова М.А., Демидова С.И., Бухтияров П.Г., Ван К.В. Экспериментальное изучение образования шпинели в системе анортит-форстерит при $T = 1400\text{ }^\circ\text{C}$	29
Лиханов И.И. Метаморфические индикаторы геодинамических обстановок коллизии, растяжения и сдвиговых зон земной коры	30
Лиханов И.И. Петрогенезис, возраст и Lu-Hf систематика пород Гаревского комплекса Енисейского кряжа: новые доказательства гренвильских и вальгальских тектонических событий на западной окраине Сибирского кратона	31
Персиков Э.С., Бухтияров П.Г., Аранович Л.Я., Шапошникова О.Ю., Некрасов А.Н. Самородное железо в базальтах в природе и экспериментах в восстановительных условиях	32
Перчук А.Л., Захаров В.С., Геря Т.В. Влияние эклогитизации на стиль субдукции в раннем докембрии: результаты петролого-термомеханического моделирования	33
Плечов П.Ю. Эволюция магматизма в островодужных системах	34
Полянский О.П., Лиханов И.И., Бабичев А.В., Козлов П.С., Зиновьев С.В., Свердлов В.Г. Петрологические свидетельства и термомеханическая численная модель генерации сверхлитостатического давления	35
Расс И.Т., Полозов А.Г., Шмулович К.И. Расплавы в фосфат-карбонатной системе	36
Сапегина А.В., Перчук А.Л. Фазовые отношения в сухом и водном базальте COX до 40 ГПа и 2100°C по результатам термодинамического моделирования	37

Сапегина А.В., Перчук А.Л., Шацкий В.С. Два типа симплектитов в ксенолите гранатового гранулита из трубки Зарница	38
Сафонов О.Г., Селютина Н.Е., Япаскурт В.О., Варламов Д.А., Шарыгин И.С. Метасоматизм в докембрийской коре Сибирского кратона: результат изучения ксенолитов гранат($\pm$ ортопироксен)-биотит-полевошпатовых пород из кимберлитовых трубок Юбилейная и Сытыканская, Якутия	39
Сафонов О.Г., Япаскурт В.О., ван Ринен Д.Д., Смит К.А., Ушакова С.А., Голунова М.А. Обобщенный Р-Т тренд и флюидный режим эксгумации метапелитов Центральной зоны комплекса Лимпопо (ЮАР)	40
Силантьев С.А., Бадюков Д.Д., Ахметшин А.Г. Признаки частичного плавления в мантийных ксенолитах из щелочных базальтов о-ва Жохова, Восточная Арктика: данные аналитической сканирующей электронной микроскопии	41
Симаков С.К., Стегницкий Ю.Б. Постмагматическая стадия формирования алмазов в кимберлитах	42
Симаков С.К., Стегницкий Ю.Б. Методы оценки потенциальной алмазоносности кимберлитов и родственных пород на основе расчета С-Н-О флюидов по составу ксенокрист	43
Слабунов А.И., Максимов О.А., Сибелев О.С. Неоархейская надсубдукционная система (на примере Костомукшского зеленокаменного и Вокнаволоцкого гранулитового комплексов Карелии)	45
Спиридонов Э.М., Ладыгин В.М., Соколов В.Н., Чернов М.С., Фролова Ю.В. Типичные текстуры свежих базальтов любых геотектонических обстановок - ультратонкопористые	46
Спиридонов Э.М., Овсянников Г.Н., Филимонов С.В., Кравченко С.М., Семиколенных Е.С., Путинцева Е.В., Тевелев Арк.В., Шалимов И.В., Лысенко В.И. Петрогенетическая схема Н.Л. Боуэна и акцессорные минералы Cr, Ti, Zr, REE, Y. Армолколит и продукты его превращений	47
Спиридонов Э.М., Путинцева Е.В., Лавров О.Б. Траппы и кимберлиты раннего протерозоя Северного Прионежья (Карелия), метаморфизованные в условиях цеолитовой и пренит-пумпеллиитовой фаций	48
Федькин В.В. Взаимодействие термобарических и петрохимических процессов при формировании коровых эклогитов	49

Высокобарные бесплагиоклазовые гранат-пироксен-амфиболовые породы Беломорья: альтернатива эклогитам в флюидонасыщенной системе

Азимов П.Я.¹, Лезжов А.М.^{1,2}, Серебряков Н.С.³

¹ ИГГД РАН, Санкт-Петербург, Россия, pavel.azimov@mail.ru; ² СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия, arsenylez@gmail.com; ³ ИГЕМ РАН, Москва, Россия, nikserebr@yandex.ru

В архейской Беломорской провинции Фенноскандинавского щита проявлен позднепалеопротерозойский (~1.9 млрд лет) метаморфизм эклогитовой фации (Слабунов и др., 2021), которому подверглись, в частности, раннепалеопротерозойские (2.45–2.40 млрд лет) габбронориты. Реликты таких эклогитов установлены только в единичных точках на восточном и северном флангах провинции. Остаётся открытым вопрос, был ли эклогитовый метаморфизм локальным или он происходил и в других частях Беломорья. В большей части тел габброноритов Беломорья метаморфические преобразования проявлены лишь в формировании реакционных кайм (Stepanova et al., 2021). Мы выявили в телах метагабброноритов Беломорской провинции, в том числе в её осевой части (Чупинский парагенейсовый пояс), бесплагиоклазовые Grt-Opx-(Ath)-Cam породы. Выявлены постепенные переходы от метагабброноритов с ранними реакционными каймами к таким амфиболовым породам. По мере роста давления плагиоклаз в метагабброноритах исчезает, а за его счёт формируются гранат и паргаситовый амфибол.

Наиболее широкое развитие Grt-Opx-(Ath)-Cam пород, слагающих зоны мощностью десятки метров, установлено нами в массиве Вуатваракка (окрестности пос. Чупа). Среди них присутствуют также Grt-Cpx-Cam породы. Исследования парагенезисов Opx + Grt + Bt ± Cam и Cpx + Cam + Grt методами мультиравновесной (TWEEQU: Berman, 1991; avPT: Powell and Holland, 1994) и классической термобарометрии показывают, что они формировались при $P > 20$ кбар и $T \sim 750\text{--}850^\circ\text{C}$ (условия эклогитовой фации). В порфиробластах граната из Grt-Cpx-Cam породы установлены минеральные включения с парагенезисом Cpx + Tlc, устойчивым лишь при высоких давлениях (Jenkins et al., 1991). Наши расчёты для этого парагенезиса указывают на $P > 25\text{--}30$ кбар, то есть сверхвысокобарные (UHP) или близкие к ним условия.

Эклогитовый и гранат-клиноамфиболовый парагенезисы связаны реакцией $\text{Alm-Prp} + \text{Di-Hd} + \text{Jd} + \text{H}_2\text{O} = \text{Grs} + \text{Tr-Act} + \text{Prp-fPrp}$, из чего следует, что при высокой активности воды парагенезис паргаситового амфибола и граната может быть альтернативным эклогитовому парагенезису $\text{Omp} + \text{Grt}$. Экспериментальные данные подтверждают устойчивость паргасита при таких давлениях (Gilbert, 1968). Это может объяснять отсутствие эклогитов в осевой части Беломорской провинции в условиях метаморфизма высоких давлений.

Работа поддержана темами НИР ИГГД РАН (№ FMUW-2022-0002) и ИГЕМ РАН (№ FMMN-2021-0008).

Литература:

- Слабунов А.И., Балаганский В.В., Щипанский А.А. (2021) Мезоархей-палеопротерозойская эволюция земной коры Беломорской провинции Фенноскандинавского щита и тектоническая позиция эклогитов. Геол. геофиз. 62: 650–677.
- Berman R.G. (1991) Thermobarometry using multiequilibrium calculations: a new technique with petrologic applications. Can. Mineral. 29: 833–855.
- Gilbert M.C. (1968) Reconnaissance study of the stability of amphiboles at high pressure. Carnegie Inst. Wash. Yearb. V. 67. P. 167–170.
- Jenkins D.M., Holland T.J.B., Clare A.K. (1991) Experimental determination of the pressure-temperature stability field and thermochemical properties of synthetic tremolite. Amer. Mineral. 76: 458–469.
- Powell R., Holland T. (1994) Optimal geothermometry and geobarometry. Amer. Mineral. 79: 120–133.
- Stepanova A.V., Stepanov V.S., Larionov A.N., et al. (2022) Relicts of Paleoproterozoic LIPs in the Belomorian Province, eastern Fennoscandian Shield: barcode reconstruction for a deeply eroded collisional orogen. Geol. Soc. London Spec. Publ. 518: 101–128.

Константа и степень диссоциации NaCl в водном флюиде при температурах 400°C–1000°C и давлениях от 0.5 до 20 кбар. Расчет методом молекулярной динамики

Александрович О.А.¹, Иванов М.В.²

¹ИГГД РАН, Санкт-Петербург, allformtg@gmail.com; ²ИГГД РАН, Санкт-Петербург, m.v.ivanov@ipgg.ru

Важнейшим свойством геологических флюидов является их способность к растворению породообразующего и рудного вещества, его переносу и отложению. Флюиды, не содержащие солей и других электролитов, обладают минимальными возможностями для транспорта вещества. Содержание гидратированных ионов, определяющее реакционную и транспортную способность флюида, зависит как от концентрации соли, так и от степени её диссоциации. Последняя зависит от давления и температуры и может существенно отличаться от её значений в нормальных условиях.

К настоящему времени как экспериментальные, так и теоретические данные по степени диссоциации солей в широком диапазоне P - T условий коры фрагментарны и не дают полного представления о концентрациях катионов и анионов в водно-солевом флюиде на разных уровнях коры. При помощи метода молекулярной динамики нами произведён расчёт степени диссоциации в водном флюиде в диапазоне температур 400°C–1000°C и давлений 0.5–20 кбар. Детали расчёта представлены в (Иванов, Александрович, 2022). В общей сложности расчёт произведён для более чем 30 P - T точек. Для каждой комбинации P и T расчёт произведён для нескольких (от 4 до 10) концентраций соли во флюиде. На основе данных о степени диссоциации в каждой расчётной точке произведено вычисление константы диссоциации NaCl. Результаты этих вычислений показывают, что в диапазоне концентраций соли до 1.7 моль/кг H₂O (~ 9 мас.% NaCl) концентрационные зависимости степени и константы диссоциации с высокой точностью следуют теории Дебая-Хюккеля.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы: При высоких P - T параметрах нижней коры Na и Cl сильно ассоциированы, но при снижении P и T эти параметры различным образом влияют на степень диссоциации. Основной эффект связан с изменением плотности флюида. Снижение его плотности при уменьшении давления ведёт к резкому падению степени диссоциации. Менее резким является эффект снижения степени диссоциации при постоянном давлении и росте температур. Это отражается в различии эволюции свойств NaCl рассола в главных типах серий метаморфических фаций с разными T/P градиентами и разной металлогенической специализацией.

Преобладающая часть рассчитанных значений степени диссоциации NaCl получена для P - T условий метаморфических фаций андалузит-силлиманитовой фациальной серии, отражающих высокий T/P градиент, характеризующий, например, условия аккреционных орогенов или контактового метаморфизма. Получены также результаты для степени диссоциации в P - T условиях кианит-силлиманитовой фациальной серии с умеренным T/P градиентом в коллизионных орогенах и глаукофан-жадеитовой фациальной серии с низким T/P градиентом в зонах субдукции.

В докладе приводятся величины степени и константы диссоциации, рассчитанные для P - T условий ряда фаций метаморфизма.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00270, <https://rscf.ru/project/22-27-00270/>.

Иванов М.В., Александрович О.В. (2022) Степень диссоциации NaCl в водном флюиде при температурах до 1000°C и давлениях до 20 кбар. Расчет методом молекулярной динамики. Труды Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии (ВЕСЭМПГ-2022). М.: ГЕОХИ 220–224. <https://www.iem.ac.ru/>

Сколько источников у базальтов MORB?

Аранович Л.Я^{1,2}, Перцев А.Н.¹

¹ИГЕМ РАН, Москва, lyaranov@igem.ru, ²ИЭМ РАН, Черноголовка

Abundant zircon grains have been reported in granitoid veinlets within ocean core complex (OCC) at MAR 13°30'. The origin of the veinlets was ascribed to differentiated enriched basalt melts (E-MORB; Pertsev et al., 2021). In this report we discuss origin of the E-MORB based on the new data on chemical composition of basalt glasses collected within the geochemical anomaly of the Mid-Atlantic ridge at 13°25'–13°40'N, where fresh quenched lavas occur dominantly in asymmetric off-axial structures. The collected samples indicate wide compositional ranges from strongly depleted D-MORB with 0.04 wt.% K₂O, K₂O/TiO₂ = 0.08 and (La/Sm)_N = 0.69 (subscript N denotes concentrations normalized to primitive mantle according to Palme and O'Neill, 2014) to the most enriched E-MORB with 0.92 wt.% K₂O, K₂O/TiO₂ = 0.42 and (La/Sm)_N = 2.45. Clear correlations are traced between incompatible element ratios (K₂O/TiO₂, La/Sm, Nb/Zr), concentrations of MgO, K₂O, H₂O, and ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratio, suggesting variable contribution to the compositional diversity of the glasses from two distinct source materials, one of which is depleted mantle. Testing the hypothesis of pyroxenite-derived melts as an enriched end-member failed to reproduce the observed REE patterns, (Sr/Zr)_N, and (Ba/Nb)_N ratios, and the K₂O–K₂O/TiO₂ relations. Two alternative hypotheses – melts derived from melting remnants of continental crust (1) or OCC gabbro (2) – are suggested based on the complementary character of the REE patterns of the basalt glasses and partial melts compositions calculated at 1000°C/50MPa from either bulk continental crust as estimated by Taylor and McLennan (1995) (1) or OCC gabbro sampled in the study area (2). Complementarity of the two sources with the D-MORB holds also for the other geochemical parameters: (Sr/Zr)_N vs (Ba/Nb)_N, (La/Sm)_N vs (Rb/Nb)_N, and for the K₂O–K₂O/TiO₂ relations. The first hypothesis calls upon partial melting of continental crustal material preserved in the vicinity of ridge-transform fault system, while the second suggests melt-rock interaction within the off-axial structures of the pre-existed gabbro assemblages, with concurrent melting of the wall-rock material and dissolution of the resulting melt in the intruded magma. Both scenarios, operating either separately or jointly, might contribute to the MORB geochemical variability documented in the present study.

Palme, H., O'Neill, H.St.S., 2014. *Cosmochemical estimates of mantle composition. Treatise on Geochemistry* 2nd Ed. 3, pp. 1–39.

Pertsev, A.N., Aranovich, L.Y., Prokofiev, et al., 2021. *Potassium-rich granite melt inclusions in zircon from gabbro-hosted felsic stringers, Mid-Atlantic Ridge at 13°34' N: E-MORB connection. Lithos* 400, 106300. doi: 10.1016/j.lithos.2021.106300

Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1995. The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews of Geophysics* 33, 241–265. doi: 10.1029/95RG00262

Re-Os изотопная систематика довыренских ультрамафитов, Cu-Ni-сульфидных руд и ЭПГ-анортозитов

Арискин А.А.^{1, 2}, Тессалина С.Г.³, Кислов Е.В.⁴, Пшеницын И.В.², Николаев Г.С.², Соболев С.Н.²

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, ariskin@rambler.ru

²ГЕОХИ РАН им. В.И. Вернадского, Москва

³Центр изотопных исследований университета Кертина, Перт, Австралия

⁴Геологический институт им Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ

Йоко-Довыренский расслоенный массив (далее Довырен) залегает среди карбонатно-терригенных толщ Северного Прибайкалья и входит в состав Довыренского интрузивного комплекса возрастом ~728 млн. лет (Ariskin et al., 2018). Стратиграфическое строение Довырена детально изучено в мощной срединной части (3.2-3.4 км), где в основании разреза выделены закаленные габбронориты и пикродолериты, сменяющиеся на плагиоперидотиты и главную стратиграфическую последовательность кумулатов (снизу вверх): дунит → троктолит → оливинное габбро → оливинный габбронорит → кварцевые габбронориты. В интрузиве проявлена рудоносность двух типов – Cu-Ni сульфидные руды в силлах и апофизах, подстилающих массив, и ЭПГ-минерализация малосульфидных анортозитов.

Исследования Re-Os изотопной системы проведены на образцах закаленного габбронорита, пикродолерита, плагиоперидотита, плагиодунита и слабо минерализованных троктолита и платинометаллических анортозитов. В дополнение изучены образцы глобулярной и сидеронитовой руды из апофиза DV10 (Ariskin et al., 2023; Пшеницын и др., 2022). Установлено, что при пересчете $\gamma_{Os}(t)$ на возраст $t=728$ Ма изотопные составы образуют три кластера в координатах $\gamma_{Os}(t)$ - $^{187}Re/^{188}Os$: (1) наиболее радиогенные значения $\gamma_{Os}(t)$ 10.5 и 10.0 установлены для закаленного габбронорита Довырена и приконтактного габбронорита DV10; (2) плагиодунит, троктолит и сульфидные руды демонстрируют промежуточные значения $\gamma_{Os}(t)$ 7.3-8.7, (3) оливинный габбронорит, плагиоперидотит и ЭПГ-анортозит характеризуются примитивными значениями $\gamma_{Os}(t)$ в диапазоне 4.5-5.6. Наиболее радиогенные значения $\gamma_{Os}(t)$ при максимальном обогащении изотопом ^{34}S контактовых пород согласуются с гипотезой о роли метаморфогенного H_2S -содержащего флюида, образованного при термическом разложении пирита в процессе дегидратации вмещающих толщ (Арискин и др., 2021). Приводятся параметры образования подобных флюидов по данным термодинамических расчетов. Базальные породы Довырена с наименее радиогенными характеристиками Re-Os системы отвечают продуктам кристаллизации наиболее магнезиальной магмы с необычно высокими отношениями $^{87}Sr/^{86}Sr(t)$ и $\epsilon_{Nd}(t)$ около -16. Подобные соотношения рассматриваются как аргумент в пользу существования изотопно-аномального источника довыренских магм, протолитом которого явились неоархейская мантия, испытавшая частичное плавление и, возможно, контаминацию нижнекоровых пород на ранних стадиях аккреции Сибирского кратона.

Работа поддержана грантом РФФ 23-77-01036.

Литература:

- Арискин А.А., Пшеницын И.В., Дубинина Е.О. и др. (2021) Изотопный состав серы в оливинных габброноритах рудоносного апофиза Йоко-Довыренского интрузива в Северном Прибайкалье. Петрология 29: 569-587.
- Пшеницын И.В., Арискин А.А., Николаев Г.С. и др. (2022) Геохимия и петрология протосульфидных расплавов в рудоносном апофизе Йоко-Довыренского интрузива. Геохимия 67: 205-226.
- Ariskin A., Danyushevsky L., Nikolaev G. et al. (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-Ni-PGE fertility. Lithos 302-303: 242-262.
- Ariskin A., Tessalina S., Kostitsyn Yu. et al. (2023) Re-Os systematics in the layered rocks and Cu-Ni-PGE sulfide ores from the Dovyren Intrusive Complex in Southern Siberia, Russia: Implications for the original mantle source and the effects of two-stage crustal contamination. Minerals 13 (in press).

Хрупко-пластические переходы в корневых частях коллизионных орогенов

Бабарина И.И.

ИГЕМ РАН, Москва, fisana@yandex.ru

Глубоко эродированные коллизионные системы, такие как позднепалеопротерозойский Лапландско-Кольский ороген (ЛКО), представляют интерес для изучения структурно-вещественных преобразований пород их фундамента на средне- нижнекоревых уровнях, в частности, на границе хрупко-пластического перехода. Глубина хрупко-пластического перехода зависит от величины теплового потока, связанного с геодинамическим режимом, и от реологических свойств среды (Condie, 2005). Реология фундамента коллизионных орогенов в том числе определяется их типом. По типу коллизионные орогены делятся на горячие и холодные (Fossen et al., 2017). Ко вторым, как и Каледониды Норвегии, относится ЛКО.

Проведены исследования структурной эволюции в разных доменах Беломорской провинции (БП), представляющую собой переработанную в палеопротерозое краевую часть Карельского кратона, который на ранних стадиях формирования ЛКО пододвигался под Мурманский микроконтинент. БП служила фундаментом ЛКО, частично эксгумированным в результате дальнейшего развития коллизии. Выявлено два типа хрупко-пластических переходов.

1. Верхний хрупко-пластический переход. Этот тип зафиксирован при изучении структурно-вещественных преобразований комплексов пород в ходе меняющихся РТ-условий, обусловленных эксгумацией фрагментов коры.

В пределах ряда участков БП при регрессивном метаморфизме от гранулитовой до амфиболитовой фации выявлена следующая стадийность деформаций, связанных с позднепалеопротерозойской коллизией: (1) горизонтальное пластическое течение с формированием глубинных покровов, (2) хрупко-пластические деформации с образованием наклонных складок, (3) преимущественно хрупкие деформации, вертикальные складчато-блоковые дислокации.

Стадия хрупко-пластических деформаций отвечает изменениям на границе хрупко-пластического перехода.

2. Нижний хрупко-пластический переход. Этот тип хрупко-пластического перехода фиксируется на стадии, когда холодная жесткая кора пододвигающейся континентальной плиты разогревается и меняет свои реологические свойства. Нами установлена пологая тектоническая граница двух доменов БП с разной степенью позднепалеопротерозойской структурно-вещественной переработки.

Нижний домен (Гридинский) характеризуется хорошей сохранностью архейской структуры, которая пересекается несколькими рядами даек раннепалеопротерозойских базитов. Несмотря на метаморфические изменения (1.9 млрд лет) до эклогитовой фации метаморфизма, дайки сохранили интрузивные контакты с вмещающими ТТГ гнейсами и другими породами архейской рамы. Следовательно, этот фрагмент коры имел свойства жесткого тела, его преобразования на прогрессивной стадии метаморфизма осуществлялись в статичных условиях, а на регрессивной – он подвергался незначительным хрупко-пластическим и хрупким деформациям.

Верхний домен (Кирбейский) характеризуется тем же составом пород, но при этом полной совместной переработкой в ходе пластических деформаций как архейской рамы, так и эклогитизированных раннепалеопротерозойских базитов. Метабазиты слагают будины, а породы рамы мигматизированы и подверглись минеральной перекристаллизации со стиранием следов архейской структуры. В процессе дальнейших регрессивных преобразований Кирбейский домен испытал хрупко-пластические и хрупкие деформации.

Домены разделяет пологая зона милонитизации мощностью до 1 км, которая и представляет собой границу хрупко-пластического перехода между фрагментами коры разной реологии.

Работа выполнена в рамках темы НИР ИГЕМ РАН № 121041500220-0.

Condie K.C. (2005) Earth as an Evolving Planetary System, London. 447 p.

Fossen H., Cavalcante G.C., De Almeida R.P. (2017) Hot Versus Cold Orogenic Behavior: Comparing the Araçuaí-West Congo and the Caledonian Orogens. Tectonics 36. Issue 10: 2159–2178.

Пироксены высокого давления

Бобров А.В.^{1,2}

¹ Геологический факультет МГУ, Москва; ² ИЭМ РАН, Черноголовка archi@geol.msu.ru

Пироксены широко представлены в виде включений в природных алмазах, а также в фазовых ассоциациях продуктов экспериментов, проводимых при мантийных *PT*-параметрах. При этом характерно четкое разделение верхнемантийных пироксенов на минералы перидотитовой и эклогитовой ассоциаций.

Клинопироксены *перидотитовой ассоциации* отличаются повышенным содержанием СаО, субкальциевые занимают подчиненное положение. Они относятся к диопсидам с переменными содержаниями клиноэнстатитового ($\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Mg})$ от 44 до 50%), жадеитового и юриитового $\text{NaCrSi}_2\text{O}_6$ (до 15 мол.%) компонентов (в сумме до 60 мол.%) и молекулы Чермака $(\text{Ca},\text{Mg})\text{Al}_2\text{SiO}_6$ (Буланова и др., 1993). Ортопироксены относятся к энстатитам и имеют обычно низкие суммарные примеси трехвалентных катионов – алюминия и хрома (их суммарное содержание обычно не превышает 1 мас.%). В энстатите присутствует примесь диопсидового компонента ($\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Mg})$ от 0,4 до 2,0%), а также Na_2O (до 0,4 мас.%).

Пироксены, включенные в алмазы *эклогитового парагенезиса*, представлены омфацитом. Известно, что эти минералы в целом характеризуются повышенным содержанием натрия, резким преобладанием Al^{VI} над Al^{IV} и железистостью в пределах 10–32%. Наряду с диопсидовой и геденбергитовой составляющими, их составы описываются вариациями содержаний жадеитового $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ (до 45–50 мол.%) и молекулы Чермака (обычно не выше 20 мол.%) компонентов. Согласно результатам экспериментов (Bobrov et al., 2008), существенно жадеитовый пироксен оказывается стабильным при давлении 21,5 ГПа. В клинопироксенах, находящихся в ассоциации с алмазом, нередко фиксируется примесь молекулы Эскола ($\text{Ca}_{0,5}\text{AlSi}_2\text{O}_6$) или избыток кремнезема. Важной особенностью части пироксенов эклогитового парагенезиса из включений в алмазе является наличие примеси K_2O , достигающей 1,5 мас.%. Калий входит в состав пироксена в виде компонента KAlSi_2O_6 , который является признаком высоких давлений и кристаллизации из расплавов повышенной щелочности (Сафонов и др., 2004).

К числу примесей в пироксенах высоких давлений относятся также компоненты $\text{NaMg}_{0,5}\text{Si}_{2,5}\text{O}_6$ (Дымшиц и др., 2010) и $\text{Na}(\text{Mg}_{0,5}\text{Ti}_{0,5})\text{Si}_2\text{O}_6$ (Sirotkina et al., 2016), которые были получены в ходе экспериментального изучения модельных систем при 13–16,5 ГПа и 1500–1900°C, 7 ГПа и 1700°C, соответственно. Наряду с высокими температурами и давлениями, образование таких компонентов требует условия крайне высокой щелочности, поэтому в природе пироксены, богатые этими миналами, пока не встречены.

Поддержка: РФФ (грант № 21-17-00147).

Буланова Г. П., Барашков Ю. П., Тальникова С. Б., Смелова Г. Б. (1993) Природный алмаз – генетические аспекты. Новосибирск: Наука. 168 с.

Дымшиц А.М., Бобров А.В., Литасов К.Д., Шацкий А.Ф., Отани Э., Литвин Ю.А. (2010) Экспериментальное изучение фазового перехода пироксен–гранат в системе $\text{Na}_2\text{MgSi}_5\text{O}_{12}$ при давлениях 13–20 ГПа. Доклады Академии Наук 334(3): 378–381.

Сафонов О.Г., Литвин Ю.А., Перчук Л.Л. (2004) Синтез омфацитов и особенности изоморфизма в клинопироксенах системы. Петрология 12(1): С. 84–97.

Bobrov A. V., Kojitani H., Akaogi M., Litvin Yu. A. (2008) Phase relations on the diopside-hedenbergite-jadeite join up to 24 GPa and stability of Na-bearing majoritic garnet. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 72: 2392–2408.

Sirotkina E. A., Bobrov A. V., Spivak A. V., Bindi L., Pushcharovsky D. Yu. (2016) X-ray single-crystal and Raman study of $(\text{Na}_{0,86}\text{Mg}_{0,14})(\text{Mg}_{0,57}\text{Ti}_{0,43})\text{Si}_2\text{O}_6$, a new pyroxene synthesized at 7 GPa and 1700°C. *Physics and Chemistry of Minerals* 43: 731–738.

Экспериментальное изучение индикаторных реакций модального мантийного метасоматоза.

Бутвина В.Г., Лиманов Е.В., Воробей С.С., Якушик М.А., Голунова М.А., Сафонов О.Г., Ван К.В.

ИЭМ РАН, Черногловка butvina@iem.ac.ru

Работа направлена на экспериментальное изучение некоторых специфических реакций минералов перидотитов и их ассоциаций, характерных для верхней мантии, с водными и водно-углекислыми флюидами, содержащими соли К в различных концентрациях и соотношениях. Обзор природных данных по реакциям (Сафонов, Бутвина, 2016), служащим потенциальными индикаторами активностей К в верхнемантийных флюидах, показывает, что подобно температуре, давлению, активностям воды и углекислоты, летучести кислорода, активность К во флюидах является важнейшим интенсивным параметром эволюции мантийных минеральных систем. Их нельзя недоучитывать при изучении процессов мантийного метасоматоза, который является ведущим процессом, предшествующим генерации широкого спектра магм (кимберлиты, лампроиты, щелочные базальты и т.д.). Эти реакции и соответствующие им преобразования минеральных ассоциаций, могут быть спрогнозированы на основе модельных термодинамических расчетов (Сафонов, Бутвина, 2016), которые позволяют, однако, определять только относительные вариации активности К. При наличии же экспериментальных данных по зависимости таких реакций от активности К во флюидах различного анионного состава, эти расчеты способны предсказывать состав флюидов, метасоматизирующих породы верхней мантии. Разнообразие реакций модального мантийного метасоматоза (Сафонов, Бутвина, 2016) создает перспективное направление в экспериментальной петрологии мантии. Разнообразие реакций модального мантийного метасоматоза (Сафонов, Бутвина, 2016) создает перспективное направление в экспериментальной петрологии мантии. К сожалению, экспериментальные данные по реакциям минералов перидотитов с флюидами, содержащими щелочно-солевые компоненты, ограничены (Edgar, Arima, 1984; Сокол и др., 2015). Экспериментальные данные по стабильности К-Ва-титанатов ограничены несколькими работами (Foley et al., 1994; Konzett et al., 2005).

Эксперименты были проведены на аппаратах высокого давления «цилиндр-поршень», «наковальня с лункой» НЛ-13Т и НЛ-40 в ИЭМ РАН им. Д.С. Коржинского.

В результате детального экспериментального исследования были изучены реакции, контролируемые активностью К (+Na, Ва) во флюидах, взаимодействующих с перидотитами верхней мантии. Экспериментально воспроизведены следующие реакции мантийного метасоматоза с участием флюидов $H_2O-(CO_2)-KCl(NaCl)$ $H_2O-(CO_2)-K_2CO_3(BaCO_3)$: 1) реакции флогопитизации гранатовых перидотитов $Orx + Grt (+Ol) = Phl$ при 3.5 и 5 ГПа; 2) реакции образования калиевого рихтерита при 3.5 ГПа; 3) реакции образования хромсодержащих калиевых(+бариевых) титанатов - минералов кричтонитовой, магнетоплюмбитовой и голландитовой групп при 1.8-5 ГПа.

В результате поставленных экспериментов определены условия образования некоторых индикаторных минералов мантийного метасоматоза (флогопита, К рихтерита и минералов кричтонитовой, магнетоплюмбитовой и голландитовой групп), определены некоторые кристаллографические параметры индикаторных минералов, выявлены зависимости изменения состава образующихся минералов от концентраций щелочных (солевых) компонентов во флюидах, что приложимо к описанию процесса мантийного метасоматоза.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-27-00065, <https://rscf.ru/project/23-27-00065>.

Литература:

- Сафонов О.Г., Бутвина В.Г. (2016) Реакции – индикаторы активности К и Na в верхней мантии: природные и экспериментальные данные, термодинамическое моделирование. // Геохимия 10: 893-908. URL: https://www.researchgate.net/publication/308833645_Reakcii_-_indikatory_aktivnosti_K_i_Na_v_verhnej_mantii_prirodnye_i_eksperimentalnye_dannye_t_ermodinamicheskoe_modelirovanie
- Сокол А.Г., Крук А.Н., Чеботарев Д.А., Пальянов Ю.Н., Соболев Н.В. (2015) Условия образования флогопита при взаимодействии карбонатитовых расплавов с перидотитами субкратонной литосферы. Докл. РАН, 462(6): 696-700.
- Foley S., Hofer H., Brey G. (1994) High-pressure synthesis of priderite and members of lindsleyite-mathiasite and hawthorneite-yimengite series. Contrib. Mineral. Petrol. 117: 164- 174.
- Konzett J., Yang H., Frost D.J. (2005) Phase relations and stability of magnetoplumbite- and crichtoniteseries phases under upper-mantle P-T conditions: an experimental study to 15GPa with implications for LILE metasomatism in the lithospheric mantle. J. Petrol.46 (4): 749- 781.

Состав и свойства флюидов при метасоматических преобразованиях метаморфических пород в Р-Т условиях средней коры (амфиболитовая фация)

Бушмин С.А., Иванов М.В., Кольцов А.Б., Лебедева Ю.М., Савва Е.В.

ИГГД РАН, Санкт-Петербург, s.a.bushmin@ipgg.ru

На примере тектонического покрова Большие Кейвы (Беломорско-Лапландский коллизионный ороген Фенноскандинавского щита) исследованы свойства флюидов (фазовое и редокс-состояние, химический состав, активности компонентов) при изменении Р-Т параметров метаморфических и метасоматических преобразований пород вдоль регрессивного тренда на уровне амфиболитовой фации.

Покров Большие Кейвы сложен пакетами тектонических пластин. В строении тектонических пластин присутствуют углеродсодержащие метаморфические сланцы и множество зон с метасоматически измененными сланцами (бластомилонитами), многочисленными жильными и прожилковыми массивными метасоматическими породами контрастного состава, а также с кварцевые жилами, сопровождаемыми околожильными метасоматитами. Метасоматические породы и кварцевые жилы могут содержать очень большое количество графитового вещества (черные «углистые» породы), или вообще не содержать графита. Такое разнообразие минерального состава пород открыло возможности для исследования свойств как окисленных, так и восстановленных флюидов и выяснения причин смены одного состояния флюидной системы другим.

Р-Т параметры и активность воды при образовании пород определялись методом мультиравновесной термобарометрии. Химический состав фаз и содержание солей (NaCl и CaCl₂) природных водно-солевых флюидов, содержащих CO₂, CH₄, C_nH_m, H₂ определен во флюидных микровключениях методами микротермометрии и КР-спектроскопии.

Полученные данные сопоставлялись со свойствами модельных флюидов в четверной системе H₂O-NaCl-CaCl₂-CO₂ (Иванов, 2023). Ассоциации водной и газовой фаз флюидных включений и такие параметры, как активность воды (расчетная и модельная), величины общей солёности флюида в метаморфических сланцах (от 5.4 до 26.6 мас.%) и метасоматитах (от 31.1 до 61.3 мас%), соотношения во флюиде метасоматитов массовых долей NaCl (от 14.2 до 45.1%), CaCl₂ (от 14.1 до 25.2%) и мольных долей NaCl и CaCl₂ в общей солёности, позволяли предполагать гомогенное или гетерогенное состояние флюидной системы. В результате оказалось возможным определить вероятный состав многокомпонентного природного флюида, который был использован для моделирования фазовых соотношений и путей эволюции в системе C-O-H.

Полученные результаты показывают, что в метаморфических и метасоматических процессах формирования пород по мере понижения Т и Р участвовали разные флюиды, отличавшиеся по солёности, газовому составу и редокс-состоянию. Это обусловило, в частности, контрастное поведение углерода – смену его отложения растворением и выносом из пород. Анализ полученных результатов обнаружил общие закономерные связи между эволюцией свойств флюидов и особенностями метаморфического и метасоматического петрогенезиса на уровне средней коры.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00270, <https://rscf.ru/project/22-27-00270/>.

Литература

Иванов М.В. (2023) Термодинамическая модель флюидной системы H₂O-CO₂-NaCl-CaCl₂ при Р-Т параметрах средней и нижней коры. Петрология. Т. 31. № 4. С. 408-418.

Метаморфические минеральные реакции и парагенезисы в породах Мейерской тектонической зоны (юго-восток Фенноскандинавского щита, Россия)

Вивдич Э.С.^{1,2}, Балтыбаев Ш.К.^{1,2}, Юрченко А.В.¹

¹ИГД РАН, Санкт Петербург, emily.vivdich@yandex.ru; ²СПбГУ ИНЗ, Санкт Петербург, shauket@mail.ru

В Мейерской тектонической зоне Северного Приладожья минеральные реакции в метаморфических породах позволяют восстановить РТ-тренд развития этой надвиговой структуры. Находка реликтового ставролита, плагиоклаза, биотита в порфиробласте граната дает возможность выявить РТ-параметры на прогрессивной ветви метаморфизма: $T = 500\text{--}600^\circ\text{C}$, $P \sim 5$ кбар. Пиковые условия метаморфизма в тектонической зоне оцениваются $T > 700^\circ\text{C}$ и $P > 7$ кбар. Метаморфические преобразования на регрессивной стадии начинаются с декомпрессии при высоких температурах. Дальнейшее понижение РТ-параметров метаморфизма приводит к развитию водосодержащих минералов в результате увеличения роли водного флюида в надвиговой зоне (Балтыбаев и др., 2022). РТ-тренд метаморфической эволюции пород тектонической зоны направлен «по часовой стрелке» и отражает стадийность минералообразования при тектонической эксгумации свекофеннского гранулитового комплекса на поздних стадиях свекофеннского орогенеза.

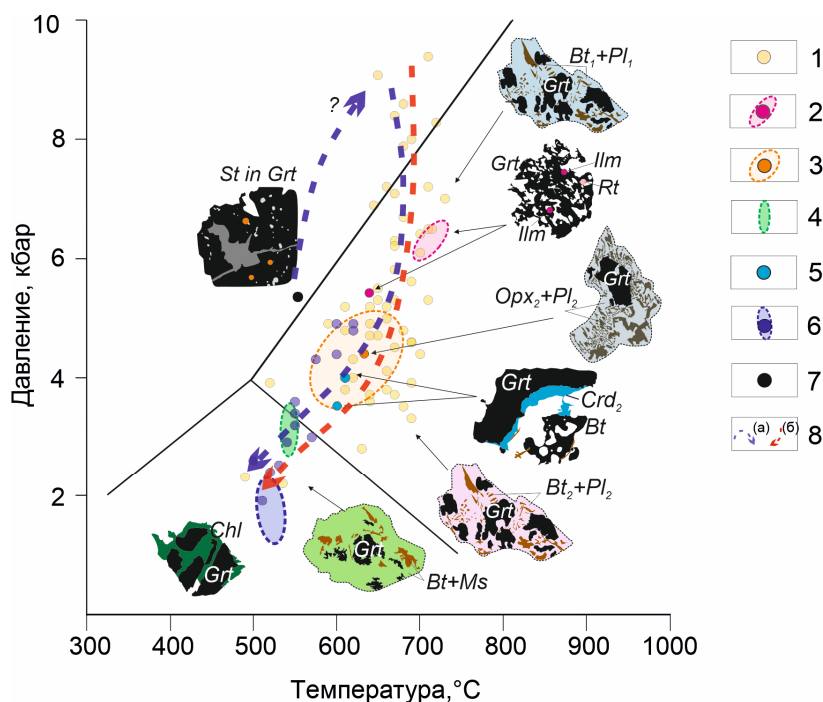


Рис. 1. РТ-тренд развития метаморфических преобразований пород Мейерской тектонической зоны. 1–7: области и точки РТ-оценок, полученные методами геотермобарометрии, для ассоциаций: 1 – $\text{Grt}+\text{Bt}+\text{Pl}+\text{Qz}$; 2 – $\text{Grt}+\text{Bt}+\text{Ilm}+\text{Rt}+\text{Pl}+\text{Qz}$; 3 – $\text{Grt}+\text{Opx}+\text{Pl}+\text{Qz}$; 4 – $\text{Grt}+\text{Hbl}+\text{Pl}+\text{Qz}$; 5 – $\text{Grt}+\text{Crd}+\text{Bt}+\text{Pl}+\text{Qz}$; 6 – $\text{Grt}+\text{Bt}+\text{Ms} \pm \text{And}+\text{Pl}+\text{Qz}$; 7 – $\text{Grt}+\text{St}+\text{Bt}+\text{Pl}+\text{Qz}$; 8 – тренды изменения параметров метаморфизма для автохтона (а) и аллохтона (б). Символы минералов даны по (Whitney, Evans, 2010).

Литература:

- Балтыбаев Ш.К., Вивдич Э.С., Галанкина О.Л., Борисова Е.Б. (2022) Флюидный режим формирования гнейсов в Мейерской надвиговой зоне Северного Приладожья (юго-восток Фенноскандинавского щита). *Петрология* 30: 166–193.
- Whitney D.L., Evans B.W. (2010) Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals. *American Mineralogist* 95: 185–187.

Реологические следствия синтектонического контактового метаморфизма

Владимиров В.Г.^{1,2}, Смолякова А.Е.¹

¹ИГМ СО РАН, Новосибирск vvg@igm.nsc.ru

²Геолого-геофизический факультет НГУ, Новосибирск

Синтектонические процессы минералообразования, метаморфизма и магматизма являются характерной чертой коллизионных орогенов. В традиционном понимании их корреляция с процессами деформирования и тектоники ограничивается лишь возрастными рамками, позволяющими выстраивать тектонические и геодинамические модели. Однако многочисленные исследования (Passchier et al., 2005; Fossen, 2020 и др.) позволяют пересмотреть взаимосвязи процессов структурообразования и релаксации напряжений в литосфере, синтектонического магматизма и контактового метаморфизма. Известно, что с глубиной по мере возрастания температуры в литосфере происходит изменение механизмов релаксации напряжений от хрупких к хрупко-пластичным и пластичным. Закономерно предположить, что при транспорте высокотемпературных базитовых магм в верхние уровни коры вокруг базитовых тел будут формироваться зоны «аномального» прогрева. Как следствие, изменение реологического поведения пород будет происходить не только с глубиной, но и в направлении к магматическим телам преимущественно основного состава. Данные корреляции были рассмотрены на примере Баянкольского габброидного массива (Эрзинская сдвиговая зона, Западно-Сангиленский фрагмент коллизионного орогена на северо-западной окраине ТММ, ЦАСП). В метаморфическом обрамлении Баянкольского массива ранее был зафиксирован интенсивный тепловой прогрев со стороны габброидов (Селятицкий и др., 2021). Проведенные нами исследования показали, что становление массива и контактовый метаморфизм происходили одновременно с релаксацией напряжений и деформациями пород. Юго-западное направление в современных координатах было предпочтительным для растяжения, транспорта магматических расплавов и теплопереноса при контактовом метаморфизме. Помимо теплового воздействия, по мере удаления от габброидного массива отмечается закономерная смена механизмов релаксации напряжений. В непосредственном контакте с основными расплавами вмещающие метаморфические породы претерпели частичное плавление (зона I – плавления). Релаксация напряжений в зоне I происходила преимущественно за счет частичного плавления (диатексиса), избирательного протекания метаморфических реакций и рекристаллизации минералов в области пониженного давления. По мере удаления от массива в северо-западном направлении в породах появляются признаки падения температур контактового метаморфизма со сменой механизмов релаксации напряжений (зона II – объемного сдвигового течения) от плавления и диатексиса к процессам пластического течения преимущественно за счет внутрикристаллических деформаций. При дальнейшем удалении от габброидов признаки объемного течения практически исчезают, шаг между плоскостями скалывания и новообразованной сланцеватости возрастает. Как следствие структуры растяжения становятся отчетливыми, появляются сопряженные трещины скалывания, доля внутрикристаллических деформаций снижается, либо они носят реликтовый характер. Данная зона III отвечает доминированию хрупко-пластичных деформаций и хрупких деформаций, где процессы контактового метаморфизма контролируются исключительно локальными зонами скалывания/растяжения. Границы переходов между этими зонами по своим формам напрямую не коррелируются с изоградами контактового метаморфизма

Исследование выполнено по государственному заданию ИГМ СО РАН (№ 122041400176-0).

Литература:

- Селятицкий А.Ю., Полянский О.П., Шелепаев Р.А. (2021) Глубинный метаморфический ореол Баянкольского габбро-монцодиоритового массива - индикатор нижнекоровых базитовых камер (Западный Сангилен, Юго-Восточная Тува). *Геология и геофизика* 62: С.1204–1226.
- Fossen, H. (2020) *Structural Geology* (2nd ed.). Cambridge University Press, Cambridge. 532p.
- Passchier C.W., Rudolph A.J. Trouw (2005) *Microtectonics*. Springer Science & Business Media, Berlin. 366 p.

Распределение элементов-примесей между минералами и силикатным расплавом: некоторые итоги более 50 лет экспериментального изучения

Гирнис А.В.

ИГЕМ РАН, Москва girnis@igem.ru

Представлена база данных MELT-2023 по результатам экспериментального изучения магматических систем и процессов. База данных включает составы расплавов (силикатных, солевых, металлических и др.) и сосуществующих минералов, опубликованные с конца 1960-х и до 2023 г. Всего собраны результаты более 45000 экспериментов в широком интервале давлений, температур, флюидного режима и составов. Большая часть анализов получена на электронном микроанализаторе, для редких элементов в последние годы наиболее популярным является метод LA ICP MS. В базе данных имеются данные для почти 200 фаз, включая главные минералы магматических пород, акцессории и синтетические фазы, не имеющие пока природных аналогов.

В качестве примера использования массива данных проведена параметризация результатов изучения распределения редких элементов между расплавом и оливином, ортопироксеном, клинопироксеном и плагиоклазом. Для каждого из этих минералов имеются тысячи экспериментов, характеризующих зависимость коэффициентов распределения (D = содержание в минерале/содержание в расплаве) от условий и макрокомпонентного состава фаз. Общий подход к обработке этой информации основан на следующих наблюдениях. (1) Для многих элементов значения D варьируют на несколько порядков. (2) Наблюдаемые вариации связаны как с реальной зависимостью D от условий, так и с систематическими методическими и аналитическими ошибками. (3) Отношения значений D для многих пар элементов практически постоянны и значительно менее чувствительны к систематическим экспериментальным и аналитическим ошибкам по сравнению со значениями D . Обработка массива экспериментальных данных включала отбраковку «неудачных» экспериментов и учет постоянства отношений D . Зависимости D от экспериментальных параметров были получены минимизацией отклонения модельных параметров от экспериментальных одновременно для всех элементов и выбранных отношений D .

Полученные уравнения для оливина, пироксенов и полевых шпатов были использованы для расчета относительных содержаний редких элементов в расплавах базальтов срединно-океанических хребтов. Полученные оценки сопоставлены с составами природных расплавов, зафиксированными в виде стекол расплавных включений и пород (Наумов и др., 2022). На основании этого сопоставления оценены редкоэлементные параметры источников магм и показано, что разнообразие природных составов требует участия различных геохимических резервуаров – от ультрадеплетированных до практически эквивалентных примитивной мантии.

Литература:

Наумов В.Б., Дорофеева В.А., Гирнис А.В., Коваленкер В.А. (2022) Летучие, редкие и рудные элементы в магматических расплавах и природных флюидах по данным изучения включений в минералах. I. Средние концентрации 45 элементов в главных геодинамических обстановках Земли. *Геохимия* **67** (4), 318–338.

Метаморфизованные плагиогранитные жилы в эклогитах Салмы, Беломорская эклогитовая провинция

Докукина К.А.¹, Шешуков В.С.¹, Конилов А.Н.¹, Ван К.В.²

¹ГИН РАН, Москва dokukina@mail.ru; ²ИЭМ РАН, Черногловка

Протолиты эклогитов ассоциации Салма мезо-неоархейской Беломорской эклогитовой провинции имеют состав N-MORB-типа и содержат жилы плагиогранитного состава. Жилы состоят из метаморфических минералов - граната, кварца и кианита, а также самых ранних включений высокого давления фенгита и цоизита в гранате. Плагиограниты имеют геохимические характеристики, типичные для островодужных гранитов, и по составу сопоставимы с тоналит-трондjemит-гранодиоритовыми (ТТГ) гнейсами, вмещающими эклогиты; современными адакитами и архейской андезитовой ассоциацией Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса. Происхождение этих плагиогранитов можно представить как продукт плавления водно-модифицированной океанической плиты в РТ-условиях эклогитового метаморфизма.

Расчеты условий метаморфизма в плагиогранитных жилах, для эклогитовых минеральных ассоциаций пиропового граната, кианита, высококремнистого фенгита и кварца дали высокие давления (около 16-22 кбар) при относительно низких температурах (около 600-650 °С); формирование плагиоклаз-биотитовых корон между кварцем, кианитом и гранатом происходило при 14-11 кбар при 650-700 оС. Эта оценка соответствует «теплой» субдукции, и наиболее сопоставима с параметрам современной субдукции подошвы плиты Каскадия. Моделирование показывает, что эклогиты, вмещающие плагиогранитные жилы, не достигали условий частичного плавления в рассчитанных РТ условиях (15-11 кбар при 750-700 °С). Вероятным объяснением высокobarических парагенезисов в плагиогранитных жилах может быть плавление океанического слэба в условиях более высоких температуры и давления, чем установленные в данной работе. Таким образом, высокobarический парагенезис граната, фенгита, цоизита и кианита может отражать путь эксгумации пород через эклогитовые условия.

Циркон из плагиогранитных жил дал архейские и палеопротерозойские возрасты: ~ 2.87, 2.78, ~2.70 и ~1.9 млрд лет. Самый древний возраст дал гидротермально-измененный океанический циркон с возрастом ~2.9 млрд лет из Fe-Ti эклогитов. Древнейшие магматические цирконы в плагиогранитных жилах представлены популяцией с возрастом ~2.87 млрд лет и соответствуют магматическому возрасту некоторых ТТГ-гнейсов, что не противоречит гипотезе образования плагиогранитов при плавлении основной плиты в зоне субдукции. Неоархейская популяция цирконов ~2.78 млрд лет часто присутствует в эклогитизированных основных породах и окутывающих ТТГ-гнейсах, что может быть связано как с образованием протолитов ТТГ-гнейсов в зоне субдукции, так и с перекристаллизацией более древних цирконов в результате флюидного или термического воздействия. ϵ_{Hf} старшей популяции циркона ~2.87 млрд лет составляет от +3 до +4, что указывает на их ювенильное происхождение; популяция ~2.78 млрд лет имеет схожий изотопный состав Hf, что позволяет предположить, что их возраст отражает потерю Pb древним цирконом (Mints et al., 2010). Sm-Nd модельные T^{DM} -возрасты жил Grt-Ky имеют мезо-неоархейские значения (2.8-2.75 млрд лет) с положительными $\epsilon_{\text{Nd}} = 1.8-3.8$, что может указывать на ювенильную природу источников плагиогранитного расплава. Эклогитизированные породы Беломорской провинции подверглись позднему метаморфизму гранулитовой фации ~2.74–2.64 млрд лет назад, что совпадает с возрастом гранулитового метаморфизма регионального и глобального ранга. Палеопротерозойская эволюция эклогитов Салмы и Восточно-Европейского кратона в целом: в 2.5-2.4 млрд лет и 2.0-1.9 млрд лет назад с образованием внутриконтинентальных и аккреционных орогенов завершилась в палеопротерозойское время ~1.87-1.7 млрд лет. Эти значения возраста фиксируются Pb-Pb и Sm-Nd изотопными системами породообразующих метаморфических минералов плагиогранитных жил.

Mints, M.V., Belousova, E.A., Konilov, A.N. et al. (2010). Mesoarchean subduction processes: 2.87 Ga eclogites from the Kola Peninsula Russia. Geology 38: 739–742.

Термореологическая модель каменно-ледяной мантии Титана

Дунаева А.Н.¹, Кронрод В.А.¹, Кусков О.Л.¹

¹ГЕОХИ РАН, Москва dunaeva.an@gmail.com

Современные представления о крупнейшем ледяном спутнике Сатурна Титане в значительной степени основаны на результатах многолетних астрономических исследований системы Сатурна автоматической межпланетной станцией «Кассини-Гюйгенс» (2004-2017 гг.). Полученная информация (данные о размерах, массе, моменте инерции, гравитационном поле) является основой для построения моделей внутреннего строения спутника. В частности, в числе обсуждаемых моделей Титана предложена модель частичной дифференциации вещества (Kronrod et al., 2020), согласно которой в спутнике выделяются следующие основные зоны (структурные слои): 1) внешняя водно-ледяная оболочка (ВЛО), включающая ледяную (Ih) кору, водный океан и нижележащие высокобарные льды H₂O; 2) протяженная каменно-ледяная мантия, представляющая собой гомогенную смесь льда и камня, и 3) внутреннее железосиликатное ядро CI или L/LL хондритового состава. При этом основным условием устойчивости каменно-ледяной мантии и льдов высокого давления является предотвращение плавления льдов под воздействием радиогенного тепла от радиоактивных источников, рассеянных в железосиликатном веществе спутника. Соблюдение этого условия осуществляется за счет эффективного отвода тепла из мантии в вышележащие слои ВЛО и регулируется реологическими свойствами среды, в первую очередь вязкостью каменно-ледяной смеси.

Вязкость мантии прямо зависит от вязкости и соотношения слагающих ее компонентов: льда и скальной породы. Кроме того, в составе каменной компоненты Титана может присутствовать значительное (до 23 мас. %) количество тугоплавкого (керогеноподобного) органического вещества (Néri et al., 2020), которое в силу низких значений плотности и вязкости способно изменять как внутреннюю структуру, так и реологию спутника.

В данной работе рассматривается реологическая модель каменно-ледяной мантии Титана при тепловых потоках, создаваемых радиогенным разогревом и приливной диссипацией в недрах спутника. Мантия моделируется жидкостью постоянной вязкости, плотность которой возрастает с глубиной в соответствии с ростом гидростатического давления. Вязкость мантии рассчитывается на основе вязкости индивидуальных компонентов (лед, железосиликаты, органическое вещество) (Choblet et al., 2017; Zhang et al., 2017; Zhang et al., 2020). Реологическая модель построена в предположении общемантийной тепловой конвекции, интенсивность которой оценивается числом Рэлея (Ra). Предполагается, что эффективная тепловая конвекция, позволяющая мантии сохранять свое квазистационарное состояние, характеризуются значением числа Рэлея $Ra \geq 10^6$.

Результаты проведенных расчетов показывают, что приемлемые конвекционные модели, обеспечивающие устойчивость мантийных льдов Титана, достигаются при следующих параметрах мантии:

- Для CI состава каменной компоненты: при мощности мантии не более 200 км, при высоком содержании ОВ в каменном веществе (12-14 %) и при низкой объемной доле скальной породы в мантии (менее 0.1 – 0.15).
- Для L/LL состава каменной компоненты: мощность мантии 400-1600 км, содержание ОВ в каменном веществе 0-26 %, высокая доля каменной компоненты в мантии (более 0.5).

Литература:

- 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*, Vol. 54, No. 5, pp. 405–419.
- Néri A., Guyot F., Reynard B., Sotin C. (2020) A carbonaceous chondrite and cometary origin for icy moons of Jupiter and Saturn. *Earth and Planetary Science Letters*, 530, 115920.
- Choblet G., Tobie G., Sotin C. et al. (2017) Heat transport in the high-pressure ice mantle of large icy moons. *Icarus*, 285, 252-262.
- Zhang L., Li X., Ren T. (2020). A theoretical and experimental study of stress–strain, creep and failure mechanisms of intact coal. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53(12), 5641-5658.
- Zhang N., Dygert N., Liang Y., Parmentier E.M. (2017) The effect of ilmenite viscosity on the dynamics and evolution of an overturned lunar cumulate mantle, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 6543–6552.

Фазовые превращения в гранатах в условиях переходной зоны Земли: приложение к вопросам глубинной геодинамики

Дымшиц А.М., Дорогокупец П.И.

ИЗК СО РАН, Иркутск adymshits@crust.irk.ru

Мантийная конвекция является доминирующим процессом, вызывающим подъем горячего материала к поверхности и субдукцию холодных плит на большие глубины. Эти процессы зависят от плотности вещества и в переходной зоне мантии/нижней мантии находятся под контролем пост-шпинелевых и пост-гранатовых переходов. Знание о положении этих фазовых превращений используется для оценки динамики блоков мантии и очень важно для понимания глубинного строения Земли.

В данном исследовании приводится расчет уравнения состояния Кунка-Эйнштейна для пиропы $\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ (Prp), рассчитанное на основе совместного анализа экспериментально измеренных изобарной теплоемкости, модулей сжатия, теплового расширения, а также давления (P)—объема элементарной ячейки (V)—температуры (T). Полученное уравнение состояния для Prp и предварительно рассчитанное уравнение состояния для Al-содержащего акимотоита в сочетании с литературными данными по бриджманиту и корунду, позволили рассчитать фазовую диаграмму в системе 75 мол. % MgSiO_3 + 25 мол. % Al_2O_3 вплоть до условий нижней мантии. Превращение Prp в бриджманит + корунд было рассчитано при давлениях 22–24 ГПа и имеет слегка положительный наклон Клапейрона ($dP/dT = 2,1$ МПа/К). При $T=1250\text{--}1570$ К и $P=23\text{--}27$ ГПа обнаружено поле стабильности Al-акимотоита. При P выше 24–27 ГПа Al-акимотоит трансформируется в бриджманит+корундовую ассоциацию с резко отрицательным наклоном Клапейрона. Полученные результаты свидетельствуют о том, что поле устойчивости бриджманита с алюминием на 2-3 ГПа глубже, чем у конечного члена MgSiO_3 или бриджманита, который образуется из пиролитового, гарцбургитового или состава, соответствующего MORB и может быть стабилен уже в условиях переходной зоны Земли, особенно в условиях холодных субдуцирующих плит.

Сочетание пост-гранатового, пост-шпинелевого и пост-акимотоитового переходов вблизи глубин 660–720 км может тормозить как восходящую горячую мантию, так и субдуцированные холодные плиты из-за возникающей разницы в плотности пород. Стагнация горячего материала нижней мантии в основании границы переходной зоны/нижней мантии Земли может прогревать слои гарцбургита и эклогита, которые были погружены на уровень 660 км при субдукции. Нагретый материал в основании переходной зоны/нижней мантии Земли, таким образом, может быть вовлечен в дальнейший апвеллинг.

Сверхглубокие алмазы, такие как голубые алмазы с включениями нижнемантийного материала высокого давления (Smith et al., 2018), могут быть связаны с субдуцирующими слэбами (Harte, 2010), а не с поднятием материала нижней мантии. Бриджманит-содержащие ассоциации, обнаруженные в виде включений в этих алмазах, могли образоваться в субдуцирующей плите, исходя из сценария, описанного выше. Перенос таких алмазов к поверхности может быть связан с поднятием разогретыми участками мантии на уровне переходной зоны Земли и кимберлитовым вулканизмом на верхнемантийных глубинах.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования, грант № 075-15-2019-1883

Литература:

- Harte B. (2010) Diamond formation in the deep mantle: the record of mineral inclusions and their distribution in relation to mantle dehydration zones. *Mineralogical Magazine* 74:189–215
- Smith E.M., Shirey S.B., Richardson S.H., Nestola F., Bullock E.S., Wang J., Wang W. (2018) Blue boron-bearing diamonds from Earth's lower mantle. *Nature* 560: 84–87.

Субдукция и магматизм на активной окраине по результатам численного моделирования

Еремин М.Д.¹, Перчук А.Л.^{1,2}, Захаров В.С.¹, Геря Т.В.³

¹ Геологический факультет МГУ, Москва

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

³ Швейцарский Федеральный Технологический Институт, г. Цюрих

Исследования, направленные на изучение субдукционных обстановок, пользуются заслуженной популярностью последние десятилетия. В работе демонстрируются первые результаты численного моделирования зоны субдукции активной окраины в современных условиях на примере Камчатской зоны субдукции. Исследование проводилось методом численного геодинамического моделирования с использованием программного модуля, основанного на коде I2VIS (Gerya, Yuen, 2007; Захаров В. С. и др, 2015; Perchuk et al., 2021). При моделировании решалась комплексная задача описания 2D движения вязкой несжимаемой жидкости, баланса энергии, с учетом нелинейной вязкопластической реологии и др. методом конечных разностей на разнесенной нерегулярной сетке Эйлера. Основной проблемой, возникающей при моделировании, была тенденция к субвертикальному падению погружающейся океанической плиты, тогда как по имеющимся данным (Nizkous et al., 2005; Jiang et al., 2009; Koulakov et al., 2020) в целевой области Кронотского и Авачинского заливов угол наклона сейсмофокальной зоны составляет от 35° до 51° на глубинах 40-200 км. Для решения этой проблемы был использован кинематический подход с добавлением статичной зоны в мантии, осуществляющей толкающее действие на мантийное вещество со скоростью, равной усредненной природной скорости конвергенции 8 см/год для Камчатки. Воздействуя на погружающийся слэб, эта зона после подбора оптимальных параметров обеспечивает подобие геометрии модели имеющимся природным данным. Второй проблемой, решаемой в рамках исследования, был вопрос моделирования особенностей магматизма и вулканизма при кинематических параметрах и геометрии зоны субдукции Камчатки. В численных моделях были получены проявления кремнекислого и основного магматизма, изучены эффекты вариаций параметра доли вулканизма в общем магматизме. Показано, что на текущей стадии вариации доли вулканизма в общем магматизме (10%, 30%, 100%) не позволяют надежно воссоздать природную картину и объем вулканизма региона с четко обособленными разновозрастными дугами Центральной и Восточной Камчатки.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №23-17-00066

Захаров В.С., Перчук А.Л., Завьялов С.П., Синева Т.А., Геря Т.В. (2015) Суперкомпьютерное моделирование континентальной коллизии в докембрии: эффект мощности литосферы. Вестник Московского университета. Серия 4: Геология, № 2: 3–9.

Gerya T.V., Yuen D.A. (2007) Robust characteristics method for modelling multiphase visco-elasto-plastic thermo-mechanical problems. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 163: 83–105.

Jiang G., Zhao D., Zhang G. (2009) Seismic tomography of the Pacific slab edge under Kamchatka. *Tectonophysics* 465: 190–203.

Koulakov I., Shapiro N.M., Sens-Schönfelder C., Luehr B.G., Gordeev E.I., Jakovlev A., Abkadyrov I., Chebrov D.V., Bushenkova N., Droznina S.Y., Senyukov S.L., Novgorodova A., Stupina T. (2020) Mantle and Crustal Sources of Magmatic Activity of Klyuchevskoy and Surrounding Volcanoes in Kamchatka Inferred From Earthquake Tomography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 125: [Page numbers].

Nizkous I.V., Sanina I.A., Kissling E., Gontovaya L.I. (2005) Velocity Properties of the Lithosphere in the Ocean–Continent Transition Zone in the Kamchatka Region from Seismic Tomography Data. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 42: 286–296.

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

Термодинамическая модель четверной флюидной системы $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}-\text{CaCl}_2$ при P - T параметрах средней и нижней коры

Иванов М.В.¹

¹ИГГД РАН, Санкт-Петербург, *m.v.ivanov@ipgg.ru*

На основе полученных ранее уравнений состояния тройных систем $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CaCl}_2$ (Иванов, Бушмин, 2019) и $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$ (Иванов, Бушмин, 2021) выведено основанное на выражении для избыточной свободной энергии Гиббса уравнение состояния четверной системы $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}-\text{CaCl}_2$. Построена соответствующая численная термодинамическая модель. Основная часть численных параметров модели совпадает с соответствующими параметрами тройных систем. Параметр взаимодействия $\text{NaCl}-\text{CaCl}_2$ был получен из экспериментального ликвидуса смеси солей. Аналогично термодинамическим моделям для $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CaCl}_2$ и $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$ область применимости модели: давления 1-20 кбар и температуры от 500°C до 1400°C. Модель позволяет предсказывать физико-химические свойства флюида, принимающего участие в большинстве процессов глубинного петрогенеза: фазовое состояние системы (гомогенный или многофазный флюид, наличие или отсутствие твёрдых солей), химические активности компонентов, плотности флюидных фаз и концентрации компонентов в сосуществующих фазах.

Термодинамическое поведение системы со смешанным составом соли в значительной степени отличается от поведения систем с одним солевым компонентом вследствие снятия ограничений, вытекающих из меньшего числа компонентов в тройной системе.

С помощью модели было исследовано фазовое состояние системы на сечениях $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ -соль при фиксированных отношениях молярных долей NaCl и CaCl_2 $x_r = X_{\text{NaCl}} / (X_{\text{NaCl}} + X_{\text{CaCl}_2})$. Фазовые диаграммы такого рода выглядят сходно с соответствующими диаграммами для тройных систем. С помощью этих диаграмм можно проследивать изменения в термодинамике системы $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ -соль при изменении состава соли. Наряду с особенностями, зависящими от свойств пары $\text{NaCl}-\text{CaCl}_2$ и специфическими для нашей модели, такое исследование позволяет выявить фундаментальные различия между тройными и четырёхкомпонентными системами. При заданных P и T как в тройных, так и в четырёхкомпонентных системах существуют верхние пределы активности воды в поле сосуществования двух флюидных фаз. В случае, если P - T условия позволяют существование фазы твёрдой соли, существует также нижний предел для активности воды в поле сосуществования двух флюидных фаз. Этот эффект отсутствует в четырёхкомпонентных флюидных системах с двумя солями. Активность воды в поле двухфазного флюида в четырёхкомпонентной системе со смешанным составом соли может падать до нуля.

В поле четырёхкомпонентного флюида, расслоенного на две сосуществующие флюидные фазы, линии постоянных активностей компонентов не являются коннодами, то есть линиями, на которых составы сосуществующих фаз постоянны. При движении вдоль этих линий происходит перераспределение компонентов между сосуществующими фазами. Причиной этого является различие в сродстве NaCl и CaCl_2 к CO_2 . При снижении P - T параметров флюидные фазы, образующиеся при расслоении флюида со смешанным солевым составом, приобретают различные относительные доли NaCl и CaCl_2 в их солевой части. Высокосоле́ная фаза обогащается CaCl_2 , в то время как значительная часть NaCl переходит в низкосоле́ную водно-углекислотную фазу. Многократное расслоение четырёхкомпонентного флюида может значительно изменять соотношение NaCl и CaCl_2 в образующихся флюидных фазах.

Исследование выполнено в рамках госзадания по теме НИР ИГГД РАН FMUW-2021-0002.

Литература

- Иванов М.В. Бушмин С.А. (2019) Уравнение состояния флюидной системы $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CaCl}_2$ и свойства флюидных фаз при P - T параметрах средней и нижней коры. *Петрология* 27: 431–445.
- Иванов М.В., Бушмин С.А. (2021) Термодинамическая модель флюидной системы $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$ при P - T параметрах средней и нижней коры. *Петрология* 29: 90–103.

Метаморфизм и метасоматоз в формировании апосерпентинитового нефрита Харгантинского месторождения, Западный Хамар-Дабан

Кислов Е.В.

ГИН СО РАН, Улан-Удэ evg-kislov@ya.ru

Харгантинское месторождение нефрита расположено на Хангарульском хребте в верхнем течении р. Оронгодой в 21 км севернее с. Утаты в Закаменском районе Бурятии. Оно приурочено к Харгантинскому массиву серпентинизированных дунитов, гарцбургитов, серпентинитов. Вмещающие породы карбонатные и терригенные амфиболитовой фации метаморфизма. Контакты массива тектонические, породы на контакте рассланцованы, милонитизированы, графитизированы, преобразованы в талькиты, тальк-карбонатные, тальк-хлоритовые породы, листвениты. Месторождение приурочено к северо-восточному эндоконтакту. Нефритовые жилы пластообразной формы залегают в линзовидных субпараллельных контакту телах тремолититов и гранат-диопсид-клиноцоизитовых родингитов на контакте с антигоритовыми серпентинитами.

Изученные серпентиниты содержат кальцит, магнезит и магнетит. В центральной части крупных зерен магнетита реликты хромита. В магнетите включения и выполнения трещин хлоритом, включения лейстообразных выделений серпентина, зерен андрадита с включениями хлорита. Зерна хизлевудита и орселита встречаются раздельно, в сростаниях друг с другом и магнетитом. Метасоматиты представлены тремолит-гумитовым и тремолит-кальцитовыми скарнами с идиоморфным тремолитом. Отмечаются кварц, диопсид, тальк, апатит, циркон, титанит, уранинит-торианит, хромит, иногда с Zn-Al каймой, пентландит, замещаемый вторичными минералами Fe и Ni.

Нефрит состоит из тремолита, иногда в агрегате с кальцитом. Обычны зерна хромита, цепочки зерен, как правило, раздробленные. Хромит однородный, иногда с тонкими оторочками и краями трещинок с повышенным содержанием Fe, Mn, Zn. Часто зерна хромита находятся в гнездах, жилках хлорита, образующего оторочки и выполняющего трещины в хромите. В хромите встречено включение оливина. Агрегаты хлорита иногда содержат лейсты тремолита. Гранат встречен в двух образцах из 12 - зональные неправильной до амёбовидной формы зерна гроссуляра, реже уваровита, иногда с включениями хлорита. Единичные находки мелких зерен циркона, иногда с включениями биотита, диопсида, фторапатита, эпидота, рутила и титанита, тонкие жилки барита. Из сульфидов преобладает пентландит, иногда кобальтовый, зачастую с переходом к виолариту, в сростках с пентландитом, ульманитом, сфалеритом, галенитом. Последние два, как и кобальтин, образуют собственные зерна. Встречен Co-, Ni-содержащий пирит, иногда образующий совместные зерна с пентландитом, с включениями кобальтина, обрастанием аллоклазитом. Зерна халькопирита включают кристаллы кальцита или обрастают галенитом. Отмечены таллахит, вторичные минералы Ni и Fe.

Изучен изотопный состав кислорода. $\delta^{18}\text{O}$ серпентинитов $6.4\pm 7.5\text{‰}$ указывает на глубинное происхождение кислорода, унаследованное от ультрабазитов, подвергшихся серпентинизации. Нефриты обладают более тяжелым изотопным составом: $8.0\pm 10.9\text{‰}$ $\delta^{18}\text{O}$. Это указывает на увеличение вклада корового флюида в метасоматоз. Крайне неоднородный и более тяжелый состав метасоматических пород 9.6 ± 21.5 отражает различный вклад мантийных и коровых источников.

Таким образом, нефрит демонстрирует реликтовый парагенезис ультраосновных пород – хромит, пентландит и даже оливин. Эти минералы не сохранились в серпентините, за исключением редких хромитовых ядер в магнетите. Во вмещающей толще большую роль играют доломиты. Нефритовые жилы залегают в телах кальцит-тремолитовых скарнов, наподобие аподоломитового нефрита. Очевидно, нефрит сформировался в зоне меланжа при взаимодействии блоков вмещающих пород с относительно небольшими по размеру отторженцами ультраосновных пород еще не серпентинизированных в самом начале катаклаза. Источник Mg и Cr – ультраосновные породы, Mg и Ca – доломиты, Fe, Si и Al – сланцы, гнейсы, кварциты. После своего формирования нефрит подвергся гидротермальному воздействию с отложением сульфидов и барита, регрессивному метаморфизму с развитием хлорита, граната, титанита и эпидота.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-20003, <https://rscf.ru/project/22-27-20003>.

Амфиболиты Кемлудских островов и особенности их эклогитизации

Козловский В.М.¹, Григорьева В.М.²

¹Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН, bazily.koz@gmail.com; ²Московский Государственный университет им. М.В.Ломоносова (МГУ).

Кемлудские острова расположены в Чупинском сегменте Беломорского подвижного пояса северной Карелии. В строении островов доминируют толщи архейских ортогнейсов, содержащие многочисленные линзы амфиболитов. Архейский амфиболитово-гнейсовый комплекс был однократно эклогитизирован в палеопротерозое. В исследуемом районе наблюдается зарождение эклогитизации, поэтому в породах сохранились следы проградных метаморфических преобразований от свежих амфиболитов до амфиболовых эклогитов. В данной работе сообщается о результатах восстановления Р-Т условий формирования амфиболита и породы, отвечающей начальной стадии эклогитизации.

Моделирование условий образования амфиболита проводилось методом построения псевдосечений в координатах Р-Т, моделирование эклогитизации амфиболитов - в координатах Р-Т- $\mu\text{Al}_2\text{O}_3$ - μCaO . Расчёты проводились в программе Perple_X. Эффективный состав амфиболита (SiO_2 - TiO_2 - Al_2O_3 - FeO - MgO - CaO - Na_2O - K_2O - O_2) рассчитывался на основе модалных содержаний амфибола, плагиоклаза и кварца. Расчёты проводились с насыщенным водно-солевым флюидом; концентрация NaCl задавалась дискретно: 0.00, 0.07, 0.15, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50 мол. Количество $\text{O}_2=0,26$ масс % было получено на основе расчета кристаллохимической формулы амфибола и его содержания в породе. Применяемые модели твёрдых растворов: Amph(G), feldspar, IlHm(A), Omph(GHP), Gt(HGP).

Моделирование показало, что амфиболит был сформирован при весьма невысоких, для Беломорского подвижного пояса, Р-Т параметрах: $T=490^\circ\text{C}$ и $P=2$ кбар в равновесии с водным флюидом, не содержащим NaCl. При этих Р-Т-параметрах химические потенциалы $\mu\text{Al}_2\text{O}_3=-1.749160\times10^6$ Дж/моль, $\mu\text{CaO}=-7.79821\times10^5$ Дж/моль, $\mu\text{FeO}=-3.41507\times10^5$ Дж/моль и $\mu\text{SiO}_2=-9.51503\times10^5$ Дж/моль определялись валовым составом породы. Моделирование эклогитизации амфиболитов показало, что для формирования гранат-амфибол-плагиоклазо-омфацитовой ассоциации необходимо воздействие на амфиболиты насыщенного высоко концентрированного водно-солевого флюида с концентрацией NaCl около 40-50 мол. % при $\mu\text{Al}_2\text{O}_3 = -1.735600\times10^6$ Дж/моль, $\mu\text{CaO} = -7.76500\times10^5$ Дж/моль, $\mu\text{FeO}=-3.44400\times10^5$ Дж/моль и $\mu\text{SiO}_2=-9.40400\times10^5$ Дж/моль. Повышение химических потенциалов μCaO , $\mu\text{Al}_2\text{O}_3$, μSiO_2 и снижение μFeO , вероятно, было инициировано взаимодействием амфиболита с метаморфическим флюидом. Эклогитизация амфиболитов протекала при существенно более высоких параметрах: $T= 610-630^\circ\text{C}$ и $P=12,2-13,2$ кбар, характерных для палеопротерозойского метаморфизма в этом районе.

Таким образом, анализ начальной стадии эклогитизации амфиболитов, хорошо проявленный на Кемлудских островах, показывает, что палеопротерозойский метаморфизм Беломорья, вероятно, представлял собой неизохимический компрессионный процесс, отражающий взаимодействие пород с метаморфическим флюидом при погружении амфиболитово-гнейсового комплекса на уровень нижней коры.

Исследования проводились при финансовой поддержке гранта РНФ-23-17-00066.

Архейские гранулит-чарнокит-эндербитовые комплексы Карелии. Петрология и физико-химические условия формирования

Козловский В.М.¹, Курдюков Е.Б.¹, Голунова М.А.^{2,1}

¹Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН, bazily.koz@gmail.com; ²Институт экспериментальной минералогии (ИЭМ) РАН.

Среди архейских гранулит-чарнокит-эндербитовых комплексов Карелии немалый интерес представляет комплекс Поньгома-Наволоок. Это связано с тем, что в этом комплексе высокотемпературные парагенезисы сохранились практически неизменёнными несмотря на интенсивные более поздние метаморфические процессы. В породах этого комплекса можно наблюдать несколько интрузивных фаз и фаций, а также выделить проградную ветвь метаморфических преобразований от амфиболитовой до гранулитовой фации.

Оценка условий выплавления эндербитов и кристаллизации эндербитов, чарнокитов и гранитов проводилось с помощью анализа псевдосечений (PERPLE_X_6.8.7), а также с помощью изохор, построенных на основе изучения включений CO₂.

Первой и главной интрузивной фазой комплекса Поньгома-Наволоок являлись двупироксеновые эндербиты. Совокупность геохимических характеристик указывает на то, что эндербиты кристаллизовались из тоналитовой магмы, которая могла сформироваться в результате частичного плавления амфиболитов. В результате моделирования была определена область, в которой при плавлении амфиболитов под действием NaCl-CO₂-H₂O флюида наиболее вероятно могло происходить зарождение расплавов, близких по составу к эндербитам массива Поньгома-Наволоок – P=12,8-15,8 кбар и T=1030-1080° С. Полученные весьма высокие параметры P и T указывают на то, что выплавление архейских эндербитов происходило на уровне границы коры-мантии. Кристаллизация эндербитов проходила на более высоких горизонтах коры при T=925-970°С P=8-11,2 кбар.

Во вторую дайковую интрузивную фазу эндербиты были рассеяны дайками биотит-ортопироксеновых чарнокитов и биотитовых гранитов. Граниты и чарнокиты обладают очень большим петрографическим сходством. При этом граниты и чарнокиты пространственно разобщены: не встречаются в одном обнажении и не образуют геологических пересечений. Оценки давления образования главной магматической ассоциации в этих дайках оказались весьма близки: P=5,6-6,9 кбар для чарнокитов и P=6,8-7,2 кбар для гранитов. Однако, по температуре кристаллизации чарнокиты - T=830-850°С и граниты T=745-755°С значительно отличаются. Это позволяет рассматривать чарнокиты и граниты не как разные фазы внедрения, а как дайки, относящиеся к разным температурным фациям гранитизации (чарнокитизации) эндербитов.

Гранулитовый метаморфизм основных пород отмечается только в крупных останцах метабазитов, заключенных в массиве эндербитов; во вмещающих толщах он не проявлен. В этих останцах установлен проградный тренд метаморфических преобразований от T=640-755°С, P=8,4-10 кбар до T=810-910°С, P=10,2-11,1 кбар, инициированный температурным воздействием эндербитов на амфиболиты в условиях ограниченного количества воды.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГЕМ РАН. За финансовую поддержку авторы благодарят РНФ, грант № РНФ-23-17-00066.

Эклогиты горы Куропачьей как эталон Беломорской эклогитовой провинции

Конилов А.Н.^{1,2}, Пожиленко В.И.³, Ван К.В.²

¹ГИН РАН, Москва chalta@bk.ru; ²ИЭМ РАН, Черноголовка; ³ГИ КНЦ РАН, Апатиты

В последние 20 лет на территории С-В Карелии и центральной части Мурманской области были обнаружены тела эклогитов. Их изучение в ряде проявлений позволили предположить существование Беломорской эклогитовой провинции (БЭП) архейского возраста. В строении БЭП участвуют две эклогитовые ассоциации: Салма (Мурманская область), сформированная в результате субдукции мафитовых пород океанской литосферы, и Гридино (Карелия), образованная эклогитизированными мафитовыми дайками. Петрологические признаки указывают на то, что архейская субдукция достигала значительных глубин (>60 км) и соответствовала условиям UHP-метаморфизма. Возраст протолита эклогитов Салмы, определенный по ядрам цирконов с осцилляторной зональностью, составляет ~2.9 млрд лет. Субизометричные тела симплектитовых эклогитов Салмы локализованы в ТТГ-гнейсах беломорской серии. Возраст цирконов из гнейсов 2737 ± 21 млн лет практически идентичен возрасту «гранулитовых» цирконов из эклогитов. И гнейсы, вмещающие тела эклогитов, и сами эклогиты прорываются дайками керамических пегматитов с возрастом 1886 ± 20 млн лет, который идентичен возрасту оболочек цирконов из эклогитов (Konilov et al., 2011). Находки коровых докембрийских эклогитов Беломорской провинции вызвали интерес российских и зарубежных геологов. Это породило разногласия в оценках времени пикового метаморфизма и, соответственно, старта плейт-тектонических процессов в эволюции Земли.

Основные исследования эклогитов Салмы были сосредоточены на обнажениях Узкая и Широкая Салма и карьера Куру-Ваара. В этих обнажениях тела эклогитов прорываются многочисленными дайками керамических пегматитов мощностью, достигающей десятков метров. В связи с ретроградными процессами индикаторные минералы собственно эклогитов (омфациит) чрезвычайно редки. Мы считаем, что проявления Салмы не могут быть реперными в исследовании происхождения и метаморфической эволюции БЭП. За время полевых работ 2015-2020 гг. были изучены два тела эклогитов в районе горы Куропачьей вблизи федеральной автодороги Санкт-Петербург-Мурманск у пикета 1210 км. Одно тело 200м в поперечнике обнажается на самой вершине г. Куропачьей с координатами $N67^{\circ}33'34''$, $E032^{\circ}30'03''$ на расстоянии 700-800 метров от автодороги, второе мощное тело простирается на ~400м практически сразу от трассы «Кола» до высоковольтной ЛЭП с координатами $N67^{\circ}33'57''$, $E032^{\circ}28'48''$. Оба тела эклогитов размещаются среди гнейсов беломорской серии («серых гнейсов» трондjemит-тоналит-гранодиоритового состава) архейского возраста, контакты пород хорошо обнажены. В эндоконтакте эклогиты полностью преобразованы в гранатовые и плагиоклазовые амфиболиты. Пегматиты практически отсутствуют: проявлены кварцевая жила мощностью до 10 см в первом теле на вершине горы и гранитоидное тело до 2-х метров мощности во втором случае. Для эклогитов горы Куропачьей были получены петрологические, геохимические и геохронологические данные, результаты опубликованы (Конилов и др., 2018, 2020, 2022).

Конилов А.Н., Пожиленко В.И., Ван К.В., Голованова Т.И., Пронина Н.В., Шкляр Н.Е., Понкратов К.В. (2018) Исследование эклогитов Беломорской провинции современными аналитическими методами. Аналитика 8: 364–375.

Конилов А.Н., Шешуков В.С., Пожиленко В.И., Ван К.В., Бондаренко Г.В., Голованова Т.И., Ермолаев Б.В., Дубенский А.С., Понкратов К.В., Шкляр Н.Е. (2020) Цирконология и возраст Fe- Ti эклогитов Беломорской провинции. Аналитика 10: 386-402.

Конилов А.Н., Новиков И.А., Пронина Н.В., Астафьева М.М., Ван К.В. (2022) Эндогенное органическое вещество в эклогитах Беломорской провинции. Обнаружение, диагностика, верификация генезиса. Аналитика 12: 352-359.

Konilov A.N., Shchipansky A.A., Mints M.V., Dokukina K.A., Kaulina T.V., Bayanova T.B., Natapov L.M., Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y. (2011) The Salma eclogites of the Belomorian Province, Russia: In: HP/UHP metamorphism through the subduction of Mesoarchean oceanic crust. Ultrahigh-pressure metamorphism. 25 years after the discovery of coesite and diamond. Amsterdam, Elsevier, 623-670.

Оценки валового состава луны по сейсмическим и теплофизическим моделям

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

*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского
Российской академии наук (ГЕОХИ РАН), Москва,
va_kronrod@mail.ru*

В настоящей работе обсуждается проблема согласования моделей состава Луны, полученных инверсией геохимических и сейсмических данных, с «теплофизическими моделями» состава Луны. Рассматривается сферически симметричная модель Луны, состоящей из коры, верхней мантии, нижней мантии и ядра. Верхняя мантия простирается от границы с корой до нижней мантии, расположенной на глубине 750 км, радиус ядра 350 км. Теплопроводность, пористость, концентрации долгоживущих изотопов в коре являются функциями от глубины. Для определения мощности тепловых источников и концентраций урана в мантии привлекается модель магматического океана (LMO – lunar magma ocean).

Геофизическая модель (ГМ). Концентрации основных оксидов, минеральный состав и физические свойства в каждой зоне мантии Луны определены инверсией геофизических данных (масса, момент инерции, сейсмические скорости) (Kuskov, Kronrod, 1998; Kronrod, Kuskov, 2011; Kuskov, Kronrod, 2009). Химический состав и физические свойства каждой зоны мантии определяются в результате решения в рамках системы (CFMAS).

Теплофизическая модель (ТМ). Применяется одномерная стационарная модель теплопроводности. На границе кора-мантия задается интервал значений $T_{cr-mantle} = 350\text{--}550\text{ }^{\circ}\text{C}$. На глубине 1250 км в соответствии с условиями подплавления мантийного вещества (Weber et al., 2011) поставлены ограничения на температуру: $T(1250\text{ км}) = 1570\text{--}1630\text{ }^{\circ}\text{C}$. Отношения $Th/U = 3.7$, $K/U = 2000$. Применяется численная процедура согласования ограничений на распределения температуры из сейсмических данных с определяемыми распределениями мантийных температур (Kronrod et al., 2014).

Результаты. С помощью ГМ были получены приближенные линейные зависимости (C_{nbulk}) для вероятных валовых величин Al_2O_3 , FeO , SiO_2 (мас. %), $\#MgO$ от средней по объему температуры в мантии (T_{mean}). Уравнения (C_{nbulk}) позволяют сделать оценки валового состава силикатной Луны по распределению температуры в мантии. По модели ТМ в интервале значений $U_{crust} = 80\text{--}240\text{ ppb}$ были проведены расчеты и определены распределения температуры, концентрации урана в верхней и нижней мантии. Валовое содержание (Al_2O_{3bulk}) в Луне оценивается с привлечением гипотезы о близости отношений Al/Th в Луне к зависимости, полученной для примитивной мантии (McDonough, Sun, 1995). Показано, что в области концентраций $Al_2O_{3bulk} \approx 4\text{--}4.5\text{ мас. \%}$ и мощности коры 34 км решения по моделям ТМ и ГМ совпадают. Соответствующие валовые концентрации $U_{bulk} \approx 20\text{ ppb}$, $Fe_2O_{3bulk} \approx 11.5$; $\#Mg_{82}$.

Источники финансирования: Госзадание ГЕОХИ РАН

Литература

- McDonough W.F., Sun S. (1995). The composition of the Earth. *Chem. Geol.*, 120, 223–253.
- Kronrod V. A., Kronrod E. V., Kuskov O. L. (2014) Constraints on the Thermal Regime and Uranium Content in the Moon: Evidence from Seismic Data. *Doklady Earth Sciences* 455, 2, 485–489.
- Kronrod, V.A., Kuskov, O.L. (2011) Inversion of seismic and gravity data for the composition and core sizes of the Moon. *Izv. Phys. Solid Earth* 47, 711–730.
- Kuskov O.L., Kronrod V.A. (1998) A model of the chemical differentiation of the Moon. *Petrology*, 6, 564–582.
- Kuskov, O. L., Kronrod, V. A. (2009). Geochemical constraints on the model of the composition and thermal conditions of the Moon according to seismic data. *Izv. Phys. Solid Earth*, 45, 753–768.
- Weber, R.C., Lin, P., Garnero, E.J., Williams, Q., Lognonné, P. (2011). Seismic detection of the lunar core. *Science*, 331, 309–312.

Влияние С-О-Н-флюида на перитектическую реакцию оливина в алмазообразующей карбонат-силикатной системе при 6 ГПа

Кузюра А.В., Спивак А.В., Литвин Ю.А.

ИЭМ РАН, Черноголовка shushkanova@iem.ac.ru

Коренные породы верхней мантии и глубинные потоки сверхкритических флюидов системы С-О-Н, обогащенные CO₂-компонентом, являются главным источником вещества в формировании очагов алмазообразующих карбонат-силикат-(С-О-Н-флюидных) расплавов с растворенным элементарным углеродом (Litvin, 2017). Генезис алмазоносных ассоциаций связан с ультрабазит-базитовой эволюцией верхне-мантийного магматизма.

Гипербазит-базитовая эволюция была экспериментально обоснована последовательно от чисто силикатной до силикат-флюидных систем (Литвин и др., 2019; Литвин, Кузюра, 2021). Были изучены перитектические реакции, которые могут оливин-насыщенное силикатное либо силикат-флюидное мантийное вещество превратить в эклогитовое кремнезем-насыщенное.

Данная работа посвящена исследованиям возможности и особенностей течения перитектической реакции гранатизации оливина в комплексной мантийной алмазообразующей системе карбонат-силикат-флюид и гипербазит-базитовой эволюции. Особое значение имеет взаимодействие мантийных гранатовых перидотитов с флюидами, а также сопутствующее алмазообразование. Эксперименты проводились при плавлении многокомпонентной алмазообразующей системы оливин – жадеит – диопсид – (Mg-Fe-Ca-Na-карбонаты) – (С-О-Н) при 6 ГПа и 700 - 1350 °С (условия верхней мантии) при содержании флюида 7.5 мас. % (Litvin et al, 2023).

Установлена перитектическая реакция оливина и жадеит-содержащего расплава с образованием граната. В *PT*-условиях эксперимента компоненты CO₂ и H₂O находятся в состоянии полностью смешимого сверхкритического С-О-Н-флюида (Abramson et al., 2017). В процессе опытов CO₂-компонент С-О-Н-флюида расходуется на карбонатизацию силикатов, что приводит к образованию полностью смешимых H₂O-содержащих карбонат-силикатных расплавов. Растворенный H₂O-флюид существенно понижает температуры ликвидусных границ и солидуса алмазообразующей системы. При этом установлен новый эффект «физико-химического расщепления» (С-О-Н)-флюидсодержащей алмазообразующей системы в субсолидусе на консолидированную силикат-карбонатную и сверхкритическую гидротермальную системы, которые сосуществуют в открытом режиме.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что в алмазообразующих расплавах формируются как алмазы, так и парагенные силикатные минералы, которые по существу являются перекристаллизованными аналогами коренных минералов мантии. При этом алмазообразующей системе вместе с силикатным веществом транслируется способность к перитектической реакции оливина и жадеит-содержащего расплава с образованием граната. Эта реакция сохраняется и при повышенном содержании С-О-Н-флюида и сопровождается значительным снижением температур ликвидуса и солидуса системы.

Работа выполнена при финансовой поддержке по теме FMUF-2022-0001.

Литература:

- Litvin Yu.A. (2017) Diamonds and Associated Phases. Springer Mineralogy. 137 p.
- Литвин Ю.А., Кузюра А.В., Лиманов Е.В. (2019) Роль гранатизации оливина в системе оливин-диопсид-жадеит в ультрамафит-мафитовой эволюции верхне-мантийного магматизма (эксперимент при 6 ГПа). Геохимия 64(10): 1026-1046
- Литвин Ю.А., Кузюра А.В. (2021) Перитектическая реакция оливина при 6 ГПа в системе оливин-жадеит-диопсид-гранат-(С-О-Н) как ключевой механизм эволюции магматизма верхней мантии. Геохимия 66(9): 771-798
- Abramson E.H., Bollengier O., Brown J.M. (2017) The water-carbon dioxide miscibility surface to 450 °C and 7 GPa. Amer. J. Sci. 317(9): 967-989
- Litvin Yu.A., Kuzyura A.V., Spivak A.V. (2023) The Peritectic Reaction of Olivine as the Mechanism of the Ultrabasic-Basic Evolution of the Diamond-Forming Silicate-Carbonate-(C-O-H) System: Experiments at 6.0 GPa. Minerals 13(8): 1040 <https://doi.org/10.3390/min13081040>

Экспериментальное изучение образования шпинели в системе анортит-форстерит при $T = 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$

Лахманова Л.А.^{1,2}, Бутвина В.Г.³, Голунова М.А.³, Демидова С.И.² Бухтияров П.Г.³, Ван К.В.³

¹ Геологический факультет МГУ, Москва *lakhmanova.lida@list.ru*

² Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва
demidova.si@yandex.ru

³ Институт экспериментальной минералогии им. Д.С. Коржинского, Черноголовка

Шпинель-содержащие породы – редкие, но характерные компоненты лунного реголита. Они в основном представлены шпинелевыми троктолитами, шпинелевыми катаклазитами, либо фрагментами в ударно-расплавных брекчиях. Недавно с помощью методики высокоточного минералогического картирования поверхности Луны (M^3) был найден новый тип лунных пород, названный шпинелевыми анортозитами (Pieters et al., 2011). Они отличаются от известных высоким содержанием (~30%) Mg-Al (т. н. «розовой») шпинели и низкой долей мафических минералов (менее 5% оливина и пироксена). Полагают, что такие породы могут кристаллизоваться как в близповерхностных условиях, так и в нижней части лунной коры или даже на границе кора-мантия (Gross et al., 2014; Treiman et al., 2019). Также в качестве одной из моделей образования этой литологии рассматривается процесс ударного плавления троктолитов, которые являются распространенным материалом материковых районов Луны. Это предположение подтверждается находкой в лунном метеорите Dhofar 025 ударных стекол, содержащих микролиты шпинели (Демидова и др., 2017).

Для проверки гипотезы образования Mg-Al шпинели в результате ударного плавления троктолита на Луне, был поставлен эксперимент по кристаллизации смеси магнезиального оливина (Fo_{87-88}) и стекла анортитового состава. Были подготовлены 4 смеси с различным соотношением оливина и стекла. Опыт проводился при субликвидусных условиях: при температуре $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ и атмосферном давлении. Смеси плавилась в высокотемпературной печи в течение 12 часов, после чего производилась быстрая закалка полученного расплава в воде. Результаты эксперимента изучались на сканирующем электронном микроскопе TESCAN MIRA 3 FEG (ГЕОХИ РАН), оборудованном энергодисперсионным анализатором Oxford. В результате эксперимента был получен аналог шпинелевого анортозита, который представляет собой стекло анортитового состава, в котором присутствуют идиоморфные кристаллы шпинели, в некоторых участках образующие целые скопления. Таким образом, ударное плавление троктолитов может быть одним из возможных механизмов образования лунных шпинелевых анортозитов.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания №137-2019-0002

Литература

- Демидова С.И., Назаров М.А., Рязанцев К.М., Аносова М.О., Нтафлос Т., Брандштеттер Ф. Загадочные катодолюминесцирующие объекты лунного метеорита Dhofar 025: их происхождение и источники // Петрология. 2017, том 25, № 2, с. 1–13.
- Gross J., Isaacson P.J., Treiman A.H., et al. Spinel-rich lithologies in the lunar highland crust: Linking lunar samples with crystallization experiments and remote sensing // Am. Min. 2014. V. 99. P. 1849-1859.
- Pieters C.M., Besse, S., Boardman, J., et al. Mg-spinel lithology: A new rock-type on the lunar farside // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. E00G08
- Treiman A.H., Kulis J., Glazner A.F. Spinel-anorthosites on the Moon: Impact melt origins suggested by enthalpy constraints. Am. Min.. 2019. V.104. P.370-384.

Метаморфические индикаторы геодинамических обстановок коллизии, растяжения и сдвиговых зон земной коры

Лиханов И.И.

Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск likh@igm.nsc.ru

К важнейшим вопросам соотношения процессов метаморфизма и тектоники относятся: 1) приуроченность разных типов метаморфизма к определенным тектоническим обстановкам в орогенных поясах и 2) проблема тектонической транспортировки метаморфических комплексов к поверхности и оценка параметров этих процессов, включая механизмы и скорости эксгумации (например, Spear, 1993). Метаморфические породы присутствуют в большей части литосферы и содержат важную информацию о термодинамических параметрах петрогенезиса. Поэтому метаморфизм является одним из индикаторов эндогенных процессов, а его корреляция с магматизмом и тектоникой позволяет реконструировать последовательность событий при развитии литосферы. Этим объясняется повышенный интерес к особенностям формирования и эволюции метаморфических пород в подвижных поясах на границах древних континентов, где проявлены разные типы метаморфизма.

Эффективным методом для выяснения тектоно-магматических причин метаморфизма является реконструкции и анализ трендов эволюции пород в координатах “давление–температура–время” (Лиханов, 2020). Наиболее широко этот подход применяется при интерпретации развития орогенов с полициклической историей, где разные типы метаморфизма сочетаются между собой в контрастных геодинамических обстановках. Прогресс в этом направлении в последние годы обусловлен совершенствованием инструментальной базы, прецизионных методов исследования вещества – *in situ* локального микроанализа и датирования зональных метаморфических минералов, и вычислительного аппарата геотермобарометрических процедур с использованием мультиминеральных равновесий (Reverdatto et al., 2019). В докладе эти вопросы обсуждаются на примере геологических комплексов Енисейского кряжа различной геодинамической природы, являющихся типичными для разных типов метаморфизма. В составе этих комплексов детально исследованы проявления регионального LP/HT и UNT гранулитового метаморфизма, коллизионного MP/HT и HP/LT метаморфизма, связанных с надвигами и субдукцией, и стресс-метаморфизма при деформациях пород (Likhanov, 2019). Полиметаморфизм этих пород четко отслеживается по реакционным микротекстурам, химической зональности минералов, конфигурации *P-T* трендов и изотопным датировкам. При построении обобщенной *P-T* диаграммы их эволюции были использованы данные по хорошо изученным природным объектам мира, характеризующиеся присутствием прогрессивных и регрессивных преобразований пород. Установлены диагностические *P-T-t* тренды, характерные для пород, сформированных в зонах активного тектогенеза - при растяжении и сжатии земной коры и в сдвиговых зонах. Приведено критическое обсуждение характера таких трендов – «по» или «против часовой стрелки», и показано, что этот аппарат не всегда однозначно предсказывает специфику геодинамического режима в полифациальных комплексах со сложным развитием, локализованных преимущественно на конвергентных границах литосферных плит. Тем не менее в настоящее время *P-T-t* тренды эволюции пород являются одним из самых эффективных инструментов для исследования тектонотермальных процессов при метаморфизме. А интерпретация результатов *P-T-t* эволюции пород с термомеханическим численным моделированием взаимодействия литосферных блоков, выполненным с учетом варьирующих скоростей и механизмов погружения и эксгумации пород, имеет перспективы для корректного решения большого класса геодинамических задач.

Работа выполнена за счет средств гранта РНФ (проект № 21-77-20018).

Лиханов И. И. (2020) Метаморфические индикаторы геодинамических обстановок коллизии, растяжения и сдвиговых зон земной коры // Петрология 28(1): 4-22.

Likhanov I.I. (2019) Mass-transfer and differential element mobility in metapelites during multistage metamorphism of Yenisei Ridge, Siberia. In Metamorphic Geology: Microscale to Mountain Belts // Geol. Society, London, Special Publications 478: 89-115.

Reverdatto V.V., Likhanov I.I., Polyansky O.P., Sheplev V.S., Kolobov V.Y. (2019) The Nature and Models of Metamorphism. Springer, Cham. 330 p.

Spear F.S. (1993) Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths. Min. Society of America Monograph, Washington DC. 799 p.

Петрогенезис, возраст и Lu-Hf систематика пород Гаревского комплекса Енисейского кряжа: новые доказательства гренвильских и вальгальских тектонических событий на западной окраине Сибирского кратона

Лиханов И.И.

Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск likh@igm.nsc.ru

Реконструкция геологической истории Енисейского кряжа, важна не только для понимания тектонической эволюции подвижных поясов, но и для верификации данных палеомагнитного моделирования конфигурации Родинии (Likhanov, 2019). Этот суперконтинент возник на рубеже мезо-неопротерозоя в результате гренвильского орогенеза, фиксирующего закрытие позднемезопротерозойского океана. Ключевым для палеоконтинентальных реконструкций неопротерозойского этапа эволюции Родинии также является вальгальский ороген, сформировавшийся в диапазоне гренвильского и постгренвильского циклов. С другой стороны, на основании имеющихся в литературе представлений о низкой эндогенной активности в геологической эволюции Земли в интервале между 1.8 и 0.75 млрд лет в ряде работ сделан вывод об отсутствии на Енисейском кряже (ЕК) гренвильских коллизионных событий. Это привело к противоречивой трактовке вопросов геологической эволюции региона (Likhanov, 2022).

Очевидно, что проблемы в оценке геохронологических рубежей в истории суперконтинента Родиния связаны с дефицитом возрастных датировок, включающих периоды его становления и распада, что ограничивает возможности временных корреляций глобальных геологических процессов в истории Земли. Для восполнения этого пробела приведены геохронологические свидетельства ранне-неопротерозойских событий в эволюции докембрийских комплексов ЕК. Такие исследования важны не только для понимания процессов, сформировавших тектонический облик региона, но и для решения широко дискутируемого вопроса о вхождении Сибирского кратона в состав древнего суперконтинента Родиния.

Нами получены новые геологические, геохимические и изотопно-геохронологические данные по петрогенезису, геотектоническим обстановкам формирования, термодинамическим условиям, возрастам метаморфизма и протолита для контрастных по составу пород Гаревского метаморфического комплекса – порфиروبластических гранитогнейсов, микроклин-цоизитовых ортоамфиболитов, рапакиви- и адакитоподобных гранитов, мигматитов, плагиогранитогнейсов и ортоклазовых лейкогранитогнейсов. Обсуждены возможные модели их формирования (Лиханов, 2023). Дополнительная информация об эволюции корообразующих событий в пределах этого региона и источниках расплава была получена при Lu-Hf изотопных исследованиях. Установлены два импульса неопротерозойской эндогенной активности на западной окраине Сибирского кратона, связанные со становлением суперконтинента Родиния (930–900 и 880–845 млн лет), коррелирующие с гренвильскими и постгренвильскими коллизионно-аккреционными процессами вальгальской складчатости. Геодинамическая история региона сопоставляется с синхронной последовательностью и схожим стилем тектоно-термальных событий по периферии крупных докембрийских кратонов Лаврентии и Балтики, что подтверждает палеоконтинентальные реконструкции о тесных пространственно-временных связях между этими кратонами и их вхождении в состав Родинии (Likhanov, Santosh, 2019).

Работа выполнена за счет средств гранта РФФИ (проект № 21-77-20018).

Лиханов И.И. (2023) Свидетельства гренвильских и вальгальских тектонических событий на западной окраине Сибирского кратона (Гаревский метаморфический комплекс, Енисейский кряж) // Петрология 31(1): 49-80.

Likhanov I.I. (2019) Mass-transfer and differential element mobility in metapelites during multistage metamorphism of Yenisei Ridge, Siberia. In Metamorphic Geology: Microscale to Mountain Belts // Geological Society, London, Special Publications 478: 89-115.

Likhanov I.I. (2022) Provenance, Age and Tectonic Settings of Rock Complexes (Transangarian Yenisei Ridge, East Siberia): Geochemical and Geochronological Evidence // Geosciences (Switzerland) 12(11): 402.

Likhanov I.I., Santosh M. (2019) A-type granites in the western margin of the Siberian Craton: implications for breakup of the Precambrian supercontinents Columbia/Nuna and Rodinia // Precambrian Research 328: 128–145.

Самородное железо в базальтах в природе и экспериментах в восстановительных условиях

Персиков Э.С.¹, Бухтияров П.Г.¹, Аранович Л.Я.^{1,2}, Шапошникова О.Ю.¹, Некрасов А.Н.¹

¹ИЭМ РАН, Черногловка persikov@iem.ac.ru; ²ИГЕМ Москва, chivonara47@yandex.ru

. В поверхностных земных условиях самородное железо для человека всегда ассоциировалось с железными метеоритами. Поэтому обнаруженные в конце XIX в. на юго-западном побережье о. Диско (Западная Гренландия) железные валуны были первоначально описаны как метеориты. Однако, дальнейшие исследования привели к выводу об их земном происхождении. Отдельные блоки железа достигают здесь 25 тонн. Ксенолиты железа в базальте острова Диско, скорее всего, были перенесены вместе с извергающимся базальтом. (Bird et al., 1977). А результаты исследования интрузивов траппов на Сибирской платформе с масштабным проявлением самородного железа позволили выявить объединяющие их черты. Самородное железо формирует желвакообразные сегрегации, в которых активно концентрируются Ni, Co, Au и PGE. Содержание их увеличивается в металле по сравнению с вмещающей силикатной породой в сотни и даже в тысячи раз. В основе образования самородного железа лежит флюидно-магматическое взаимодействие вещества магмы с восстановительными компонентами флюида (Томшин и др. 2023; и др.). Установленный экспериментально процесс формирования металлических обособлений в базальтовом расплаве при его взаимодействии с водородом вполне согласуется с природными данными. Характерно, что многие особенности включений металлической фазы (рис. 1) в магматических породах (размеры, морфология, структура, состав) хорошо соотносятся с наблюдаемыми в проведенных экспериментах (Персиков и др., 2023).

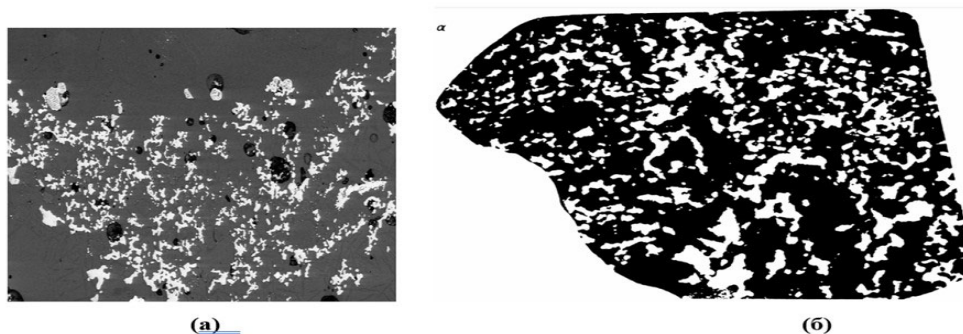


Рис. 1. Сравнение структуры экспериментальных и природных образцов. (а) - Растровая микрофотография в рассеянных отраженных электронах (BSE) продуктов закалки образцов после опытов по взаимодействию базальтового расплава с водородом (Персиков и др., 2023), белый цвет-металлическое железо; черный цвет-базальтовое стекло; (б) – вкрапленная руда самородного железа в габбро-долерите интрузии горы Озерной, белый цвет-самородное железо, черный цвет- габбро-долерит, натуральная величина (Томшин и др. 2023; и др.).

Работа выполнена в рамках темы НИР № FMUF-2022-0004 ИЭМ РАН при финансовой поддержке РФФ, грант № 22-27-00124

Литература

- Bird J.M., Weathers M.S. Native iron occurrences of Disko Island. Greenland. J. Geol. 1977. V. 85. P. 359–371
- Томшин М.Д., Копылова А.Г., Васильева А.Е. Самородное железо в траппах Сибири. Петрология, 2023, Т. 31, №2, С. 202-216.
- Персиков Э.С., Бухтияров П.Г., Аранович Л.Я., Шапошникова О.Ю., Некрасов А.Н. Экспериментальное исследование процесса взаимодействия водорода с магматическими расплавами в условиях земной коры и при вулканических процессах. Геология и Геофизика, 2023, Т...64(8) С. 1156-1170, doi: 10.15372/GiG2023121.

Влияние эклогитизации на стиль субдукции в раннем докембрии: результаты петролого-термомеханического моделирования

Перчук А.Л.^{1,2}, Захаров В.С.², Геря Т.В.³

¹ *Кафедра Петрологии и Вулканологии,
Геологический факультет МГУ, Москва*

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

³ *Швейцарский Федеральный Технологический Институт, г. Цюрих*

Многие исследователи полагают, что в раннем докембрии из-за повышенной температуры мантии и, как следствие, малой мощности литосферных плит субдукция была невозможна. Другие же, допуская возможность субдукции, считают, что она была пологой и проходила в «горячем» режиме, когда погружающаяся плита существенно прогревалась. По нашим исследованиям (Perchuk et al., 2020, 2021) достаточно высокая прочность и пониженная плотность литосферных плит в раннем докембрии обусловлена наличием мощного (100-130 км) слоя деплетированной (обедненной) мантии, подстилающей океаническую кору. При этом субдукция в численных экспериментах при повышенных температурах мантии, несмотря на учет изменения плотности в субдуцирующей плите за счет эклогитизации (увеличение плотности) и степени деплетирования мантии (снижение плотности), проходила в основном в режиме погружения под большими углами.

В данной работе используется новый подход в моделировании субдукции (Perchuk et al., 2023). В коде I2VIS (Gerya, Yuen, 2007) была дополнена дискретная эклогитизация океанической коры при субдукции. В частности, учитывается, что превращение габброидов нижней коры в эклогиты происходит позднее, чем базальтов, слагающих верхнюю кору. Численные 2D эксперименты выполнялись при потенциальных температурах мантии (T_p) от современной ($\Delta T = T - T_p = 0^\circ\text{C}$) до превышающей современную на 250°C ($\Delta T = 250^\circ\text{C}$) с шагом по $25\text{--}50^\circ\text{C}$. При моделировании учитывались эффекты плавуности, как положительной, связанные с деплетированием мантии, так и отрицательной, связанные с эклогитизацией.

Моделирование показало, что увеличение потенциальной температуры мантии и связанной с этим толщины океанической коры и обедненной мантии может вызвать переход к режиму пологой субдукции при $\Delta T \geq 150^\circ\text{C}$, но только при учете дискретной эклогитизации в базальтовой коре. В противном случае субдукция протекает в режиме крутого погружения. При пологой субдукции отмечается эпизодический бимодальный магматизм локализованный в пределах вулканических цепей, расположенных на расстоянии > 400 км от желоба. Вулканизм в этом случае вызван кратковременными (1–4 млн лет) периодами, связанными с быстрым глубинным откатом субдуцирующей океанической плиты. Ограниченное образование ТТГ гранитоидов вызвано частичным плавлением субдуцирующего базальтового слоя, но заметно сокращается при $\Delta T = 250^\circ\text{C}$. Пологая субдукция приводит к образованию слоистой толщи, напоминающей по мощности и форме мантийный киль (Perchuk et al., 2020), в котором заключен слой океанической плиты. Однако, как показывает моделирование, образование долгоживущих мантийных килей с помощью этого механизма может быть ограничено тем, что при завершении конвергенции плит происходит отслаивание постепенно эклогитизирующейся океанической коры и подстилающей мантии. При повышенных температурах мантии пологая субдукция приводит к объемной гидратации мантийного клина, образуя подкорковый серпентинит меланжевый слой, который становится потенциальным источником флюидов при последующей эволюции вышележащей континентальной коры.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №23-17-00066

- Gerya T.V., Yuen D.A. (2007) Robust characteristics method for modelling multiphase visco-elasto-plastic thermo-mechanical problems. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 163: 83–105
- Perchuk A.L., Gerya T.V., Zakharov V.S., Griffin W. L. (2020) Building cratonic keels in Precambrian plate tectonics. *Nature* 586, 395–401
- 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.
- Perchuk A.L., Zakharov V.S., Gerya T.V., Griffin W. L. (2023) Flat subduction in the Early Earth: The key role of discrete eclogitization kinetics. *Gondwana Research* 119, 186–203.

Эволюция магматизма в островодужных системах

Плечов П.Ю.¹

¹ Минералогический музей им. А.Е.Ферсмана РАН, Москва, Ленинский проспект, д.18, с.1,
pplechov@gmail.com

Предлагаемая модель эволюции островодужного магматизма предполагает последовательное вовлечение новых источников магм по мере развития островодужной системы. За счет этого, каждая стадия эволюции островодужной системы характеризуется специфическим набором вулканических серий.

Вулканизм примитивных островных дуг определяется плавлением деплетированной мантии в надсубдукционном клине под воздействием флюида, отделившегося от субдуцированной плиты. В результате, на примитивных островных дугах доминируют высокомагнезиальные низкокалиевые островодужные толеитовые серии преимущественно базальтового и андезибазальтового состава. При этом мощность островодужной коры растет и лавы могут становиться более дифференцированными по мере увеличения мощности коры. Эта новообразованная кора сложена вулканогенным материалом, который быстро преобразуется в метаморфические породы в условиях зеленосланцевой или амфиболитовой фации в нижней части островодужной коры. Таким образом, за несколько миллионов лет примитивная островная дуга эволюционирует в развитую островную дугу, которая характеризуется мощной островодужной корой, сложенной зелеными сланцами и амфиболитами.

Частичное плавление зеленых сланцев или амфиболитов может продуцировать значительный объем кислых магм, что выражается в мощных кальдерообразующих извержениях и характеризует стадию развитой островной дуги. Частичное плавление амфиболитов в водонасыщенных условиях при давлении 0.8-1 GPa может также продуцировать магму андезибазальтового или даже базальтового состава (при высокой степени частичного плавления), но известково-щелочной специфики. При этом, амфибол-содержащий рестит может сохранять значительные количества LREE, Nb, Ti and K. Магматизм развитых островных дуг характеризуется большим спектром низкокалиевых магм (от базальтовых до кислых) с преобладанием андезитов и андезибазальтов.

В работе [Плечов, 2008] высказано предположение о том, что в развитых островных дугах магма поднимается с нескольких уровней магмогенерации: 1) высокомагнезиальные низкокалиевые базальты формируются в мантийной клине за счет плавления под воздействием флюида; 2) андезиты и андезибазальты формируются за счет частичного плавления амфиболитов в нижней части островодужной коры; 3) кислые магмы могут формироваться за счет частичного плавления метабазитов в верхней части островодужной коры. Эти магмы могут смешиваться в промежуточных очагах и извергаться в одном и том же эруптивном центре, формируя гибридные породы. Смешение магм является осложняющим фактором для реконструкции составов исходных магм для многих островодужных вулканов.

Зрелые островодужные системы (такие как Япония и Камчатка) состоят из нескольких древних и современных островных дуг. Новый вулканический фронт начинает формироваться по сценарию, описанному выше, а предыдущие вулканические дуги смещаются в задуговые условия. Нижняя часть островодужной коры отмерших вулканических фронтов состоит из пироксенитов или амфиболовых пироксенитов (реститов от частичного плавления амфиболитов). Пироксенитовая часть островодужной коры более плотная, чем подстилающая перидотитовая мантия. За счет этого, блоки пироксенитов могут деляминировать и являться источником магм, обогащенных LREE, Nb, Ti, K в сравнении с «типичными» островодужными известково-щелочными сериями. Недавно, мы описали такие магмы голоценового возраста в той зоне Камчатки, в которой отсутствует влияние современной зоны субдукции [Nekrylov et al., 2018], что подтверждает предлагаемую модель эволюции островодужного вулканизма. Согласно этой модели, геохимическая поперечная зональность зрелых (две и более дуги) может объясняться несколькими источниками магм, появляющимися по мере эволюции островодужной системы.

Литература:

- Плечов П.Ю. (2008) Множественность источников островодужных магм. Дисс. На соиск. ст. д.г.-м.н., Москва, МГУ, 328 с.
- Nekrylov, N. A., Popov, D. V., Plechov, P. Y., Shcherbakov, V. D., Danyushevsky, L. V., & Dirksen, O. V. (2018). Garnet-pyroxenite-derived end-member magma type in Kamchatka: evidence from composition of olivine and olivine-hosted melt inclusions in Holocene rocks of Kekuknaisky volcano. *Petrology*, 26, 329-350.

Петрологические свидетельства и термомеханическая численная модель генерации сверхлитостатического давления

**Полянский О.П., Лиханов И.И., Бабичев А.В.,
Козлов П.С., Зиновьев С.В., Свердлов В.Г.**

*ИГМ им. В.С. Соболева СО РАН,
Новосибирск pol@igm.nsc.ru*

На основании разработанной численной модели напряженно-деформированного состояния полиминерального вещества, описывающей формирование бластомилонитов Приенисейской региональной сдвиговой зоны (ПРСЗ) в Енисейском кряже, показана возможность превышения давления над литостатическим в локальном масштабе в породах, попавших в условия сдвиговых деформаций. Для тектонитов южного (Ангаро-Канский блок) и северного (Исаковский террейн и гаревский комплекс) сегментов ПРСЗ получены оценки максимального избыточного давления от 2–3 кбар до 4–5 кбар, что составляет от 25 до 50% от литостатического. Показано, что избыточное давление может сохраняться в локальном объеме в геологическом масштабе времени, достаточном для его фиксации в метаморфических минералах. Модельные значения сверхлитостатического давления в гранат-амфиболовых тектонитах и геобарометрические оценки пиковых величин при стресс-метаморфизме, установленном в ПРСЗ, позволяют предложить новые свидетельства неоднородности давления в природных минеральных ассоциациях. Используя результаты моделирования эволюции апометабазитовых бластомилонитов, установлено, что избыточное давление на стадии син-деформационного метаморфизма в сдвиговой зоне возможно при температуре до 600–650°C и не превышающей 800°C; наличие флюида или частичного расплава препятствуют возникновению сверхдавления. Величина избыточного давления за счет напряжений сдвига зависит от минерального состава и структуры породы.

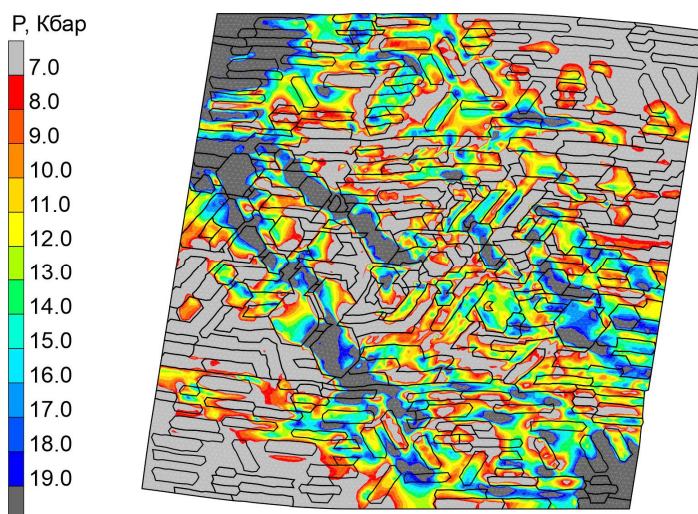


Рис. 1. Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния в поликристаллическом агрегате при сдвиговой деформации. Распределение общего давления приведено при длительности деформаций 1 млн лет при температуре 600°C и внешнем давлении 7 кбар. Светло- и темносерые области – зоны разреженного и избыточного над литостатическим давления (ниже и выше показанного на цветовой шкале, соответственно).

Работа выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 21-77-20018), с поддержкой полевых работ по госзаданию ИГМ СО РАН (№ 122041400176-0).

Расплавы в фосфат-карбонатной системе

Расс И.Т.¹, Полозов А.Г.¹, Шмулович К.И.²

¹ИГЕМ РАН, Москва rass@igem.ru;

²ИЭМ РАН, Черноголовка kshmulovich@yandex.ru

Проведено экспериментальное исследование фракционирования редких элементов между щелочным расплавом, кристаллизующимися из него минералами и водно-углекислым и водно-солевым флюидами при давлении 500 МПа. Эксперименты проводили на установках высокого давления с внутренним нагревом. Во всех экспериментах к исходным смесям добавлялись H_2O , $H_2C_2O_4$ и смеси окислов редких элементов.

Наши эксперименты в щелочной карбонатно-фосфатной системе $CaCO_3 + Ar + NaOH$ при температуре 1100-750°C показали наличие кальцита, не содержащего редких (включая редкоземельных) элементов в равновесии с закаленным расплавом, состоящим из апатита, ниерерита ($Na_2Ca(CO_3)_2$) и соды, с мелкими, меньше 5 микрон, редкометальными минералами – бадделейтом и группы перовскита и пироклора, т.е., удалось получить фосфатно-щелочно-карбонатный расплав с редкометальными аксессуарами, в какой-то мере моделирующий щелочной карбонатит, известный в Олдоиньо-Ленгаи.

В экспериментах в фосфатно-карбонатной системе с фтором $CaCO_3 + NaPO_3 + NaF$ с различным соотношением фосфата и карбоната в исходных смесях при температуре 1000-650°C изучено распределение Ti, Zr, Nb, La, Sm, Yb, Y между фосфатно-карбонатными расплавами, с различными содержаниями Ca и Na, и сосуществующими фазами – апатитом в 12-ти опытах, и бучвалдитом ($CaNaPO_4$) в двух опытах (Rass et al., 2023).

В зависимости от мольной доли фосфора в исходных смесях фосфата и карбоната – $\chi(P_2O_5)$ получили 2 типа закаленных расплавов, содержащих пустоты, указывающие на наличие свободного CO_2 .

Продукты опытов из смесей с $\chi(P_2O_5)$ до 30 представляют собой закаленный фосфатно-кальцево-карбонатный расплав с высокими концентрациями REE, апатитом и чисто содовыми округлыми обособлениями, с ZrO_2 , TiO_2 , Nb_2O_5 , без REE. Продукты опытов из смесей с $\chi(P_2O_5)$ выше 30 состоят из натриево-карбонатно-фосфатного стекла, с малым содержанием CaO , высокими концентрациями ZrO_2 , TiO_2 , Nb_2O_5 и кристаллов апатита, обогащенных REE.

Растворимость ZrO_2 , TiO_2 , Nb_2O_5 в полученных существенно кальцитовых закаленных расплавах при температуре 650°C ограничена кристаллизацией окислов Zr, Ti, Nb. При температуре 1000°C их кристаллизации не происходит, и концентрации ZrO_2 , TiO_2 , Nb_2O_5 растут в расплавах по мере увеличения мольной доли P_2O_5 в исходных смесях. Коэффициенты распределения TiO_2 и ZrO_2 между апатитом и расплавом варьируют в пределах 0.06-0.2 и 0.4-1.0, соответственно. Коэффициенты распределения REE между апатитом и сосуществующим существенно Са-карбонатным расплавом при увеличении $\chi(P_2O_5)$ возрастают для La_2O_3 от 1.3 до 3.3, для Sm_2O_3 от 0.4 до 3.4, для Yb_2O_3 от 1.4 до 1.9 и для Y_2O_3 от 0.8 до 2.9. Коэффициенты распределения REE между апатитом и Na-карбонатно-фосфатными расплавами на несколько порядков возрастают по мере увеличения $\chi(P_2O_5)$, особенно для La_2O_3 и Sm_2O_3 , до 110 и 75, соответственно, и более чем до 32 и до 20 для Yb_2O_3 и Y_2O_3 . Коэффициенты распределения TiO_2 и ZrO_2 между бучвалдитом и расплавом не зависят от $\chi(P_2O_5)$, и равны 0.1 и 1.05, соответственно. Коэффициенты распределения REE между бучвалдитом и сосуществующим расплавом в этих опытах, в полтора раза меньше, чем коэффициенты распределения между апатитом и расплавом, возрастают от ~ 1.1 для всех REE при $\chi(P_2O_5) = 25.8$, до 3.6, 2.9, 3.2, и 2.0 соответственно для La_2O_3 , Sm_2O_3 , Yb_2O_3 и Y_2O_3 при $\chi(P_2O_5) = 41.7$. Распределение редких элементов в расплавах и фазах не зависит от количества F (при переменном количестве NaF в исходных смесях).

Rass I.T., Shmulovich K.I., Petrenko D.B. (2023) Distribution of trace elements between phases in the carbonate-phosphate system with fluorine at 500 MPa. Lithos [LITHOS 440-441 107053](#)

Фазовые отношения в сухом и водном базальте СОХ до 40 ГПа и 2100°C по результатам термодинамического моделирования

Сапегина А.В.^{1,2}, Перчук А.Л.¹

¹ Кафедра Петрологии и Вулканологии,
Геологический факультет МГУ, Москва

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

Минеральный состав и плотность субдуцирующей океанической плиты оказывает решающее влияние на кинематику и геометрию зоны субдукции. Фазовые отношения в слэбе исследовались с помощью экспериментов (напр., Ishii et al., 2019; Schmidt and Poli, 1998), однако количество таких исследований невелико, а Р-Т диапазон экспериментальных работ сильно ограничен. Развитие современных методов термодинамического моделирования и появление новых моделей твёрдых растворов минералов позволяет изучать фазовые отношения в слэбе в широком диапазоне Р-Т условий, в том числе в неохваченных экспериментами.

Для моделирования фазовых равновесий в погружающейся плите мы использовали средний состав базальта СОХ. Фазовые Р-Т диаграммы были рассчитаны с использованием программного комплекса Perple_X в диапазоне температур 400–2100°C и давлений 0–40 ГПа для сухой и для водной (2.78 мас. % H₂O) систем.

Для сухого базальта полученные фазовые поля хорошо согласуются с экспериментальными данными (Ishii et al., 2019; Yasuda et al., 1994) во всём диапазоне Р-Т условий. Исключение составляет поле Са-перовскита (Са-Pv, CaSiO₃), положение которого в переходной зоне мантии рознится и в экспериментальных работах. В рассчитанных фазовых диаграммах поле Са-Pv соответствует полям в экспериментах (напр., Yasuda et al., 1994), в то время как под данным (Ishii et al., 2019) Са-Pv появляется на 6 ГПа ниже по давлению. Отметим, что Са-Pv оказывает пренебрежимо малое влияние на плотность метабазальта. Положение солидуса и ликвидуса сухого базальта до 6 ГПа хорошо согласуется с экспериментами (напр., Yasuda et al., 1994), однако выше по давлению расчётные линии становятся более высокотемпературными по сравнению с результатами экспериментов.

Для водного базальта термодинамические модели воспроизводят экспериментальные данные по стабильности минералов (напр., Schmidt and Poli, 1998) с разной степенью точности. Поля стабильности амфибола, эпидота и хлорита очень близки к экспериментальным, в то время как поля стабильности лавсонита и фенгита в модели также близки к экспериментальным по давлению, однако по температуре сокращены на 50–100°C. Добавление в систему расплава (модель из Holland et al., 2018) сильно искажает фазовые поля при температуре >650°C выше ~3.0 ГПа, что может быть связано с отсутствием удовлетворительной модели, описывающей флюидно-магматическую систему выше 2-й критической точки. Важно, что базальтовая система демонстрирует ограничение на поглощение H₂O-флюида водными минералами: все фазовые поля выше 550°C содержат свободную флюидную фазу. При повышении содержания H₂O в системе до 5 мас. % свободная вода наблюдается уже во всех фазовых полях. Водный солидус базальта в модели до 3 ГПа близок к экспериментальному, однако при более высоких давлениях существующие модели расплавов неспособны адекватно воспроизводить ни водный солидус базальта, ни минеральные парagenезисы.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ №23-17-00066

Литература

- Holland, T.J.B., Green, E.C.R., Powell, R. (2018). Melting of Peridotites through to Granites: A Simple Thermodynamic Model in the System KNCFMASHTOCr. *J. Petrol.* 59, 881–900.
- Ishii, T., Kojitani, H., Akaogi, M. (2019). Phase Relations of Harzburgite and MORB up to the Uppermost Lower Mantle Conditions: Precise Comparison With Pyrolite by Multisample Cell High-Pressure Experiments With Implication to Dynamics of Subducted Slabs. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 124, 3491–3507.
- Schmidt, M.W., Poli, S. (1998). Experimentally based water budgets for dehydrating slabs and consequences for arc magma generation. *Earth Planet. Sci. Lett.* 163, 361–379.
- Yasuda, A., Fujii, T., Kurita, K. (1994). Melting phase relations of an anhydrous mid-ocean ridge basalt from 3 to 20 GPa: Implications for the behavior of subducted oceanic crust in the mantle. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 99, 9401–9414.

Два типа симплектитов в ксенолите гранатового гранулита из трубки Зарница

Сапегина А.В.^{1,2}, Перчук А.Л.^{1,2}, Шацкий В.С.³

¹ Кафедра Петрологии и Вулканологии,

Геологический факультет МГУ, Москва

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

³ ИГМ СО РАН им. В.С. Соболева, Новосибирск

Изучение ксенолитов, доставляемых на поверхность кимберлитами или щелочными магмами, позволяет судить как о Р-Т условиях формирования пород глубинных этажей земной коры, так и об их преобразовании глубинными флюидами.

В этой работе изучался образец ксенолита высокомагнезиального гранулита (#Mg=78) из кимберлитовой трубки Зарница. Гранулит сложен гранатом (24 об.%), клинопироксеном (28 об.%) и плагиоклазом (41 об.%). В породе также встречаются скаполит (< об.% 1%), кулькеит (7 об. %) и тальк (< об. 1%). Кварц встречен в породе в виде округлых включений в зёрнах граната.

В гранулите наблюдаются симплектиты двух типов. Сrx-Ку симплектиты, как правило, сложены срастаниями игольчатых, реже червеобразных, кристаллов кианита и клинопироксена. Они образуют жилы, проходящие через зёрна плагиоклаза, клинопироксена или вдоль границ этих минералов с гранатом. Орх-Pl симплектиты (келифиты) представлены тончайшими срастаниями плагиоклаза, ортопироксена, иногда со шпинелью, замещающими краевые части (до 150 мкм) граната и обладающими бурой окраской в проходящем свете.

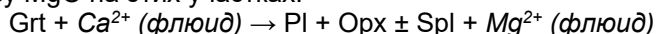
Для определения условий образования гранулита в комплексе программ PERPLE_X (Connolly, 2005) была рассчитана фазовая Р-Т диаграмма с использованием эффективного состава ксенолита. Параметры Т и Р были определены по пересечению изоплет химических составов минералов в фазовом поле с парагенезисом, соответствующим природному, и составили 720°C и 1.2 ГПа. Полученные параметры согласуются с данными Grt-Сrx термобарометрии.

Сrx-Ку симплектиты образовывались в ходе реакции граната и плагиоклаза под воздействием Si-содержащего флюида:



Р-Т условия их роста определялись по пересечению минеральных реакций их образования в программе TWQ (Berman, 1991) и оказались близкими к условиям образования самого гранулита - 750°C и 1.3 ГПа. Таким образом, появление Сrx-Ку симплектитов, вероятно, связано с метасоматическим воздействием внешнего кремнийсодержащего флюида без изменения Р-Т условий.

Рост Орх-Pl симплектитов келифитовых кайм связан с разложением граната. Изменение валового состава келифита на границах граната с другими минералами свидетельствует о присутствии флюида, способствующего локальному привносу СаО и выносу MgO на этих участках:



Поскольку келифиты, по всей видимости, формировались в открытой системе, мы рассчитали в PERPLE_X фазовые $a_{\text{CaO}} - a_{\text{MgO}}$ диаграммы для валового состава келифитов. Р-Т условия роста Орх-Pl симплектитов и активности СаО и MgO были определены по пересечению изоплет химических составов минералов в соответствующем фазовом поле Орх-Pl-Spl. Полученные условия роста келифитов составили 700-900°C и 0.6 ГПа. Таким образом, формирование Орх-Pl симплектитов связано с декомпрессионным разложением граната под внешним флюидным воздействием.

Выявленные особенности преобразования гранулита из кимберлитовой трубки Зарница показывают, что эволюция нижнекоровых гранулитов, образованных по основным кумулатам, может быть сложнее, чем предполагает традиционная модель остывания базальтового андерплейта в основании континентальной коры.

Литература

- Berman, R.G., 1991. Thermobarometry using multi-equilibrium calculations; a new technique, with petrological applications. Can. Mineral. 29, 833–855.
- Connolly, J.A.D., 2005. Computation of phase equilibria by linear programming: A tool for geodynamic modeling and its application to subduction zone decarbonation. Earth Planet. Sci. Lett. 236, 524–541.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.04.033>

Метасоматизм в докембрийской коре Сибирского кратона: результат изучения ксенолитов гранат(±ортопироксен)-биотит-полевошпатовых пород из кимберлитовых трубкок Юбилейная и Сытыканская, Якутия

**Сафонов О.Г.^{1,2}, Селютина Н.Е.¹, Япаскурт В.О.², Варламов Д.А.¹,
Шарыгин И.С.³**

¹ ИЭМ РАН, Черноголовка oleg@iet.ac.ru; ² Геологический факультет МГУ, Москва; ³ ИЗК СО РАН, Иркутск

Ксенолиты в кимберлитах представляют собой уникальные и наиболее перспективные объекты для изучения состава и структуры нижних уровней континентальной коры (Rudnick, Taylor, 1987; Rudnick, 1992). Работа посвящена изучению *P-T* и флюидных условий метаморфизма гранат-биотит-полевошпатовых и ортопироксен-гранат-биотит-полевошпатовых пород, представленных в виде ксенолитов в кимберлитах трубкок Юбилейная и Сытыканская Якутской кимберлитовой провинции. Исследовано 7 образцов ксенолитов, отличающихся различными количественными соотношениями граната (Grt), ортопироксена (Orx), биотита (Bt), плагиоклаза (Pl) и калиевого полевого шпата (Kfs). В ряду этих образцов выявлены обратные зависимости относительных содержаний Grt и Orx, Orx и Bt, Grt и Pl, Pl и Kfs, указывающие на закономерный ряд преобразований ассоциации Grt + Pl + Orx ± кварц до ассоциации Grt + Bt + Kfs. В этом процессе ведущими были реакции замещения плагиоклаза калиевым полевым шпатом и ортопироксена биотитом, что выразилось в реакционных структурах в породах, в отрицательных корреляциях содержаний этих минералов, а также в петрохимических характеристиках пород. Моделирование минеральных ассоциаций ксенолитов с помощью метода псевдосечений (PERPLE_X; Connolly, 2005) выявило две группы пород, отвечающие разным уровням глубины коры Сибирского кратона. Для пород, где ортопироксен не обнаружен или присутствует в виде единичных реликтов, оценки давлений составляют 9.5–10 кбар, а для пород, содержащих ортопироксен – 6–7 кбар. При этом породы ксенолитов имеют близкие температуры метаморфизма 750–800°C. Сопоставление зональности граната в породах с положением изоплет на *P-T* псевдосечениях показывает, что породы испытали остывание на 200–250°C и декомпрессию на 3–4 кбар вне зависимости от уровня коры, на котором они находились изначально. Такой режим изменения давления и температуры указывает на метаморфическую эволюцию пород в ходе их эксгумации. Этот процесс, вероятно, был связан с коллизионными процессами в ходе амальгамации отдельных блоков Сибирского кратона в Палеопротерозое, 2.0-1.8 млрд. лет (Shatsky et al., 2016, 2022; Koreshkova, Downes, 2021). Обогащенные калиевым полевым шпатом (и биотитом) породы ксенолитов являлись продуктами метаморфизма с участием водно-(углекисло)-солевых флюидов. Ксенолиты, несущие признаки наиболее сильных метасоматических преобразований, характеризуются большими давлениями. Они находились в непосредственной близости от места накопления кристаллизующихся базальтовых магм – источников флюидов.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 18-17-00206.

Литература:

- Connolly J.A.D. (2005) Computation of phase equilibria by linear programming: A tool for geodynamic modeling and its application to subduction zone decarbonation. *Earth Planet. Sci. Lett.* 236: 524-541.
- Rudnick R. L., Taylor S. R. (1987) The composition and petrogenesis of the lower crust: a xenolith study. *J. Geophys. Res.: Solid Earth.* 92: 13981-14005.
- Rudnick R. L. (1992) Xenoliths—samples of the lower continental crust. In *Continental lower crust* (Fountain D.M., Arculus R.J., Kay R.W., eds.) 23: 269-316.
- Koreshkova M.Y., Downes H. (2021) The age of the lower crust of the central part of the Columbia supercontinent: A review of zircon data. *Gondwana Res.* 96: 37-55.
- Shatsky V. S., Malkovets V. G., Belousova E. A. 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. *Precamb. Res.* 282: 1-20.
- Shatsky V. S., Ragozin A. L., Wang Q. et al. (2022) Evidence of Eoarchean crust beneath the Yakutian kimberlite province in the Siberian craton. *Precamb. Res.* 369: 106512.

Обобщенный Р-Т тренд и флюидный режим эксгумации метapelитов Центральной зоны комплекса Лимпопо (ЮАР)

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

Голунова М.А.¹

¹ ИЭМ РАН, Черногоровка oleg@iem.ac.ru; ² Геологический факультет МГУ, Москва; ³ Department of Geology, University of Johannesburg

Эксгумация докембрийских гранулитовых комплексов из нижней коры в ходе процессов коллизии и/или аккреции на границах кратонов записана в Р-Т трендах, которые включают обычно два этапа: субизотермическую декомпрессию и стадию декомпрессии-остывания с более пологим Р-Т трендом (напр. Harley, 1989). Данная работа преследует цель разобраться в возможных причинах изменения наклона Р-Т трендов эксгумации на примере метapelитов полиметаморфической Центральной зоны (ЦЗ) гранулитового комплекса Лимпопо (ЮАР), расположенного между кратонами Каапвааль и Зимбабве (van Reenen et al., 2019). Для этого исследованы породы из различных структурных позиций в пределах ЦЗ: купольных структур, региональных поперечных мегаскладок и зон сдвигово-пластических деформаций.

Метapelиты представляют собой гнейсы, в которых в той или иной мере перемежаются кварц-полевошпатовые участки, представляющие собой реликты лейкосом (Pl+Kfs+Qz+Grt+Bt), и меланократовые участки (Crd+Bt+Sil+Pl+Qz), часто маркирующие микрзоны пластических деформаций. Исследование полифазных (расплавных и флюидных) включений в гранате, его зональности в отношении главных (Mg, Fe, Ca) и микроэлементов (P, Cr, Sc), а также моделирование фазовых равновесий (PERPLE_X; Connolly, 2005) показывают, что породы сосуществовали с расплавами и водно-углекисло-солевыми флюидами ($a_{H_2O} = 0.74-0.58$) на пике метаморфизма в нижней коре при 800-850°C и 10-10.5 кбар. Частичное плавление послужило толчком для субизотермической эксгумации пород до давления 7.5-8 кбар в неоархее (2.65 – 2.62 млрд. лет). Это отражено в специфической зональности зерен граната по содержаниюgrossуляровой составляющей. В ходе эксгумации расплав был частично утрачен, а образование кордиерита за счет граната способствовало экстракции воды из расплава и, тем самым, его активной кристаллизации. Результирующее изменение реологии пород привело к тому, что дальнейшая эксгумация сопровождалась активацией зон пластических сдвиговых деформаций. Переход к твердофазным пластическим деформациям регулировал дальнейшую эксгумацию пород до давлений 6 – 5.5 кбар при участии флюидов. Этот этап выразился в изменении наклона Р-Т тренда от субизотермической декомпрессии к декомпрессионному охлаждению ~75°/кбар, отвечающему более медленному подъему пород в средней коре (<20 км). Этот процесс, возможно, возобновился благодаря термальному воздействию и взаимодействию пород с водными флюидами ($a_{H_2O} > 0.89$) в Палеопротерозое (~2.01 млрд. лет), что зафиксировано в U-Pb возрастах циркона, монацита и рутила.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 23-17-00066.

Литература:

- Connolly J.A.D. (2005) Computation of phase equilibria by linear programming: A tool for geodynamic modeling and its application to subduction zone decarbonation. *Earth Planet. Sci. Lett.* 236: 524-541.
- Harley S. L. (1989) The origins of granulites: a metamorphic perspective. *Geological Magazine* 126: 215-247.
- van Reenen D. D., Smit C. A., Perchuk A. L., Huizenga J. M., Safonov O. G., Gerya T. V. (2019). The Neoarchean Limpopo orogeny: Exhumation and regional-scale gravitational crustal overturn driven by a granulite diapir. *The Archaean geology of the Kaapvaal craton, southern Africa*, 185-224.

Признаки частичного плавления в мантийных ксенолитах из щелочных базальтов о-ва Жохова, Восточная Арктика: данные аналитической сканирующей электронной микроскопии

Силантьев С.А., Бадюков Д.Д., Ахметшин А.Г.

ГЕОХИ РАН, Москва, silantyevev@geokhi.ru

Остров Жохова расположен в восточной акватории Арктического бассейна и относится к архипелагу Де Лонга, в центральной части которого установлены проявления внутри-плитного магматизма, связанного, возможно, с молодым (0.4 млн.лет) мантийным плюмом (Silantyevev et al., 2004). Лавы щелочных оливиновых базальтов и лимбургитов о-ва Жохова выносят к поверхности мантийные ксенолиты шпинелевых перцолитов. Судя по петрологическим и изотопно-геохимическим данным (Silantyevev et al., 2004), эти ксенолиты представляют древний субстрат мало-глубинной мантии, не испытавший существенного плавления. Пять ксенолитов из образцов щелочных базальтов, отобранных на о-ве Жохова, были изучены с помощью сканирующего электронного микроскопа с полевым катодом (FEG SEM) TESCAN MIRA3, оборудованного энерго-дисперсионным спектрометром ULTIM MAX 100 (Oxford Instruments) под программным управлением Aztec 5.0 в ГЕОХИ РАН. Во всех изученных ксенолитах было установлено присутствие расплавных включений в виде стекла, которые по составу могут быть отнесены к двум группам: натровой ($4 \text{ масс.}\% \leq \text{Na}_2\text{O} \leq 10 \text{ масс.}\%$) и калиевой, в которой при низком содержании натрия ($\text{Na}_2\text{O} \leq 1 \text{ масс.}\%$) содержание K_2O варьирует от 8 до 16 масс. %. Результаты сравнительного анализа вариаций состава стекол обеих групп с составом вмещающих оливиновых базальтов и валовым составом шпинелевых перцолитов, также как морфологические особенности этих стекол, позволяют предполагать, что стекла натровой группы были образованы при магматическом взаимодействии ксенолитов с магматическим расплавом, родительским для вмещающих оливиновых базальтов. Аномально высокое содержание K_2O в стеклах калиевой группы и то обстоятельство, что, в отличие от стекол натровой группы, локализованных в меж-зерновом пространстве или в жильных обособлениях, они образуют разобщенные мелкие включения во вмещающих минеральных фазах, возможно, свидетельствуют о том, что эти стекла были образованы *in situ* при плавлении первичной калий содержащей фазы, которой, скорее всего являлся флогопит. Подобный механизм образования калий содержащих расплавов в мантийных ксенолитах шпинелевых перцолитов описан в ареалах внутри-плитного магматизма (например, Yaxley, Kamenetsky. 1999; Ashikhmin et al., 2018). Ассоциация щелочных базальтов и выносимых ими мантийных ксенолитов, установленная на о-ве Жохова, в петрографическом и геохимическом отношении очень напоминает аналогичный комплекс пород, распространенных в северо-западной части архипелага Шпицберген. Щелочные базальты, излившиеся из четвертичных вулканических центров Шпицбергена, выносят к поверхности ксенолиты мантийных перцолитов, в которых фиксируются признаки частичного плавления, напоминающие установленные в настоящем исследовании (Ashikhmin et al., 2018). Возможно, на значительной площади Арктического бассейна в пределах крупной магматической провинции HALIP устанавливаются признаки активизации молодого внутри-плитного магматизма, способствующего транспорту к поверхности вещества метасоматизированной малоглубинной мантии.

Литература

- Silantyevev S.A., Bogdanovskii O.G., Fedorov P.I., Karpenko S.F., Kostitsyn Yu.A. (2004) Intraplate magmatism of the De Long Islands: A response to the propagation of the ultraslow-spreading Gakkel Ridge into the passive continental margin in the Laptev Sea. Russian Journal of Earth Sciences. 6 (3): 1-31.
- Yaxley G.M., Kamenetsky V. (1999) Earth and Planetary Science Letters 172:97–109 www.elsevier.com/locate/epsl
- In situ origin for glass in mantle xenoliths from southeastern Australia: insights from trace element compositions of glasses and metasomatic phases Earth and Planetary Science Letters 172:97–109.
- Ashikhmin D.S., Skublov S.G., Melnik A.E., et al. (2018) Geochemistry of Rock-Forming Minerals in Mantle Xenoliths from Basalts of Sverre Volcano, Spitsbergen Archipelago. Geochemistry International 56 (8): 857–864.

Постмагматическая стадия формирования алмазов в кимберлитах

Симаков С.К.¹, Стегницкий Ю.Б.¹

¹Вилуйская ГРЭ, АК "АЛРОСА" (ПАО) 191036, г. Санкт-Петербург, Невский пр. 128-А оф. 412,
simakov1957@yandex.ru

На сегодняшний день большинство исследователей связывают образование алмазов с мантией. Однако, рядом исследователей кроме глубинных алмазных ассоциаций выделялась и малоглубинная стадия, связанная с образованием серпентина, кальцита, апатита и флогопита из собственно кимберлита [2]. Подтверждением ее является то, что абсолютный возраст алмазов варьирует от возрастов древней мантии до кимберлитового. В последние годы появились данные об образовании алмазов в серпентинитах и хромитах, относящихся к породам океанической коры [1, 3-6]. В работе [5] была показана возможность образования наноалмазов в серпентинитах в равновесии с лизардитом при температурах 150-300 °С и давлении около 2 кбар. Микроалмазы были открыты в хромитах в равновесии с антигоритом при температурах 350-650 °С и давлениях 0,1-1,6 ГПа, при этом высокобарических минералов в этих породах не было [3,4]. Во флюидных включениях алмазов северо-востока Сибирской платформы и россыпей Урала был диагностирован широкий спектр органики по составу сходной с органикой из серпентинитов океанической коры [7,8]. Проведенные минералого-петрографические исследования кимберлитовой трубки в Анголе в ходе производственных работ выявили связь алмазоносности с содержанием антигорита.

Таким образом, вышеперечисленные данные позволяют выделить постмагматическую стадию формирования алмазов в кимберлитах для условий малоглубинной верхней мантии и земной коры, связанной со вторичным минеральным образованием.

Литература:

1. Галимов Э.М., Каминский Ф.В. Алмазы в океанической литосфере. Вулканические алмазы и алмазы в офиолитах // *Геохимия*. 2021. Т. 66. № 1. С. 3-14.
2. Гаранин В.К., Кудрявцева Г.П., Марфунин А.С., Михайличенко О.А. Включения в алмазе и алмазоносные породы. М.: МГУ, 1991. 240 с.
3. Farre-de-Pablo J., Proenza J.A., Gonzalez-Jimenez J.M. et al. A shallow origin for diamonds in ophiolitic chromitites // *Geology*. 2018. Vol. 47. № 1. P. 75-78.
4. Pujol-Sola N., Garcia-Casco A., Proenza J.A. et al. Diamond forms during low pressure serpentinisation of oceanic lithosphere // *Geochemical Perspective Letters*. 2020. Vol. 15. P. 19-24.
5. Simakov S.K., Kouchi A., Mel'nik N.N. et al. Nanodiamond finding in the Hyblean shallow mantle xenoliths // *Scientific Reports*. 2015. Vol. 5. № 10765.
6. Simakov S., Scribano V., Melnik N. et al. Nano and Micro Diamond Formation in Nature Ultrafine Carbon Particles on Earth and Space. *Springer Briefs in Earth Sciences*. 2023. 132 p.
7. Sobolev N.V., Tomilenko A.A., Bul'bak T.A. et al. (2019) Composition of hydrocarbons in diamonds, garnet, and olivine from diamondiferous peridotites from the udachnaya pipe in Yakutia, Russia. *Engineering*. 2019. Vol. 5. P. 471–478.
8. Sobolev N.V., Logvinova A.M., Tomilenko A.A. et al. (2019b) Mineral and fluid inclusions in diamonds from the Urals placers, Russia: evidence for solid molecular N₂ and hydrocarbons in fluid inclusions. 2019. *Geoch Cosm Acta*. Vol. 266. P.197–219.

Методы оценки потенциальной алмазности кимберлитов и родственных пород на основе расчета C-H-O флюидов по составу ксенокрит

Симаков С.К.¹, Стегницкий Ю.Б.¹

¹Вилуйская ГРЭ, АК "АЛРОСА" (ПАО) 191036, г. Санкт-Петербург, Невский пр. 128-А оф. 412, simakov1957@yandex.ru

В настоящее время в производстве для оценки потенциальной алмазности кимберлитов и родственных им пород в основном используются методы оценки по пиропу, хромшпинелиду, клинопироксену и ильмениту. Наиболее распространенными являются Ca-Cr пироповые методы оценки по Соболеву и Герни [5,6]). Однако, как показывает практика, эти минералогические критерии работают не для всех объектов. В разных алмазных субпровинциях мира отмечается несоответствие между установленной опробованием и оцениваемой по минералогическим критериям алмазностью. В этой связи очевидна актуальность разработки новых критериев оценки потенциальной алмазности кимберлитов.

В последнее время ряд исследователей на основе минералогических исследований приходят к заключению, что образование алмазов в верхней мантии связано в основном с флюидами [1,10,11]. Физико-химические модели по образованию алмазов из флюидов в условиях мантии известны давно. И.Д.Рябчиковым была предложена физико-химическая модель, согласно которой, наиболее благоприятными составами для образования алмазов являются водные [2]. Они имеют минимальные содержания углерода и таким образом соответствуют максимальной возможности образования свободной фазы углерода (графита или алмаза) из флюида. Это соответствует, с одной стороны, процессам восстановления CO₂, с другой – окислению углеводородов. Двууглекислые флюиды являются неблагоприятными для образования углерода, так как в этих условиях он превращается в CO₂ и при большем окислении - в карбонаты.

Для оценки состава флюидов в кимберлитах и мантийных перидотитах используются кислородные барометры (фугометры или оксометры), на основе минеральных равновесий с участием граната, включающих обмен Fe²⁺ и Fe³⁺ [7,8]. На их основе был разработан пироповый оксометр, применимый для ксенокрит из кимберлитов и кимберлитоподобных пород [3]. Аналогичные оксометры были разработаны для ксенокрит хромшпинелидов и ильменита [4, 9].

Проведённые расчёты составов C-O-H флюидов по данной методике показали, что алмазные ксенолиты и включения в алмазах соответствуют существенно водным составам флюида с низким содержанием атомарного углерода. и таким образом соответствуют максимальной возможности образования и сохранности алмаза из природных флюидов при данных условиях. На диаграмме C-O-H их средние составы смещены в восстановительную водородную область, в то время как неалмазные ксенолиты смещены в область двууглекислых флюидов. Таким образом на диаграмме C-O-H можно выделить "алмазную флюидную область", перекрывающуюся со средними составами флюидов извлеченных из алмазов. Расчёты по имеющимся данным для пиропов из 10 крупнейших по запасам кимберлитовых трубок мира показывают, что все они лежат в алмазной флюидной области водных составов флюидов.

Тестирование данной методики для пироповых ксенокрит из известных алмазных и неалмазных 38 африканских и якутских трубок (всего более 9000 анализов) показало, что на диаграмме C-O-H алмазные трубки находятся в основном в области водных флюидных составов соответствующих алмазной области [9]. Данный метод успешно ранжирует южно-африканские, ангольские и канадские кимберлитовые трубки по потенциальной алмазности. При этом коэффициент корреляции Пирсона (r) между содержанием алмазов и расчетным по данной методике атомарным составом флюида соответствует интервалу в 0,433-0,476, что значительно выше коэффициентов корреляции по Ca-Cr-вым пироповым методам (0.1 и 0.22 соответственно по Соболеву и Герни [5,6]).

Таким образом, посредством данного метода можно выполнять ранжирование кимберлитовых пород и ореолов рассеяния МСА по степени их потенциальной алмазности, нацеливая поиски на заведомо алмазные объекты.

Литература:

1. Похиленко Н.П. и др. Взаимоотношения карбонатитового метасоматоза деплетированных перидотитов литосферной мантии с алмазообразованием и карбонатит- кимберлитовым магматизмом // Геология и геофизика. 2015. т.56. № 1–2. С.361-383.
2. Рябчиков И.Д. Природа кимберлитовых "магм" // Геология рудных месторождений. 1980. 1980. № 6. С. 18-26.
3. Симаков С.К. Модель гранатового оксиметра для мантийных перидотитов и оценка потенциальной алмазности на его основе // Доклады Академии Наук. 2013, т. 448. № 4. С.443-445.
4. Симаков С.К. Расчет равновесного C-O-H флюида для ильменитовых ксенокрит и оценка потенциальной алмазности на его основе. Доклады Академии Наук. 2014. т. 458. № 3. с.333 - 335.

5. Соболев Н.В. Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. Новосибирск: Наука, 1974. 264 с.
6. Gurney J.J., Glover J.E., Harris P.G. A correlation between garnets and diamonds, kimberlite occurrence and origin: a basis for conceptual models in exploration. Geology Department, University Extension, University of Western Australia, 1984. publ 8. P.143–166
7. Simakov S.K. Redox state of Earth's upper mantle peridotites under the ancient cratons and its connection with diamond genesis // *Geoch Cosm Acta*. 1998. Vol. 62. P. 1811-1820.
8. Simakov S.K. Redox state of eclogites and peridotites from sub-cratonic upper mantle and a connection with diamond genesis // *Contrib Mineral Petrol* 2006. Vol. 151. P. 282-296.
9. Simakov S.K., Stegnitskiy Yu. A new pyrope-based mineralogical-petrological method for identifying the diamond potential of kimberlite/lamproite deposits // *Ore Energy Res Geol* 2021. Vol.7. 1000
10. Sobolev N.V., Tomilenko A.A., Bul'bak T.A., Logvinova A.M. Composition of Hydrocarbons in Diamonds, Garnet, and Olivine from Diamondiferous Peridotites from the Udachnaya Pipe in Yakutia, Russia. // *Engineering*. 2019. Vol. 5. P. 471–478.
11. Stachel T., Luth R.W. Diamond formation – Where, when and how? // *Lithos*. 2015. Vol. 220-223. P. 200-220.

Неоархейская надсубдукционная система (на примере Костомукшского зеленокаменного и Вокнаволоцкого гранулитового комплексов Карелии)

Слабунов А.И.¹, Максимов О.А.¹, Сибелев О.С.¹

¹ИГ КарНЦ РАН, Петрозаводск slabunov@krc.karelia.ru

Современные надсубдукционные островодужные системы состоят из (а) магматических камер и связанных с ними метаморфических комплексов в средней части земной коры, (б) и вулканических построек на поверхности (Перчук, 1993; Складчиков и др., 2001).

В центральной части Карельского кратона располагается Костомукшский зеленокаменный пояс (КЗП). В его составе выделяется мезоархейский (2.87-2.79 млрд лет (Ga)) комплекс из базальтов, коматиитов, кислых вулканитов (контокская серия) и неоархейский (2.76-2.74 Ga, Слабунов и др., 2021), состоящий из флиша граувакки, кислых вулканитов и полосчатых железистых кварцитов (BIF) (гимольская серия). Следует отметить, что КЗП вмещает крупнейшее месторождение железных руд на СЗ России. Субвулканические тела риолитов, залегающие среди флиша гимольской серии, имеют, по-видимому, фациальные аналоги секущие образования контоксской серии. По ряду геохимических характеристик они имеют черты сходства как с вулканитами адакитовой (Sr/Y – около 350), так и известково-щелочной серий. При этом они обеднены Nb (Th>Nb<La), что характерно для субдукционных вулканитов. Параллельно с этими вулканитами формируется и флиш из разрушающихся вулканитов и, вероятно, гранитоидов. Такие осадки могут формироваться в бассейнах субдукционной системы, в которых была высокая гидротермальная активность, что предопределило формирование в них железосодержащих хемогенных осадков – BIF. Таким образом, в КЗП сохранились фрагменты неоархейской вулканической островодужной постройки: вулканические центры и осадки, по-видимому, преддугового бассейна.

К северо-западу от КЗП располагается Вокнаволоцкая структура, сложенная одноименным гранулитовым комплексом (ГК), который отделяется от КЗП зоной разломов. Основу ГК составляют эндебиты и основные гранулиты. При этом в составе ГК можно выделить два возрастных подкомплекса: ранний (2.76-2.74 Ga) и поздний (2.716-2.704 Ga). Время формирования ранних эндебитов установлено по цирконам (SHRIMP-II) в 2761 ± 15 млн лет (Ma), что хорошо согласуется с результатами датирования этих пород другими исследователями 2744 ± 9 Ma (Самсонов и др., 2001). Время формирования поздних эндебитов – 2716 ± 9 Ma (Костомукшский..., 2001), а основных гранулитов – в 2704 ± 9 Ma.

Эндебиты-1 по петрогеохимическим особенностям отвечают гранитам островодужного типа и, вероятно, формировались в краевых частях надсубдукционной магматической камеры одновременно с вулканитами гимольской серии КЗП.

Гранулиты ГК встречаются в виде ксенолитов в эндебитах и представлены двупироксен-амфиболовыми, реже двупироксеновыми кристаллическими сланцами. Параметры их становления оцениваются: $P = 6-7$ кбар и $T = \sim 750^\circ\text{C}$ – для основных гранулитов (двупироксен-амфиболовых кристаллических сланцев) и $P = 4-5$ кбар и $T = \sim 750^\circ\text{C}$ – для эндебитов. В ходе аккреции эндебиты и гранулиты разгнейсовывались и преобразовывались в условиях амфиболитовой фации в гнейсы и амфиболиты, соответственно.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 22-17-00026).

Литература

Костомукшский рудный район (геология, глубинное строение и минерализация). (2015). Горьковец В.Я., Шаров Н.В. (Отв. ред.). Петрозаводск: КарНЦ РАН. 322 с.

Перчук Л.Л. (1993). Магматизм, метаморфизм и геодинамика. М.:Наука.. 188 с.

Слабунов А.И., Нестерова Н.С. и др. (2021) Геохимия, геохронология цирконов и возраст архейской железорудной толщи Костомукшского зеленокаменного пояса Карельского кратона Фенноскандинавского щита. Геохимия. 66 (4): 291-307.

Самсонов А.В., Берзин Р.Г. и др. (2001) Процессы формирования раннедокембрийской коры Северо-Западной Карелии, Балтийский щит: результаты геологических, петрологических и глубинных сейсмических (профиль 4В) исследований. Глубинное строение и эволюция земной коры восточной части Фенноскандинавского щита: профиль Кемь – Калевала. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 109–143.

Складчиков Е.В. (ред) (2001) Метаморфизм и тектоника. М: Интермет Инжиниринг. 216 с.

Типичные текстуры свежих базальтов любых геотектонических обстановок - ультратонкопористые

Спиридонов Э.М., Ладыгин В.М., Соколов В.Н., Чернов М.С., Фролова Ю.В.

Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, ernstspiridon@gmail.com

Базальты – наиболее распространённые вулканиты нашей планеты. На дне океанов и на континентах развиты толеитовые базальты, их расплавы содержали небольшое количество летучих компонентов, в основном воды. На океанских островах и в континентальных рифтах глубокого заложения преобладают щелочные оливиновые базальты, их расплавы содержали заметное количество летучих компонентов, в основном углекислоты. В современных вулканических дугах, окружающих огненным кольцом Тихий океан, преобладают высокоглинозёмистые базальты (и андезиты); их расплавы были водонасыщенными. Расплавы и тех, и других, и третьих внедрялись сквозь сухие или насыщенные водой толщи, изредка сквозь рассолы, изливались и извергались в воздушную и в водную среду, на сухие и на влажные грунты. В соответствии с разнообразием обстановок и скорости излияний и извержений менялись условия и характер фрагментации (или её отсутствия) и кристаллизации базальтовых расплавов, их вязкость, количество выделявшихся газов, количество, размер и форма газовых пустот. Наши наблюдения показали, что **свежие базальты любых геотектонических обстановок и любого состава – ультрамикropористые**. Количество тончайших пор – грандиозное, даже в «сухих» толеитах (рисунок).

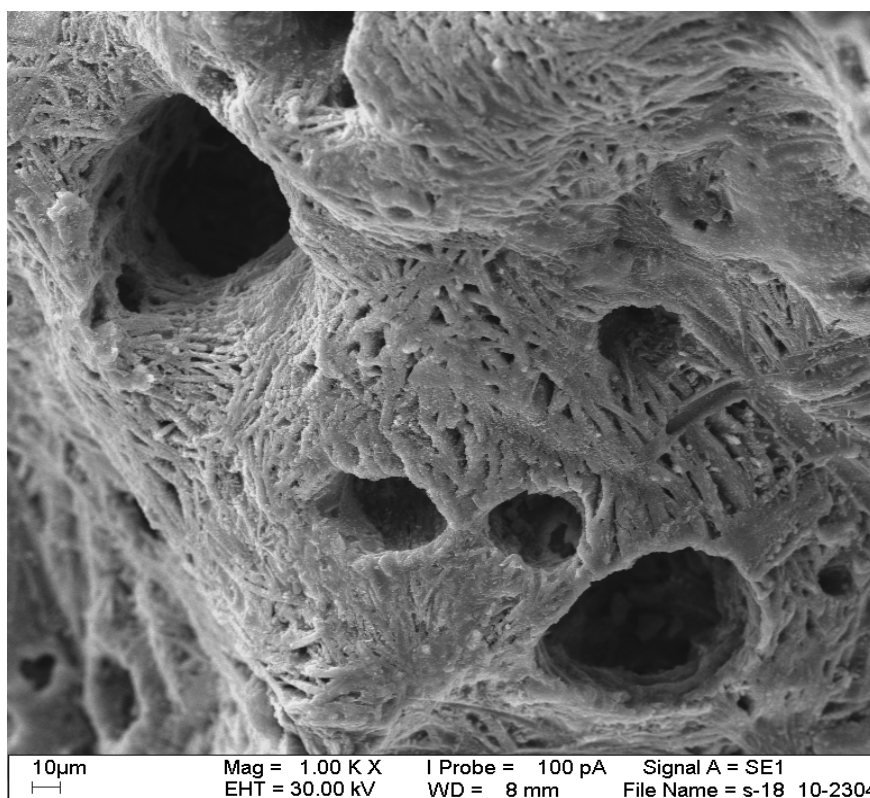


Рисунок. Толеитовые базальты дна Атлантического океана у о. Буве с ультрамикropористой текстурой.

В этом причина несравнимого с интрузивными породами масштаба эпигенетических преобразований вулканических горных пород (вторичные кварциты, пропилиты, аргиллизиты, цеолититы, яшмы, агаты...).

Литература:

Ладыгин В.М., Соколов В.Н., Спиридонов Э.М., Фролова Ю.В., Чернов М.С. Новые данные о поровом пространстве в четвертичных базальтах различных геодинамических обстановок. В кн.: Вулканизм и связанные с ним процессы. Петропавловск-Камчатский. 2016. С. 114-118.

Петрогенетическая схема Н.Л. Боуэна и акцессорные минералы Cr, Ti, Zr, REE, Y. Армолколит и продукты его превращений

Спиридонов Э.М.¹, Овсянников Г.Н.¹, Филимонов С.В.¹, Кравченко С.М.², Семиколенных Е.С.³, Путинцева Е.В.³, Тевелев Арк.В.¹, Шалимов И.В.¹, Лысенко В.И.⁴

¹МГУ, Москва, ernstspiridon@gmail.com, ²ИМГРЭ, Москва, ³СПбГУ, Санкт-Петербург, lputinseva@mail.ru, ⁴Севастопольский филиал МГУ, Севастополь

Для большинства не щелочных магматических пород последовательность кристаллизации отвечает петрогенетической схеме Н.Д. Боуэна (Боуэн, 1934; Барт, 1956 и мн. др.). Нами это установлено для островодужного габброидного первомайско-аюдагского интрузивного комплекса мезозойд Горного Крыма. Состав его горных пород варьирует от преобладающих анортит-битовнитовых гиперстен-авгитовых габбро-норит-долеритов (от оливиновых до кварцевых) до кумулятивных плагиолерцолитов и до кварцевых габбро-диоритов и кварцевых диоритов с шлирами и жилами гранодиоритов, плагиогранитов и гранофировых гранитов (Кравченко, 1958; Спиридонов и др., 1990, 2016, 2019, 2022). Минеральные ассоциации пород даны на рисунке. Таким образом, схема Н.Л. Боуэна дополнена акцессориями Cr, Ti, Zr, REE, Y.



Рисунок. Красные цифры – хромистость шпинелидов, стрелки – эволюция их состава. Чёрные цифры – содержание анортита в плагиоклазе, стрелки – эволюция его состава.

Установлено широкое распространение в интрузивных базитах армолколита $(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+})(\text{Ti}, \text{Fe}^{3+})_2\text{O}_5$ (Спиридонов и др., 2019). Те незначительные количества Zr, REE, Y, которые были в расплаве, входят в состав армолколита, который устойчив при низкой $f\text{O}_2 = \text{IW}$. Поэтому, обычно армолколит неустойчив и превращается в Mg ильменит, ильменит с ламеллями бадделейта, с обособлением бадделейта, цирконолита, чевкинита, перрьерита. Этим и объясняется наличие в низко щелочных габброидах Крыма, Норильского региона и иных – бадделейта, цирконолита и чевкинита, - минералов щелочных магматитов.

Литература:

Спиридонов Э.М., Семиколенных Е.С. и др. (2019) Армолколит-содержащие островодужные плагиолерцолиты и оливиновые габбро-нориты Балаклавы, Горный Крым. Вестник МГУ. Геология. № 3. С. 51-60.

Траппы и кимберлиты раннего протерозоя Северного Прионежья (Карелия), метаморфизованные в условиях цеолитовой и пренит-пумпеллиитовой фаций

Спиридонов Э.М.¹, Путинцева Е.В.², Лавров О.Б.³

¹МГУ, Москва, ernstspiridon@gmail.com, ²СПбГУ, Санкт-Петербург, lputintseva@mail.ru,

³Институт геологии Карел. филиала РАН, Петрозаводск, petrlavrov@list.ru

Древнейшие в России - 1.92 млрд. лет кимберлиты Кимозеро (Северное Прионежье) занимают закономерное положение в истории геологического развития восточной части Балтийского щита Русской платформы, - после трапповой формации людиковия и ранее «древнего красного песчаника» шокшинской серии велесья. Характер и степень регионального метаморфизма трапповой формации и шунгитоносной толщи палеопротерозоя - людиковия Северного Прионежья отвечают низкоградному метаморфизму погружения в условиях цеолитовой фации ЦФ и пренит-пумпеллиитовой фации ППФ. Древнейшие в России агаты сохранились в метабазах ЦФ с ломонитом в небольших «термальных синклиналиях». Окружающие метабазациты ППФ включают метаагаты с пумпеллиитом (рис.) и гнездами пренита.

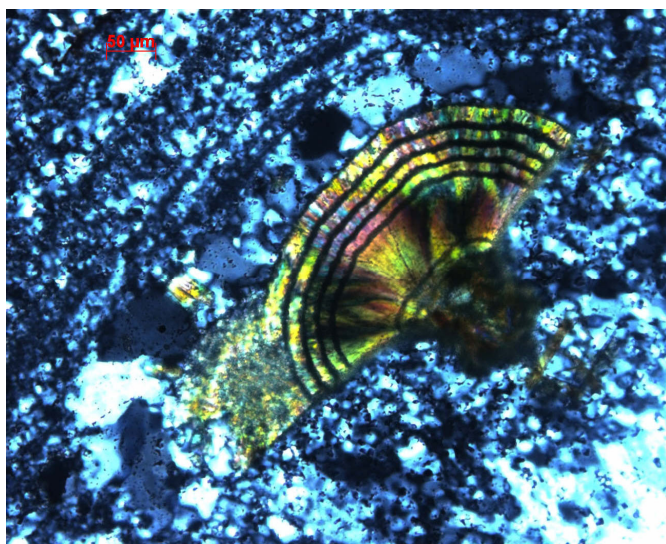


Рис. Сферокристалл пумпеллиита-Fe в метаагатах ППФ. В прох. свете, николи Х. Пингуба. Фото ЭМС

Характер и степень метаморфизма кимберлитов Кимозеро соответствуют метапородам людиковия рамы. Зеленокаменно изменённые кимберлиты Кимозеро – петротип метакимберлитов ППФ. Они заместили метакимберлиты ЦФ с лизардитом. Антигоритовые метакимберлиты ППФ возникли за счёт кимберлитов, бедных магматическим кальцитом. Тремолит - актинолитовые метакимберлиты ППФ возникли за счёт кимберлитов, богатых магматическим кальцитом. При метаморфизме кимберлитов в условиях ППФ произошла полная мобилизация лантанидов, возникла масса их собственных минералов: алланит-(Ce), гидроксилбастнезит-(Ce) и –(La), гидроксилпаризит-(Ce) и –(La), бастнезит-(Ce) и –(La), паризит-(Ce) и –(La), монацит-(Ce), ниобозинит-(Ce). Поэтому, изохронная Sm/Nd датировка 1.76 млрд. лет отвечает не возрасту внедрения кимберлитов Кимозеро, а возрасту их метаморфизма. Кроме того, при этом возникли своеобразного облика и состава метаморфогенно-гидротермальные циркон и бадделейт

Литература:

Путинцева Е.В., Спиридонов Э.М. (2016) Древнейшие в России алмазоносные кимберлиты и метакимберлиты Кимозера, Карелия. Тр. Минерал. музея РАН им. А.Е. Ферсмана. Вып. 51. С. 62-94.
Спиридонов Э.М., Путинцева Е.В., Лавров О.Б. и др. (2018). Петля регионального метаморфизма Л.Л. Перчука: низкоградные варианты. В кильватере большого корабля: современные проблемы магматизма, метаморфизма и геодинамики. Черноголовка, ИЭМ РАН: С. 71-72.

Взаимодействие термобарических и петрохимических процессов при формировании коровых эклогитов

Федькин В.В.

*Институт экспериментальной минералогии им. ак. Д.С.Коржинского РАН, Черноголовка
vfedkin@iem.ac.ru),*

Когерентные (взаимосвязанные) процессы метаморфической и метасоматической эволюции коровых эклогитов рассматриваются в комплексах разной глубинности – Максютловском на Южном Урале и Атбашинском на Южном Тянь-Шане. Оба комплекса входят в систему внутриконтинентального герцинского Урало-Монгольского складчатого пояса, имеют близкие температурные и возрастные границы, но различаются по уровню глубинности, характеру метаморфизма и геодинамической позиции. Более глубинный Максютловский комплекс, формировался в рифтогенной зоне в области устойчивости алмаза и коэсита при $P=3,0-3,2$ ГПа (Dobretsov et al., 1996; Beane, Leech, 2007; Федькин, 2020). Атбашинский террейн умеренного давления образовался в островодужной обстановке, в области стабильности парагенезиса Ab-Jd-Qz при $P=1,2-1,4$ ГПа (Соболев, Шацкий, 1986; Котова, 1989; Федькин, 2004). Комплексы имеют близкое литологическое строение. В их пределах выделяются характерные структурно-вещественные единицы: нижняя «субконтинентальная» эклогит-голубосланцевая, высокого давления и верхняя метаофиолитовая, состоящая из пород океанической коры: метаграувакков, серпентинитов, мраморов и метабазальтовых пород.

Взаимосвязь сопряженных метаморфических и метасоматических процессов определяется особенностями метаморфической эволюции комплексов и проявляются, как правило, на ретроградном этапе их развития. В Максютловском комплексе метасоматические изменения на ранних стадиях регрессивного развития затруднены из-за пульсационного 4-х этапного характера метаморфизма и высокой плавучести погружаемой пластины (Федькин, 2020). Первые признаки метасоматоза проявляются в минеральных преобразованиях: в замещении граната и пироксена цоизитом и глаукофаном, в образовании лавсонитовых базальтов, появлении родингитов, серпентинитового меланжа, карбонат-содержащих, актинолитовых и хлоритовых сланцев. В Атбашинском террейне активная фаза метасоматоза совпадает с инверсией РТ тренда метаморфизма с проградного на ретроградный (Котова, 1989; Федькин, 2004). При этом базитовая и офиолитовая части комплекса существенно различаются по набору подвижных элементов: более основных (Mg, Fe, Al) для эклогитов и других базитовых пород, и более легких (Ca, K, Na, Al, Si) – для офиолитоподобных образований.

Финальный этап эволюции комплексов связан с волной кислотного выщелачивания, которая на фоне регрессивного метаморфизма вызывает интенсивную мусковитизацию и окварцевание пород. Видимый процесс активной глаукофанизации пород комплексов не связан с существенным привнесом натрия, а вызван перераспределением Ca и Na среди других минералов. Отсутствие классической метасоматической зональности связано с

Работа выполнена в рамках Госзадания FMUF-2022-0004, рег. № 1021051302305-5-1.5.2; 1.5.4 и Программы Фулбрайт ИМО, гранты 2011 и 2015г.

Литература:

- Котова Л.С. (1989) Петрохимическая эволюция эклогит-глаукофансланцевого комплекса хребта Атбаши (Южный Тянь-Шань). // В сб. Геохимия магматических и метаморфических образований Тянь-Шаня. Фрунзе: Илим. С. 110-127.
- Соболев Н.Ш., Шацкий В.С. (1986) Проблемы генезиса эклогитов метаморфических комплексов. // Геология и геофизика. № 9.
- Федькин В.В. (2004). Минералогическая геотермобарометрия в развивающихся метаморфических системах. // В сб. «Экспериментальная минералогия: некоторые итоги на рубеже столетий». М. Наука. Т. 2, С. 172-187.
- Федькин В.В. (2020) Четыре эпизода термальной эволюции эклогитов Максютловского комплекса (Южный Урал). // Геология и Геофизика, 2020. Т. 61. С. 666-684.
- Beane, R.J., Leech, M.L. The Maksyutov Complex: The first UHP terrane 40 years later. // Geol. Soc. Am. Spec. Paper. 2007. V. 419. P. 153–169.
- Dobretsov, N.L., Shatsky, V.S., Coleman, R.G., Lennykh, V.I., Valizer, P.M., Liou, J.G., Zhang, R., and Beane, R.J. 1996 Tectonic setting of ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Maksyutov Complex, Ural Mountains, Russia. // Intern. Geology Review. V. 38. P. 136-160.



**ИНСТИТУТ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
МИНЕРАЛОГИИ**
имени академика Д.С. Коржинского
Российской академии наук

Отделение наук о Земле РАН

**СЕКЦИЯ ГЕОЛОГИИ, ГЕОФИЗИКИ,
ГЕОХИМИИ И ГОРНЫХ НАУК**



**Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации**

ISBN 978-5-6041841-9-6

