На правах рукописи

Hypress

КУЗНЕЦОВ Григорий Владимирович

Динамика метасоматического преобразования пород литосферной мантии под вулканами Авачинско-Корякской группы (Камчатка)

25.00.04 - «петрология, вулканология»

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук

Новосибирск - 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН)

Научный руководитель:

Шарапов Виктор Николаевич, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник ИГМ СО РАН, профессор Новосибирского Государственного Университета, Новосибирск

Официальные оппоненты:

Антонов Андрей Юрьевич, доктор геолого-минералогических наук, Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ

Мананков Анатолий Васильевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор Томского Государственного Университета, Томск

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск

Защита состоится 09 ноября 2018 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 003. 067. 03, созданного на базе ФБГУН Института геологии и минералогии имени В.С. Соболева СО РАН, в большом конференц-зале

Адрес 630090, г. Новосибирск, проспект академика Коптюга 3. Факс: (383) 333-27-92; e-mail: turkina@igm.nsc.ru

С диссертацией можно ознакомится в библиотеке института и на сайте ИГМ СО РАН. (адрес сайта http://www.igm.nsc.ru, раздел «Образование»)

Автореферат разослан 2 октября 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, доктор геол.-мин. наук

О.М. Туркина

введение

Актуальность работы. Вулканические дуги западных окраин Тихого океана характеризуются проявлением «Si-Ca-Mg метасоматоза» ультрабазитовых пород литосферной мантии шпинелевой фации (Arai et al., Комплекс изменений, вызванных 2003). флюидами, наиболее полно представлен в ультрабазитовых ксенолитах, вынесенных лавами Авачинского вулкана на Камчатке (Ishimaru et al., 2011). Существуют различные точки зрения на образование данных пород и фиксируемые в них изменения: 1) обломки плутонических пород из области перехода «кора-мантия» (Колосков, 1999). 2) пролукты инфильтрационного метасоматического изменения гарцбургитовых пород мантийного клина при воздействии потоков водных флюидов из субдуцируемой плиты (Arai et al., 2003; Ishimaru et al., 2007), 3) метасоматоз гарцбургитовых пород мантийного клина при воздействии магматических расплавов из различных очагов (Halama et al., 2009; Ionov et al., 2009), 4) обломки пород кумулусных зон глубинных расслоенных базитовых интрузий (Добрецов и др., 2017). Актуальность защищаемой диссертации определяется решением дискуссионной проблемы генезиса и особенностей метасоматоза ультрабазитов Авачи. В представленной работе также исследовано не описанное ранее явление «трещинного» сублимирования минералов ксенолитов, связанное с возникновением локальных сейсмогенных флюидных систем.

Цели и задачи исследования. Цель работы – объяснить вещественные и структурно-минералогические особенности ультрабазитовых ксенолитов. оценить физико-химические условия проявления флюидного инфильтрационного метасоматоза и численно исследовать модель развития метасоматоза ультраосновных пород литосферной мантии под Авачинским вулканом при воздействии на них разноглубинных флюидных потоков постоянного и переменного состава на уровне шпинелевой фации глубинности T=600-1200°C. На основании изучения в интервале шести сотен ультрабазитовых ксенолитов Авачи рассмотрены модели неизотермической преобразования ультрабазитов инфильтрационными линамики потоками флюидов из магматогенных и метаморфогенных источников в сейсмоактивной области литосферы.

1

Для достижения обозначенной цели решался следующий комплекс задач:

1) оценка геологических и тектонофизических условий развития метасоматоза и частичного конвективного плавления в верхнемантийном протолите под Авачинским вулканом (Камчатка),

2) исследование текстур и структур ксенолитов, определение химического состава первичных и вторичных минералов, расплавных включений и интерстиционных стекол,

3) оценка составов и P-T характеристик флюидов путём изучения включений в минералах всех установленных процессов преобразования исходных гарцбургитовых пород,

4) численное моделирование процессов минералообразования для диапазона Т =1000-1300°С и глубин 50-120км, при котором могли протекать процессы инфильтрационного флюидного метасоматоза в породах литосферной мантии над возможными магматическими источниками флюидов,

5) проверка результатов численного моделирования на основе постановки физических экспериментов, имитирующих воздействие восстановленных потоков горячих газов на реальные ультрабазиты. Также отделение летучих компонентов из расплава, образующихся при полном плавлении исследованных пород в вакуумной камере с использованием в качестве нагревателя пучка электронов высокой плотности.

Научная новизна. Впервые в рамках модели неизотермического инфильтрационного метасоматоза исследована линамика развития метасоматических полного спектра разноглубинных колонок для магматогенных и метаморфогенных источников флюидов в литосферной активными вулканами сейсмофокальной Камчатки. мантии под зоны Экспериментально проверены флюидного преобразования модели ультрабазитовых пород как при конвективном тепломассопереносе внешним потоком восстановленных газов, так И переотложение петрогенных компонентов в локальных сейсмогенных флюидных системах.

Положения, вынесенные на защиту:

I Метасоматизированные ультрабазитовые ксенолиты из эксплозивных извержений Авачинского вулкана по минералого-петрографическим особенностям относятся к мантийным породам из деплетированной литосферной мантии в области шпинелевой фации глубинности.

2

П Ксенолиты содержат структурно-минералогическую информацию о протекании в тектонизированной литосфере многостадийных процессов жильно-трещинного инфильтрационного метасоматоза и слабо проявленного плавления. Метасоматическое преобразование тектонизированной гарцбургитовой матрицы сопряжено с воздействием в интервале температур от 330 до 960°С потоков газово-жидких флюидов, привносивших из глубинных магматических очагов петрогенные компоненты: Si и Ca и в меньших количествах Al, Na, K при активном участии галогенидов (хлора). Кислородный потенциал флюидов менялся от восстановленных в начале, до окисленных в конце процесса метасоматоза.

В целом процесс инфильтрационного метасоматоза и локального плавления мантийных гарцбургитов происходит по схеме:

OI I + Opx I + водно-солевые растворы → образование Opx II
локальное плавление вторичного ортопироксена и кристаллизация жил состава Cpx + интерстиционное стекло → рост в трещинах огранённых кристаллов Amph + стекло по схеме «газовая фаза – жидкая пленка – кристалл»
эксплозивный вынос обломков андезибазальтовым расплавом с

образованием вспененных пленок кислого стекла.

III Теоретические и экспериментальные данные позволяют предполагать, что под вулканами в литосферных ультрабазитах в интервале глубин 30 – 70км и температурах выше 600°С протекают процессы их метасоматического преобразования и частичного плавления, а также в зонах развития кратковременных сейсмогенных флюидных систем по возникающим трещинам реализуется локальное сублимирование минералов и переотложение петрогенных компонентов.

<u>Теоретическая значимость.</u> Впервые количественно исследованы физико-химические условия развития минералогических фаций в зональных метасоматических колонках, образующихся над магматическими камерами и метаморфогенными источниками флюидов в деплетированных ультрабазитовых породах под современными вулканами. Оценена возможность реализации ранее не описанного процесса сублимирования минералов в области развития локальных сейсмогенных флюидных систем под Авачинским вулканом.

<u>Практическая значимость.</u> Изучение начальных стадий формирования флюидо-магматических систем позволяет развивать количественные модели, где в результате отделения и сегрегации расплавов образуются магмы, формирующие малоглубинные интрузии, генерирующие месторождения порфировой формации.

<u>Апробация работы и публикации.</u> По теме диссертации опубликовано 4 научных статьи в журналах, входящих в список ВАК. Результаты работы докладывались на четырёх совещаниях.

<u>Структура и объём работы</u>. Работа состоит из Введения, шести глав и Заключения общим объёмом 117 страниц, включает в себя 103 рисунка и 13 таблиц. Диссертация содержит 14 Приложений объёмом 45 страниц. Список литературы содержит 135 наименований.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю В.Н. Шарапову за совместную работу, а также сотрудникам лаборатории № 213 ИГМ СО РАН Ю.В. Перепечко, К.Э.Сорокину. Благодарность сотруднику ДВО РАН С.Н. Рычагову за геологические экскурсии на Авачинский вулкан. Р.Л. Дунину-Барковскому, М.П. Гора, С.З. Смирнову и А.Я. Шевко за предоставленные коллекции ксенолитов ультрабазитов, А.А. Томиленко, С.В. Ковязину и Т.Ю. Тиминой за совместные исследования включений в минералах, А.Т. Титову и М.В. Хлестову за работу на сканирующем микроскопе. Ю.П. Колмагорову, обеспечившему определение микропримесей в минералах методом РФА-СИ. Создателю программного комплекса СЕЛЕКТОР К.В. Чудненко. Сотруднику ИТФ СО РАН В.А. Фалееву за проведение экспериментов по нагреванию ксенолитов потоками горячих газов. Сотрудникам ИЯФ СО РАН Ю.И. Семенову и П.В. Логачеву за проведение экспериментов на уникальном оборудовании. Э.В. Сокол за критические замечания по содержанию диссертации. Особую признательность автор выражает А.В Колоскову, который поддержал идею выполнения реализованного в диссертации проекта при постановке исследований.

Глава 1 МЕТОДИКИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ КАМЕННОГО МАТЕРИАЛА

Глава посвящена использованным в работе методам: 1) Анализ структурной и тектонофизической обстановки развития вулканизма Камчатки на основе дешифрирования изображений Google Earth с использованием ПК GIS-ENDDB (Михеева, 2016), а также обработка сейсмологических данных входящих в этот комплекс. 2) Проведение экспериментальных исследований изучение частичных выплавок ультрабазитов путём нагревания кубиков породы потоком восстановленных газов на пилотной установке ИТФ СО РАН (аналитик В.А. Фалеев), изучение отделения флюидов при полном плавлении пород потоком электронов высокой плотности на установке ИЯФ СО РАН (аналитик Ю.И. Семенов). 3) В аналитическом центре ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) определены химические составы минералов, стёкол расплавных включений на сканирующих электронных микроскопах LEO1430VP и TESCAN MIRA 3. Там же определен валовой химический состав пород и отдельно минералов методом РФА-СИ и ICP-MS. 4) Валовой состав флюидов в минералах изучен хроматографически с использованием методики декрипетации (Осоргин, 1990). 5) Температуры гомогенизации расплавных включений (аналитик Т.Ю. Тимина) определены с использованием микротермокамеры с инертной средой (конструкция Н.Ю. Осоргина, А.А. Томиленко). 6) Численное моделирование динамики инфильтрационного метасоматоза пород литосферной мантии под Авачинским вулканом проведено при помощи метода модифицированного проточного многорезервуарного реактора ПК Селектор (автор К.В. Чудненко). При обработке петрохимических и геохимических данных использован ПК Statistica. Для обработки полученной информации при моделировании метасоматоза в ПК Селектор использована специальная программа (автор К.Э. Сорокин).

Глава 2 ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И СТУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ РАЙОНА ВУЛКАНОВ АВАЧИНСКО– КОРЯКСКОЙ ГРУППЫ (ВОСТОЧНАЯ КАМЧАТКА)

При численном моделировании мантийно-коровой флюидной системы в литосфере под вулканами Авачинско-Корякской группы на основе синтеза известной геологической и геофизической информации были оценены глубины и T-P характеристики источников флюидов, морфология и размеры проницаемой зоны, граничные условия развития процесса тепломассообмена в системе. Положение существующих в литосфере магматические очагов под Авачинским вулканом определены на основе томографической схемы (Колосков и др., 2014), которая сопоставлена с аналогичными разрезами, полученными с использованием ПК GIS-ENDDB. Информация о начальном составе расплава (Перепелов, 2014), состав и Р-Т характеристика флюидов, отделяющихся от магматических очагов для Авачинского вулкана задавался по данным изучения гомогенизации включений в ксенолитах (Тимина и др., 2010), оценок температуры ликвидуса базальтов (Арискин, 1984) и данных хроматографического анализа содержаний и состава газов в минералах. Общая картина распределения существовавших и действующих магматических систем в рассматриваемом регионе получена при лешифрировании изображений Google Earth, а также при обработке региональных карт аномалий плотности и намагниченности пород (по данным А.Н. Василевского). Выявлено, что наземные вулканические группы Южной Камчатки, Авачинско-Корякского вулканического хребта и Восточной вулканической зоны сопряжены с субмаринными линейными и луговыми вулканическими хребтами, которые пересекают глубоководный желоб и с вулканическими хребтами, проходящими ортогонально оси желоба. Ha картах аномалий силы тяжести И намагниченности эти субмаринные морфологические структуры имеют аналогичные наземным вулканам характеристики и обладают аналогичными им формами и размерами.

<u>Тектонофизическая обстановка развития флюидных и магматических</u> систем

Для решения задачи динамики тепломассообмена в проницаемых зонах в мантии и земной коре существенны оценки изменения характеристик поля напряжений, геометрии и размеров проницаемых зон над магматическими очагами, питающими извержения вулканов. С использованием ПК GIS-ENDDB были проанализированы данные о механизмах землетрясений за период 1972-2012 ГГ. Пол Авачинским существуют лве области вулканом тектонофизических условий фильтрации флюидов в проводящих зонах под вулканом: нижняя, где преобладают условия сжатия (подтверждаются данные о грабене с шириной разломных зон порядка 4 км (Горбатов и др., 2004)). И верхняя область, где преобладают условия растяжения и происходит интенсивное сейсмическое разрушение пород коры и верхней мантии. Синтез геофизической информации, использованный для решения задач динамики метасоматоза, приведен на рис. 1. На этой основе, с учетом работ (Абкадыров и др., 2014; Болдырев, 2002; Мороз, Гонтовая, 2007) построена односкоростная гидродинамическая модель тепло-масообмена, которая использована в качестве неизотермической модели инфильтрационного метасоматоза в ПК Селектор аналогично работе (Шарапов и др., 2015).

Ультрабазитовые ксенолиты в вулканогенных породах не могут извлекаться расплавами в разрезе литосферы глубже кровли очагов магм, питающих вулканические извержения. Из рис. 1 следует, что это может быть любой из четырех магматических очагов. По петрогенетическим оценкам (Колосков, 1999) это интервал глубин порядка **30**÷**60км** от поверхности вулкана. Область интенсивной сейсмичности не опускается в разрезе мантийной литосферы глубже 70км. Структуры и текстуры крупных обломков ксенолитов указывают на разнообразие трещиноватости мантийного субстрата над магматическими очагами. В них фиксируются открытые полости и хаотичная трещиноватость, что связано с разрушением пород в зонах активной сейсмичности. Возраст Авачинского вулкана порядка 30 тыс. лет, интенсивный вынос ультрабазитовых ксенолитов оценивается в 7 – 3.5 тысяч лет (Базанова и др., 2003). В данной диссертации обсуждаются магматические события не древнее 50 тысяч лет, с которыми связаны предполагаемые процессы флюидного воздействия на ультрабазитовые породы литосферной мантии в области шпинелевой фации глубинности.

Глава ЗУЛЬТРАБАЗИТОВЫЕ КСЕНОЛИТЫ: КОНТАКТ С ВМЕЩАЮЩЕЙ ПОРОДОЙ, СТРУКТУРА, СТЕПЕНЬ МЕТАСОМАТИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЕННОСТИ И СОСТАВ МИНЕРАЛОВ

Характеристика вулканических пород, вмещающих ксенолиты

Большинство ультрабазитовых ксенолитов имеют андезибазальтовую «рубашку» (мощность от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров). Для вулканических пород характерна порфировая структура с пилотакситовой основной массой. На границе нет реакционных зон физико-химического взаимодействия расплав-порода. Порфировые выделения в лавах составляют 30-50% объема породы, они представлены основным плагиоклазом (лабрадором), роговой обманкой, диопсид-авгитом, гиперстеном, титаномагнетитом и рудным минералом.

Взаимоотношения вулканических пород с ультрабазитовыми ксенолитами: границы и новообразования. Существует два вида контактов ультрабазитовых ксенолитов с вмещающей лавой: 1) резкие, без видимых преобразований или новообразований в ксенолите, 2) на контакте ксенолита и вмешаюшей наблюдается амфиболовая породы (реже амфиболплагиоклазовая) оторочка шириной 1-5мм (рис. 2а и 2б). Такие оторочки содержат вспененные (рис. 2в) кислые (SiO₂ 56-72 вес.%) стёкла. Также на границе гарцбургита с андезибазальтовой лавой отмечены «медовожелтые» оливины (хризолит Fo~80 Fa~20) с расплавными включениями (рис. 2г). Примеров выполнения трещин андезибазальтовым расплавом внутри ксенолитов с образованием реакционных зон в изученной коллекции ксенолитов не обнаружено.

<u>Гарцбургиты и пироксениты: разновидности перидотитовых</u> ксенолитов

Размеры изученных Авачинских ультрабазитовых ксенолитов в основном варьируют от 3 до 30см, крупные обломки представляют собой сильнотрещиноватые средне- крупнозернистые гарибургиты, часто с текстурой «хлебной корки». также ортопироксеновыми. оливинитовыми и амфиболовыми жилами. Образцы светло-зеленые с массивной текстурой и панидиоморфнозернистой структурой. Оливин составляет 70-80% массы породы, ромбический пироксен 10-25%, шпинель до 5%, часто встречаются изумрудно-зеленые кристаллы хромистого диопсида. Большинство зерен оливина сильно катаклазированы и имеют блочное строение (рис. 3а). Реже встречаются пироксениты _ тёмно-зелёные породы существенно клинопироксенового состава, структура панидиоморфнозернистая. Среди зерен клинопироксена (хромистого диопсида) встречается амфибол и единичные (до 2-3%) зерна буроватого, железистого оливина (Fo 75-80). Клинопироксен характеризуется большим количеством расплавных и газовожидких включений (до 30% объема минерала).

Исходные и метасоматически изменённые гарцбургиты

В работах А.В. Колоскова (Колосков, 1999; Колосков и др., 2001), позднее в серии работ японских ученых Satoko Ishimaru & Shoi Arai (Ishimaru at al, 2007) обращено внимание на различную степень метасоматической проработки перидотитовых ксенолитов. Метасоматическая проработка выражается в образовании радиально-лучистого ортопироксена (Орх II), замещающего оливин, и перекристаллизации гарцбургитовой матрицы с образованием характерной мелкозернистой структуры. Также появляется интерстиционное стекло. По степени метасоматического преобразования выделено два типа пород (Шарапов и др., 2017): первичные - слабо измененные гарцбургиты, содержащие небольшое количество клинопироксена (Cpx~2%) и 10-15% первичного ортопироксена (Орх I, Еп 70-90). Данные породы не содержат расплавных или флюидных включений, следов плавления в виде интерстиционных стёкол, а так же следов сублимации в виде растворения минералов не обнаружено.

К *метасоматически изменённым* (метасоматизированным) ультрабазитам относятся гарцбургиты, минералы которых в изобилии содержат флюидные включения (рис. 3б) и интерстиционные стекла (рис. 3в). Крайней степенью метасоматического преобразования гарцбургита являются

8

«сахаровидные» оливиниты (содержание оливина в породе свыше 90%) с полосчатой текстурой и прожилками, выполненными хромистым диопсидом и тонкими вискерами, растущими из газовой фазы (рис. 3г). По данным валового состава (метод РФА-СИ) метасоматизированные гарцбургиты, подвергшиеся процессам локального плавления, обогащены SiO₂ (48-55 мас. %), Al₂O₃ (0.5-1.5 мас. %), CaO (до 11 мас. %) относительно первичных гарцбургитов. В редких образцах гарцбургитов наблюдается «пятнистость» - различные по структуре и минеральному составу области, что отражает различные зоны и стадии их флюидного преобразования.

В результате комплексного изучения коллекции ксенолитов Авачинского вулкана подтверждена установленная в (Ishimaru et al., 2007-2011) последовательность (Ol-I \pm Spl-I) \rightarrow (Opx-II \pm Spl-II - метасоматоз) \rightarrow (Cpx \pm Amph, Spl-II, стекло) \rightarrow (Ol-II \pm Cpx, стекло) \rightarrow (Amph \pm Ol-II, Cpx, Pl, Mgt, стекло – образование оторочек) \rightarrow эксплозия, где I и II – первичные и метасоматически образованные оливин и ортопироксен. В некоторых случаях такая последовательность заканчивается процессом частичного плавления, что отражается в наличии незональных стекловатых прожилков с кристаллами шпинели, имеющих первичные расплавные, газовые и комбинированные включения.

Глава 4 ХАРАКТЕРИСТИКА И СОСТАВ РАСПЛАВНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ И ИНТЕРСТИЦИОННЫХ СТЁКОЛ В МИНЕРАЛАХ УЛЬТРАБАЗИТОВЫХ КСЕНОЛИТОВ

Микроскопическое изучение минералов метасоматически изменённых гарцбургитов Авачинского вулкана обнаруживает присутствие в них преимущественно жидких и газово-жидких (здесь и далее, газово-жидких = флюидных), а так же расплавных включений в клинопироксене пироксенитов (рис. 4). В данной главе приведены опубликованные результаты совместной работы с сотрудниками лаборатории термобарогеохимии №436 ИГМ СО РАН (Томиленко А.А, Ковязин С.В., Тимина Т.Ю.). Полученные интервалы температур гомогенизации включений используются в дальнейшем в качестве граничных условий. Размер флюидных включений в оливине варьирует от 5 до 30мкм. Включения полифазные: газовый пузырь, водно-хлоридный раствор и дочерние кристаллические фазы. По данным (Tomilenko et al, 2010) полная гомогенизация осуществляется в интервале температур 960-980°C при растворении последней кристаллической фазы. Кристаллы клинопироксена содержат наибольшее количество всех видов включений. Температуры гомогенизации расплавных включений в клинопироксене составляют **1040-1090**°C. По данным анализа эл. микроскопа стёкла расплавных включений в целом имеют состав близкий к андезитовому (SiO₂ – 58-63 мас.%). Флюидные включения ортопироксена располагаются вдоль трещин спайности, особенно в центральной части минерала. Расплавные включения в клинопироксене содержат стекло, газовый пузырёк, дочерние минералы (амфибол). Шпинель представлена крупными ксеноморфными зёрнами с расплавными, комбинированными и флюидными включениями.

<u>Интерстиционные стёкла.</u> Гарцбургиты и пироксениты содержат высококремнистые интерстиционные стёкла с содержанием SiO_2 до 72 мас.%. Кислые интерстиционные стёкла распространены на границах между зёрнами ортопироксена, оливина, клинопироксена и амфибола в перидотитах (рис. 5), подверженных плавлению и перекристаллизации, а также в ассоциации со шпинелью в микроскопических прожилках. ТАS-диаграмма составов расплавных включений и интерстиционных стёкол в пироксените приведена на рис. 6.

Состав газовой фазы во флюидных включениях минералов. При проведении аналитических исследований обращено внимание на следующие последовательности: Ol-I+Opx-I в первичных перидотитах \rightarrow Opx-II+Cpx \rightarrow Ol-II+Amph в метасоматизированных перидотитах. Сравнение полученных валовому составу газов прослеживают тренд увеличения данных по «водонасыщенности» метасоматизирующих флюидов, происходит изменение состава флюида от восстановленного (наличие сульфидов, карбонатов, графита) к окисленному (образование амфибола на завершающей стадии) (рис. 7). При метасоматозе увеличивается кол-во воды во вторичных минералах, т.е. в Ol II больше воды, чем в Ol I, в Орх II больше воды, чем в Орх I. Во включениях клинопироксена обнаружен твёрдый углерод, карбонаты и гипс, составы газовой фазы, помимо H₂O, CO, CO₂ и N₂, соответствуют ряду углеводородов CH₄-C₅H₁₂ (Кузнецов, 2013). Основным газом во включениях Орх-II и Срх является СО, что также указывает на восстановительную характеристику флюида.

Различные условия преобразования ультрабазитов, зафиксированные по составу флюидов в их минералах позволяют полагать, что исследованные ксенолиты представляют собой продукты многостадийного (многоэтапного) метасоматического преобразования в зоне глубинного разлома пород деплетированной литосферы над исходными магматическими очагами, где происходит ретроградное кипение магмы. Можно предположить последовательное воздействие эволюционирующих по составу потоков магматических флюидов от восстановленных к более окисленным, на заключительной стадии. Порядок этих процессов можно представить следующим образом: а) воздействие восстановленных флюидов, не концентрации содержавших достаточные SiO₂ (перекристаллизация первичного оливина). б) переплавление метасоматизированных гарибургитов с привносом Al, Ca, Na, Cr и ряда других компонентов, воздействие которых привело к образованию локальных участков пироксенитов (в частности хромистого диопсида) и, далее к формированию метасоматических прожилков и гнёзд вторичного Opx-II с многочисленными включениями.

Глава 5 МОДЕЛЬ ИНФИЛЬТРАЦИОННОГО МЕТАСОМАТОЗА АВАЧИНСКИХ УЛЬТРАБАЗИТОВ ПОТОКАМИ ВОССТАНОВЛЕННЫХ ГАЗОВ

На основании изучения структур и текстур образцов, флюидных и расплавных включений в минералах получена следующая последовательность процессов преобразования пород верхней мантии: 1) перекристаллизация исходных гарцбургитов под воздействием флюида с развитием характерных текстур с пятнами, жиловидными выделениями, а также мелко-И крупнозернистых зон «оливинизации», 2) замещение описанных выше перекристаллизованных образований орто- и клинопироксеном, 3) проявление частичного плавления с формированием интерстиционных стекловатых образований, а также жиловидных клинопироксен-амфиболовых обособлений, в минералах которых содержатся расплавные включения, 4) завершается процесс ростом в открытых трещинках друзовидных жилок амфибола, в более крупных трещинах плагиоклаз-амфиболовых оторочек со стекловатыми пленками, которые на контакте ксенолита и вмещающего андезибазальта образуют области вспенивания.

Из калейдоскопа фрагментарных обломков ультрабазитов Авачи затруднительно построить фациальную картину их пространственного и, прежде всего, *вертикального* распределения в виде закономерных зон или временных стадий формирования. Но возможно сконструировать виртуальные метасоматические колонки в динамическом поле изменения температуры и давления над источниками флюидов. Ниже рассматривается такая задача в рамках многорезервуарного проточного реактора, в котором проходят равновесные гетерофазные взаимодействия «флюид – порода».

Численные эксперименты динамики метасоматической переработки исходного состава пород литосферной плиты проводились в ПК Селектор с использованием модели инфильтрационного метасоматоза (Шарапов и др., 2015) при воздействии источников флюидов постоянного и переменного состава. Полагалось, что из «внешнего резервуара» поступает флюид известного состава с заданными значениями Т и Р, который воздействует на однородный массив гарцбургитовой литосферной мантии, выше которого располагается проницаемый породный субстрат андезибазальтовой земной коры. Отметим, что в диссертации не обсуждается схема магматического инфильтрационного метасоматоза (Ionov et al., 2011; Rudnick et al., 2009), а также модель конвективного плавления (Golubev et al., 1978) для описанных проявлений частичного конвективного плавления.

Решение задачи динамики неизотермического инфильтрационного метасоматоза. В численных экспериментах исследована динамика развития зональных колонок в проточном реакторе с 50-ю последовательно связанными реакторами над четырьмя разноглубинными магматическими источниками (глубина 50-120км, см. рис. 1) постоянного и переменного состава, а также двух типов метаморфогенных источников по моделям (Kimura et al., 2007; Mibe et al., 2002). Ширина области фильтрации принята равной **4км** (ориентир – размеры зон растяжения Авачинского грабена). Рассмотрен временной интервал 50 000 лет – время, которое соответствует порядку существования Авачинского вулкана (Базанова и др., 2004). Выбор состава и изменения источнике со независимых компонентов в временем базируется на проведенных ранее численных экспериментах (Шарапов и др., 2015), а также хроматографических определениях состава газа в минералах разной степени метасоматизированности гарцбургитов (Кузнецов, 2013). По данным изучения состава газово-жидких включений был принят состав флюида как водноуглеродно-метановая газовая смесь. На основании изучения температур гомогенизации расплавных включений температура магматогенных флюидов в разноглубинных источниках варьировалась от 1300°C (120км) до 1000°C (50км), соответственно давления, - Р = 30 – 15кбар. Теплоемкость флюида в расчетах принималась по справочнику (Варгафтик, 1963), проницаемость (kp) и пористость (m) по разрезу литосферы считалась уменьшающейся с глубиной ступенчато.

Результаты численного моделирования метасоматоза.

После проведения и интерпретации нескольких десятков расчётов появились данные, позволяющие говорить о возможности существования двух Р-Т фаций инфильтрационного метасоматоза под Авачинским вулканом: поверхностная фация затухающая временем пироксенизация co ультрабазитов т.е. замещение первичного оливина и ортопироксена вторичным клинопироксеном (рис. 8). Процесс зависит от состава флюида в источнике и его начальных Т₀ и Р₀ Из теории подобия следует, что верхние части метасоматических колонок (для различных по глубине источников) аналогичны. В пределах поверхностной фации глубинности при T = 1000 -1200°С и давлении менее 30кбар существенных минералогических различий в ксенолитах ультрабазитов Авачи не наблюдается. - глубинная фация («гранатовая», Р>30 кбар) пироксенизация при T = 1200 - 1300°C, с максимальным изменением первичных гарцбургитов, образованием жил и пятен орто- и клинопироксенового состава. Конечная стадия данного процесса - ксенолиты пироксенитов.

Подвижность петрогенных гетерофазных компонентов в взаимодействиях «флюид-порода» зависят от общего состава соединений во флюидной фазе. Для температур ниже 1150°С скорость синтеза Срх при одинаковой интенсивности разложения оливина примерно в два раза больше. чем Орх. Изменение давления в системе отражается на возможных масштабах окремнения и карбонатизации ультрабазитов. Разновидность метасоматических изменений в разрезе литосферной мантии под Авачинским вулканом приведена на рис. 9 а-б, высокие содержания ортопироксена смещены к верхней части колонок и могут достигать 15-17% объема породы. Как было сказано выше, состав флюида эволюционировал, минералогическая граница перехода от восстановленных флюидов к окисленным на последней стадии процесса метасоматоза показана на рис. 10.

В зависимости от соотношения Si/Ca во флюиде, а также содержаний Fe и Al в источниках флюидов можно построить теоретический ряд предельных метасоматических изменений первичных гарцбургитов (рис. 11), которые мы не наблюдаем продуктов извержения Авачи. среди Преобразование оливина заканчивается синтезом граната и клинопироксена, образуются своеобразные глубинные аналоги родингитов (Жариков и др., 2008). Среди ультрабазитов Авачинского вулкана нет аналогов родингитов, можно рассматриваемый предположить, что процесс метасоматического преобразования некоторой части разреза под Авачинским вулканом является

или «незавершенной» частью локальной метасоматической колонки, или закономерной частью развивающейся флюилной системы. Также, отсутствие такого рода метасоматитов в изученных ксенолитах Авачинского вулкана может указывать на то, что в эксплозивных процессах «опробовались» преимущественно верхние горизонты метасоматических колонн, когда родингиты имеют более глубинное происхождение. Напрашивается вывод о том, что мы имеем дело с относительно кратковременными стадиями отделения флюидов от малоглубинного магматического очага, питающего Авачинский вулкан, вызванное землетрясениями или другими сейсмическими нарушениями. Весь процесс заканчивается выносом обломков при извержениях. После изучения выброшенных при эксплозивном извержении обломков ультрабазитовых пород с неизвестных по глубине участков разреза над магматическим источником невозможно точно установить последовательность фронтальных зон, а скорее возможно оценить число и последовательность стадий жильно-трещинного метасоматоза при метасоматическом воздействия флюидов: (Ol-I \pm Spl-I) \rightarrow (Opx-II \pm Spl-II - метасоматоз) \rightarrow (Cpx \pm Amph, Spl-II, Gl) \rightarrow (Ol-II \pm Cpx, Gl) \rightarrow (Amph \pm Ol-II, Cpx, Pl, Mgt, Gl – образование оторочек) → эксплозия, где I и II – первичные и метасоматически образованные минералы.

Глава 6 ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТАВОВ ЧАСТИЧНЫХ ВЫПЛАВОК ИЗ КСЕНОЛИТОВ ПОТОКОМ ВОССТАНОВЛЕННЫХ ГАЗОВ И МЕТОДОМ «ЭЛЕКТРОННОЙ СВАРКИ»

<u>Математическая модель процесса сублимирования</u>. В качестве исходной математической модели в данной диссертации использована система уравнений и граничных условий, приведенных в (Черепанова и др., 2015; Шарапов и др., 2007). Полученные результаты можно отнести к первому приближению, главная особенность изученного процесса сублимирования – чрезвычайно высокая скорость протекания. На основании данных численного моделирования была проведена работа по нагреванию ксенолитов Авачинского вулкана: 1) потоком восстановленных газов - вынос расплава из образца при внешнем воздействии; 2) плавление пучком электронов, когда расплав выносится из образца без внешнего воздействия.

<u>Моделирования частичных выплавок потоком восстановленных газов.</u> Первые подобные эксперименты были проведены в ИТФ СО РАН с обдуванием потоком синтез-газа поверхности минералов при $T = 200 - 600^{\circ}$ С и Р = 10-100атм. (Шарапов и др., 2007). Автором диссертации использован проточный реактор при нагреве ксенолитов потоком газов (T = 800 - 1200°C) в ИТФ СО РАН для оценки протекания предполагаемых процессов: 1) механизм извлечения флюидов из реальных пород при их нагревании, 2) оценка количества извлекаемых петрогенных компонентов, 3) оценка скорости отделения флюида при сублимировании плёнок и конденсатов из трещин, 4) оценка скорости протекания таких процессов.

Следовательно, при нагреве метасоматизированных перидотитов Авачинского вулкана потоком горячих газов и последующей закалке образцов следует ожидать похожие явления, а именно: 1) плавление стекловатых плёнок, находящихся на поверхности трещин, 2) удаление компонентов из вторичных газово-жидких включений и дегидратированных минералов, 3) перемещение расплавов к поверхности нагрева, 4) образование продуктов гетерофазных реакций и плавление минералов на поверхностях, обтекаемых потоками горячих газов.

Состав закалочных минералов и стёкол. «Каплевидные» выделения обладают максимальной неоднородностью состава и структуры - некоторые сплошные плёнки имеют неоднородный состав в верхней вспененной половине и более однородны в своей средней и нижней части, тогда как другие обладают относительно однородной структурой. Для поверхностных пузыристых плёнок характерно пятнистое распределение составов стёкол, что чётко фиксируется по «цветовой» гамме: чем темнее стёкла, тем более высоко кремниевые составы фракции. Наибольший петрогенетический интерес представляют продукты конденсации газовой фазы на поверхности стекловатых корочек и внутри трещинок, откуда проходило поступление расплава на поверхность нагревания из внутренних частей образцов. В таких случаях зафиксировано присутствие дендритов NaCl с примесью S, «металлическое железо», дендритные кристаллы вюстита (Fe_{1-x}O), пластинки TiO₂, смеси Sn-Cu/Zn-Cu, а так же кристаллические образования с составом 98-100 вес.% Al₂O₃ (рис. 12).

Начальный состав стекловатых продуктов определяется составом включений в минералах породной матрицы и наиболее легкоплавких минералов в реакционных оторочках и метасоматических жилках. При этом средние составы выплавок сложно сопоставить с реальными составами кислых и базитовых пород. Кислые пузыристые стёкла и соединения с хлором на поверхности образцов свидетельствует о выносе данных компонентов флюидами из газово-жидких включений. При тепловом возбуждении образцов ультрабазитов газы, выделяющиеся из вторичных и первичных включений, производят полное сублимирование твердой фазы в полостях и трещинках деформированных пород. Процесс сублимирования из трещиновато-пористой массы породы происходит со скоростью, которая по порядку значений аналогична полученной в численных экспериментах.

Сублимирование трещиноватых пород методом «электронной сварки». Эксперименты проведены для оценки скорости сублимирования минералов без воздействия «внешнего» потока газов с помощью уникальной установки в лаборатории электронной сварки ИЯФ СО РАН. Технология без воздействия внешних потоков газа, а путем «бомбардировки электронами» позволило воспроизвести предполагаемый процесс сублимирования только за счет летучих, выделяющихся из флюидных включений внутри ксенолитов. На рис. 13 показаны структурно-вещественные зоны в образце метасоматизированного гарцбургита, которые образовались после полного охлаждения в вакууме. Изучение с помощью электронного микроскопа поверхности трещин и кристаллов около них показало полное извлечение интерстиционных стёкол и перемещение расплава на поверхность образца.

Следует отдельно сказать о кристаллах шпинели гарцбургитов, которые или переплавляются, или перекристаллизовываются от границ зёрен при температуре 600 – 1160°С. При этом в них меняется не только исходная структура, но и состав, появляется оливиновая оторочка на границе кристаллпорода (рис. 14). В возникших кристалликах реакционных оторочек и жилок появляются примеси (вес. %): SiO₂ – 0.5 -3.5; CaO – 0.8 – 3.8; содержания Cr₂O₃ возрастают от 46-48% в исходных кристаллах до 55-62% в реакционных оторочках, соответственно падают содержания FeO, Al₂O₃.

<u>Результаты моделирования.</u> Процессы метасоматоза сопровождаются заполнением трещин, образованием каверн, отложением из флюидов конденсатов или перекристаллизацией минералов у стенок трещин. Показаны высокие скорости растворения и выноса петрогенных компонентов потоками магматических газов в широком диапазоне температур. Локальные изменения в ксенолитах возможно объяснить, если связать их с перемещениями флюидов при сейсмогенных тектонических процессах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Под Авачинским вулканом в области сейсмогенного разрушения литосферных пород из малоглубинного магматического очага происходит сталийное отлеление флюидной фазы, при воздействии которой на ультрабазитовые породы реализуются процессы околотрещинного инфильтрационного метасоматоза. С ним сопряжены начальные стадии дебазификации гарцбургитов с проявлением пироксенизации и сопряженных с ней явлений базификации. Такого рода процессы сопровождаются локальными участками конвективного подплавления метасоматизированных ультрабазитовых пород. При сильных сейсмогенных событиях реализуются локальные флюидные системы, которыми сопряжены процессы с сублимирования стенок трещин.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Шарапов В.Н., Перепечко Ю.В., **Кузнецов Г.В.**, Сорокин К.Э. К проблеме определения глубины образования и состава базитового расплава в верхней мантии // Геология и геофизика 2013, №3, с. 390-409.

Шарапов В.Н., **Кузнецов Г.В.**, Чудненко К.В. Возможные физико-химические фации верлитизации ультрабазитовых пород мантийного клина под вулканами фронтальной зоны Курило-Камчатского региона // Доклады Академии Наук. Геохимия, 2016, т. 467, № 4, с.450-453.

Шарапов В.Н., **Кузнецов Г.В.,** Логачев В.П., Черепанова В.К., Черепанов А.Н. К построению модели динамики сублимирования трещиноватых пород под вулканами Авачинской группы (Камчатка) // Геохимия, 2017 № 3. с. 201-223.

Шарапов В.Н., **Кузнецов Г.В.,** Тимина Т.Ю., Томиленко А.А., Чудненко К.В. Численное моделирование неизотермического метасоматического преобразования ультрабазитов мантийного клина под вулканами Авачинской группы вулкана (Камчатка) // Геология и геофизика, 2017. т. 58. № 5.

> Подписано в печать 05.09.2018 г. Печать офсетная. Бумага офсетная. Формат 60х84 1/16. Усл. печ. 1,32 л. Тираж 100 экз. Заказ № 442

Отпечатано в типографии «Срочная полиграфия» 630090, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 6/1, оф.104



Рис. 1 Тектонофизический разрез литосферы под вулканами Авачинско-Корякской группы по данным (Гонтовая и др., 2010) с положениями гипоцентров землетрясений (светлые кружки), косые крестики - области магматических очагов, стрелками показаны возможные области фронтальной фильтрации магматических флюидов. Пронумерованы варианты разноглубинных источников флюидов, для которых решается задача инфильтрационного метасоматоза.



Рис. 2а Амфибол-плагиоклазовая оторочка в ксенолите пироксенита (увеличение в 2.5paзa).



Рис. 26 Амфиболовая оторочка (1) (Amph+Ol+Gl) на контакте андезибазальта (2) и гарцбургита (3).



Рис. 2в «Пузыристые» стекла на контакте перидотитовых ксенолитов и андезибазальтов.



Рис. За Катаклазированные кристаллы оливина. (1) – флюидные включения; (2) – прожилки ортопироксена; (3) – блочное строение зерен оливина.



Рис. Зв Вторичные включения (мелкие точки 3) и интерстиционное стекло (1) в трещинках (2) внутри ортопироксена.



Рис. 2г Оторочка «медово-желтого оливина» на контакте ксенолита гарцбургита и вмещающего андезибазальта.



Рис. 36 Обильное распространение (до 25% объема минерала) газово-жидких включений в центральной части кристалла ортопироксена.



Рис. Зг Нитевидный кристалл - вискер в трещине – характерный продукт роста из газовой фазы.



Рис. 4 Пример первичных расплавных включений (расплав+стекло+газовый пузырь) в кристаллах клинопироксена в образцах клинопироксенита.

Рис. 5 Интерстиционное стекло в трещинах и между гранями клинопироксена.



Рис. 6 ТАЅ-диаграмма составов расплавных включений (Вкл, красные) и интерстиционных стёкол (Ст, синие) в образце пироксенита.



Рис. 7 Содержание воды (мг/кг) в минералах первичных (Ol-1, Opx-I) и метасоматизированных (Ol-II, Opx-II, Cpx и Amph) гарцбургитов. По оси X – кол-во анализов в каждом минерале.



Рис. 8 Зональное строение колонны пород метасоматизированной литосферной мантии. Показан процесс пироксенизации, т.е образование клинопироксена на месте первичных оливина и ортопироксена в поверхностной фации инфильтрационного метасоматоза.



Рис. 9а Зональное строение колонны пород метасоматизированной литосферной мантии. Породообразующие минералы. Одним из аспектов работы был поиск флюидов, которые на уровне глубин порядка 40-70 км формируют метасоматиты, состав которых близок к составам реальных жил и прожилков в изученных ультрабазитах Авачи. $T_0 = 1227^{\circ}$ C, $P_0 = 35$ кБар. $T_{конец} = 682^{\circ}$ C и $P_{конец} = 1.1$ кбар.



Рис. 96 Зональное строение колонны пород метасоматизированной литосферной мантии. Акцессорные минералы.



Рис. 10 Минералогическая граница перехода от восстановленных флюидов к окисленным на последней стадии процесса метасоматоза. Следует отметить, что образование магнезиального ортопироксена (Opx-Mg) происходило в восстановительных условия на начальной стадии процесса, образование клинопироксена Cpx («пироксенизация») происходит при окисленных условиях на заключительной стадии метасоматоза.



Рис. 11 Изменение содержания минералов при пироксенизации гарцбургитов при температуре флюида 1200 С. Образование гранат-клинопироксеновых пород, аналогов родингитов. Давление в резервуаре R№ 1 - 30 кбар, время процесса 50 тысяч лет.



Рис. 12 Продукты конденсации из газовой фазы на поверхности прогретых образцов (слева направо): - «самородное железо» на поверхности кристалла матричного оливина,

- дендриты NaCl и KCl, растущие внутри трещинок, из которых проходило поступление расплава на поверхность,

- дендритные кристаллы вюстита на поверхности пузыристого стекла.



Рис. 14 Реакционные оторочки (1) разложения кристалла шпинели на расстоянии 40 мм от границы плавления гарцбургита электронным пучком. В кристалле присутствуют расплавные (2) и (3) и газовые включения (4). На расстоянии более 1 см от зоны плавления изменений в шпинели не обнаружено.



Рис. 13 Образец прогретого гарцбургита методом плоного электронного пучка, в котором воспроизведены все структурно-вещественные зоны:

зона кипящего расплава (1 – смесь кристаллов оливина и ортопироксена, полученных в результате мгновенной кристаллизации расплава после отключения установки); зона полнокристаллической породы (3, исходная,

неизменённая гарибургитовая матрица); частично расплавленная зона (2, здесь происходило частичное плавление минералов).

В области 4 (*трещина черного цвета*) происходит отделение газовой фазы, поток которой производит полное сублимирование вещества на поверхности трещин и отложение конденсатов на внешней части образца.