

На правах рукописи



Лебедева Юлия Михайловна

**Метасоматические процессы
при высоких температурах и давлениях
в Лапландском гранулитовом поясе
(на примере Поръегубского покрова)**

Специальность 25 00 04 - петрология, вулканология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Санкт-Петербург
2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и геохронологии докембрия Российской академии наук в лаборатории петрологии.

Научный руководитель:

кандидат геолого-минералогических наук

доцент **Бушмин Сергей Алексеевич**

ФГБУН Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, старший научный сотрудник

Официальные оппоненты:

доктор геолого-минералогических наук,

Балаганский Виктор Валентинович

ФГБУН Геологический институт Кольского научного центра РАН, заведующий лабораторией

Доктор геолого-минералогических наук,

профессор **Перчук Алексей Леонидович**

Геологический факультет МГУ, заведующий кафедрой

Ведущая организация:

ФГБУН Институт геологии Карельского научного центра РАН

Защита состоится 18 марта 2015г. в 14.00 на заседании диссертационного совета Д.002.047.01 при Институте геологии и геохронологии докембрия РАН по адресу: 199034, г. Санкт-Петербург, наб. Макарова, д.2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГГД РАН и на сайте www.ipgg.ru

Отзывы направлять ученому секретарю диссертационного совета по адресу: 199034 г. Санкт-Петербург, наб. Макарова, д.2., ИГГД РАН.

Электронная почта: dis.sovet@ipgg.ru; факс (812)3284801.

Автореферат разослан января 2015г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат геолого-минералогических наук



/Н.А. Алфимова/

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Зоны сдвиговых деформаций с высокотемпературной метасоматической переработкой гранулитов до настоящего времени, за исключением отдельных работ (Беляев, 1981; Доливо-Добровольский, 2003; Hisada et al., 2005; Newton, et al., 2010; Touret, et al. 2011; Tsunogae, et al. 2014) не подвергались детальному изучению. В большинстве исследований внимание сосредоточено исключительно на результатах флюидной переработки гранулитов в изохимических или близких к ним условиях (например, Перчук и др., 2006; Newton et. al., 2014). Инфильтрационный метасоматоз, сопровождающий региональный метаморфизм гранулитовой фации и часто связанный с зонами сдвиговых деформаций, как процесс локального транспорта элементов, остался недостаточно изученным явлением в области высоких температур и давлений.

Роль флюидов и их химический состав при гранулитовом метаморфизме многие десятилетия остается предметом незавершенных дискуссий. Многие годы для гранулитового метаморфизма предполагался H_2O-CO_2 флюид с низкой активностью воды (0.15-0.3) за счет очень высокого содержания углекислоты (Newton et. al, 1980; Touret, 1981). Такой маловодный флюид не мог вызывать метасоматическую переработку гранулитов и это противоречило многим геологическим свидетельствам метасоматических процессов в гранулитовых толщах, в том числе и в выбранных для исследования НТ-НР лапландских гранулитах.

Определяющим мотивом для постановки данных исследований послужили как появившиеся в последнее время свидетельства о высокой активности воды в гранулитовой фации, основанные на экспериментальной петрологии и термодинамических расчетах (Aranovich et al, 2013; Newton et al, 2014), так и отсутствие надежных количественных оценок физико-химических параметров (Т, Р, a_{H_2O}) метасоматических процессов в НТ-НР сдвиговых зонах, обладающих высокой проницаемостью для флюидных потоков.

Объект исследования - зоны пластических сдвиговых деформаций свекофеннского возраста (1.9 млрд. лет), контролирующие НТ-НР процессы инфильтрационного метасоматоза и жильного минералообразования в Порьегубском тектоническом покрове юго-восточного Кандалакшско-Умбинского фрагмента Лапландского гранулитового пояса (ЛГП) Балтийского щита.

Цель исследования: установить геологические и физико-химические условия проявления высокотемпературного высокобарического метасоматоза при РТ-параметрах гранулитовой фации, выяснить происхождение метасоматизирующих флюидных потоков.

Для достижения цели исследования были **решены следующие задачи:** **1)** получен новый полевой геологический и петрологический материал по процессам в зонах метасоматоза Порьегубского покрова; **2)** выполнены петрографические исследования, изучена метасоматическая зональность и построены метасоматические колонки; **3)** выполнены микрозондовые исследования химического состава минералов в отношении главных петрогенных элементов; **4)** определены Р-Т параметры для главных типов пород (кристаллосланцев ранней и главной стадий метаморфизма, богатых кварцем и железо-магнезиальных

метасоматитов), установлен тренд изменения Р-Т параметров в ходе метасоматического минералообразования; 5) рассчитаны активности воды во флюиде для метаморфических и метасоматических пород; 6) исследован изотопный состав кислорода пород и минералов из зон метасоматической переработки; 7) исследован изотопный состав углерода графита; 8) определен изотопный состав аргона из газовой-жидких включений в минералах по валовым образцам пород; 9) проведены изотопно-геохимические и изотопно-геохронологические исследования пород и минералов (изучены Sm-Nd и Rb-Sr системы в породах и породообразующих минералах, U-Pb система в цирконах: SIMS SHRIMP-II).

Фактический материал и личный вклад автора. В основу работы положены материалы, собранные автором диссертации в течение четырех полевых сезонов 2006 - 2008 и 2010 гг., а также материалы научного руководителя работы С.А. Бушмина. Материалы включают в себя образцы пород, петрографические шлифы, прозрачно-полированные пластинки, полевые дневники, фотографии обнажений.

Автором было просмотрено и детально описано более 1600 петрографических шлифов, составлены детальные схемы геологического строения зон развития метасоматических пород на трех участках. В ходе микрозондовых исследований в ИГГД РАН с помощью электронных микроскопов АВТ-55 с энерго-дисперсионным анализатором LinkAN10000-85S и JEOL JSM-6510LA с ЭДС приставкой JED 2200 получено более 4000 анализов минералов из метаморфических и метасоматических пород. Методом TWEEQU автором получены РТ - параметры для 26 образцов и величины активности воды для 8 образцов. Из собственной коллекции и коллекции научного руководителя автором работы были отобраны пробы для изотопных, изотопно-геохимических и изотопно-геохронологических исследований. Автором был произведен анализ большого объема данных и выполнена корреляция между геологическими, термобарометрическими, геохронологическими и изотопно-геохимическими данными.

Объем и структура работы. Диссертация общим объемом 167 страниц состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 147 наименований. Диссертация содержит 8 таблиц и 104 рисунка, а также 4 таблицы и 4 рисунка в приложении.

В первой главе рассматривается история изучения Лапландского гранулитового пояса, приведена его геологическая характеристика и более детально описан Порьегубский покров (район Порьей губы), где были сосредоточены исследования. Остальные главы содержат новый фактический материал, полученный в процессе работы над диссертацией. Вторая глава посвящена метасоматическим процессам в Порьегубском покрове. Дается характеристика метаморфических пород, вмещающих зоны метасоматоза; описание типов и геологического положения метасоматических пород; метасоматической зональности; особенностей химического состава минералов. Третья глава посвящена термобарометрическим исследованиям. В четвертой главе обсуждается происхождение и состав флюида. В пятой главе приведены результаты изотопно-геохронологических исследований. В заключении на основе полученных новых научных результатов сформулированы три защищаемых положения.

Научная новизна. Для Порьегубского тектонического покрова юго-восточной части ЛГП впервые получены детальные и хорошо обоснованные

термобарометрические данные, а также величины активности воды для метасоматических пород и вмещающих их гранулитовых кристаллосланцев. Выделены две стадии метаморфической эволюции гранулитов, установлен Р-Т тренд эволюции пород. Определен источник метасоматизирующего флюида.

Теоретическое и практическое значение работы. Знание физико-химического состояния флюидов в глубинных НТ-НР-условиях важно для решения проблем источников и переноса глубинного вещества. Пронизывающие земную кору региональные зоны сдвиговых деформаций, локализуя рудоносные флюиды, в своих верхних низкотемпературных частях контролируют размещение значительных объемов полезных ископаемых, прежде всего крупных орогенных месторождений Au, V, U, Pd. А корневые высокотемпературные части таких зон, в том числе на уровне гранулитовой фации, контролируют формирование флюидных потоков, транспортирующих рудные компоненты в верхние структурные этажи. Поэтому вопросы, решаемые в диссертации, могут иметь большое значение для понимания закономерностей формирования орогенных месторождений и решения фундаментальных проблем металлогенического прогнозирования.

Апробация работы. Результаты исследований были представлены на 11 российских и международных научных конференциях: “Научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодые - наукам о Земле» Москва, 2006 г.”; “IV Международный минералогический семинар. г. Сыктывкар, 2006 г.”; “Геология, полезные ископаемые и геоэкология Северо-Запада России. XVII молодежная научная конференция, посвященная памяти чл.-корр. АН СССР К.О. Кратца, г. Петрозаводск, 2006 г.”; “II Российская конференция по проблемам геологии и геодинамики докембрия. г. Санкт-Петербург, 2007 г.”; “European Geosciences Union General Assembly 2008, Vienna, Austria, 2008”; “Limpopo International Field Workshop 2008, Johannesburg, South Africa, 2008”; “Изотопные системы и время геологических процессов. г. Санкт-Петербург, 2009 г.”; “Физико-химические факторы петро- и рудогенеза: новые рубежи. 110 лет со дня рождения академика Д.С. Коржинского. г. Москва, 2009 г.”; “Гранулитовые и эклогитовые комплексы в истории Земли. г. Петрозаводск, 2011 г.”; “Геология, геофизика и геоэкология: исследования молодых. Круглый стол «стратегические виды минерального сырья России, СНГ и сопредельных государств». г. Апатиты, 2011 г.”; “Актуальные проблемы геологии докембрия геофизики и геоэкологии. XXV молодежная конференция, посвященная 100-летию чл.корр. АН СССР К.О. Кратца. Санкт-Петербург, 2014 г.”.

Благодарности. Автор выражает благодарность своему научному руководителю С.А. Бушмину за постоянное внимание к работе и всестороннюю помощь. Автор благодарен В.А. Глебовицкому за ценные указания и помощь во время написания работы. Автор признателен Д.В. Доливо-Добровольскому и П.Я. Азимову (ИГГД РАН) за помощь на всех этапах написания работы, заключающуюся в консультациях по многочисленным вопросам в термодинамических расчетах. Автор благодарен Д.В. Доливо-Добровольскому за программы Minal, TWQ_View, TWQ_Comb и TriQuick, существенно облегчившие выполнение поставленных задач и за помощь в освоении этих программ. К.И. Лохову (СПбГУ), Е.С. Богомолу (ИГГД РАН) и Е.О. Дубининой (ИГЕМ РАН), О.В. Лоховой (ИИМК РАН) за измерения изотопного состава пород и минералов, а также помощь в интерпретации

результатов. М.Д. Толкачеву и О.Л. Галанкиной (ИГГД РАН) - за содействие при выполнении микрозондовых анализов. Автор признателен С.П. Кориковскому, Л.Я. Арановичу, Е.О. Дубининой (ИГЕМ РАН) и К.И. Лохову (СПбГУ) за ценные советы и обсуждение ряда вопросов во время полевых работ, Е.Б. Сальниковой и А.М. Ларину за ценные замечания и обсуждения во время написания работы. Работы по теме диссертации проводились при финансовой поддержке грантов РФФИ № 09-05-00392а и № 09-05-12053-офи_м. Особую благодарность автор выражает руководству Кандалакшского государственного природного заповедника за помощь в организации полевых работ на территории заповедника.

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

Положение 1. В метаморфических породах, вмещающих зоны НТ-НР метасоматоза, выделяются две сближенные по времени стадии гранулитового метаморфизма. Ранняя стадия (М1) характеризуется параметрами 6-6.7 кбар и 800-890°C. Поздняя, главная стадия метаморфизма (М2), сопровождаемая метасоматозом, характеризуется параметрами 8.1 - 9.1 кбар и 770 - 860°C.

Первое защищаемое положение обосновано геолого-структурными и петрографическими данными, детальным картированием и документированием взаимоотношений пород на опорных участках, термодинамическими расчетами, изотопно-геохронологическими исследованиями U-Pb системы в цирконах, а также Rb-Sr и Sm-Nd систем в породообразующих минералах и породах в целом.

Развитые в районе исследований кристаллические сланцы основного и среднего состава разделяются на две группы. Первая группа пород, относящаяся к ранней стадии метаморфизма М1 - это мелкозернистые преимущественно безгранатые кристаллосланцы ($Pl_{49-91} + Or_{x55-56} + Vt_{64} \pm Qu \pm Kfs \pm Am_{55-60}$ и $Pl_{33-52} + Or_{x50-64} + Cr_{x59-72} \pm Vt_{51-68} \pm Qu + Kfs \pm Gr_{25-35} \pm Am_{44-66}$), которые встречаются в отдельных реликтовых участках среди преобладающих в районе исследований гранатсодержащих кристаллосланцев ($Pl_{43-81} + Or_{x50-64} + Cr_{x44-77} + Gr_{19-35} + Vt_{48-74} \pm Am_{44-71} \pm Qu \pm Kfs$ и $Pl_{27-91} + Or_{x54-73} + Gr_{20-47} + Vt_{61-84} \pm Qu \pm Kfs \pm Am_{53-77}$) второй группы (главная стадия метаморфизма М2). Контакты между породами этих групп как субсогласные, так и секущие, что и позволяет говорить о разных этапах метаморфизма.

Термобарометрические исследования, выполненные методом TWEEQU (Berman, 1991; Berman, Aranovich, 1996), значительно снижают вероятность получения недостоверных P-T оценок по неравновесным минеральным ассоциациям. Минимальное число использованных в расчетах линейно независимых реакций (IR) равно 3 и их линии пересекались в одной точке с координатами P и T, только если составы всех использованных минералов равновесны. Количество реакций зависит от числа минералов в парагенезисе (чем больше минералов, тем больше реакций). Чем больше в системе линейно независимых реакций, тем более надежными считались результаты термобарометрического исследования и тем сложнее было найти равновесные составы минералов. По степени схождения линий реакций оценивалась степень неравновесности составов минералов, которая

*Индексы после минералов: Or_x, Vt, Cr_x, Am, Gr - xMg; Pl - номер плагиоклаза.

выражается величиной среднеквадратичного отклонения точек пересечения (СКО). Чем меньше число СКО, тем более сбалансирован парагенезис.

Были исследованы вмещающие кристаллические сланцы обеих стадий метаморфизма. Для стадии М1 получено 18 «пучков» (3 IR) с параметрами 6-6.7 кбар, СКО 0-0.2 кбар и 805-888°C, СКО 0-5°C (Рис.1.а). Для стадии метаморфизма М2 получено 43 «пучка» (3-4 IR) с параметрами 8.1-9.1 кбар, СКО 0-0.6 кбар и 765-856°C, СКО 0-13°C (Рис.1.б). Для метаморфических пород (М2) на контакте с зонами метасоматоза получен 61 «пучок» (3-4 IR) с параметрами 9.4-11.3 кбар, СКО 0-0.7 кбар и 815-901°C, СКО 0-13°C (Рис.1.в). Закономерное повышение давления с приближением к зонам интенсивных сдвиговых деформаций подтверждает ранее сделанный вывод (Глебовицкий и др., 1997; 2009) о компрессионных эффектах при гранулитовом коллизионном метаморфизме.

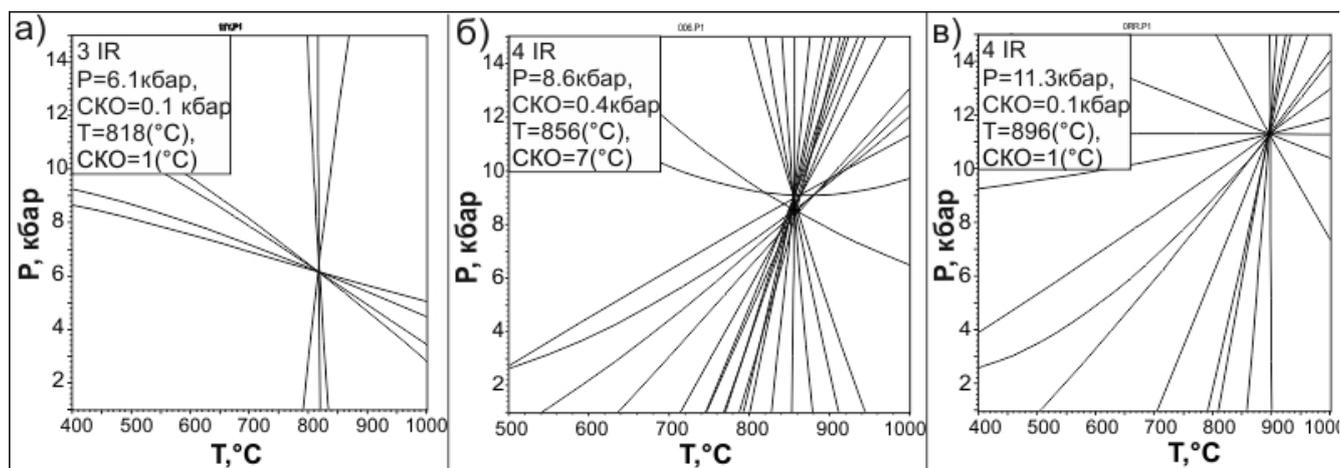


Рис. 1. Результаты термобарометрического исследования вмещающих кристаллосланцев. а) Мелкозернистый кристаллосланец (стадия М1) с парагенезисом $Pl+Crx+Orx+Qu+Vt$; б) среднезернистый кристаллосланец (стадия М2) с парагенезисом $Orx+Gr+Pl+Crx$; в) среднезернистый кристаллосланец (стадия М2), отобранный на границе с зоной метасоматоза. Парагенезис: $Pl+Gr+Orx+Qu+Vt$.

Перед выделением и датировкой цирконов были исследованы их взаимоотношения с породообразующими минералами в шлифах. Во вмещающих кристаллосланцах цирконы располагаются в плагиоклазе, гранатах и ортопироксенах. В метасоматических породах кристаллы циркона часто сосредоточены на фронте минеральных реакций. Например, в богатых кварцем метасоматитах циркон может развиваться на фронте

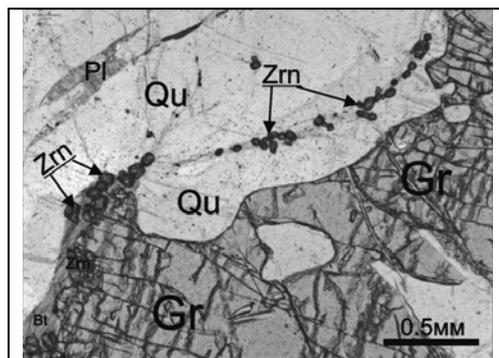


Рис. 2. Образование циркона при растворении граната.

растворения граната при замещении его кварцем и силлиманитом (Рис.2). Источником циркония мог служить как гранат (один из основных концентраторов циркония в породообразующих минералах, Frazer et al., 1997, Degeling et al., 2001), так и сам флюид (Коржинская и др., 1988, Aja, et al, 1995).

В результате сделан вывод о том, что цирконы росли одновременно с породообразующими минералами в парагенезисе с ними, как во вмещающих кристаллосланцах, так и в метасоматитах.

В кристаллосланцах М1 присутствует циркон одной генерации, представленный субидиоморфными многоплоскостными субизометричными кристаллами (Рис.3.а), которые были использованы для U-Pb изотопных исследований. Такие цирконы являются конкордантными и их возраст составляет 1927 ± 11 млн. лет (Рис.3.б). Вместе с тем для того же образца кристаллосланца получена минеральная Sm-Nd изохрона с возрастом 1959 ± 32 млн. лет (Рис.3.в), что в пределах ошибки близко к оценке этапа М1 по цирконам. Таким образом, возраст М1 не моложе 1916 млн. лет.

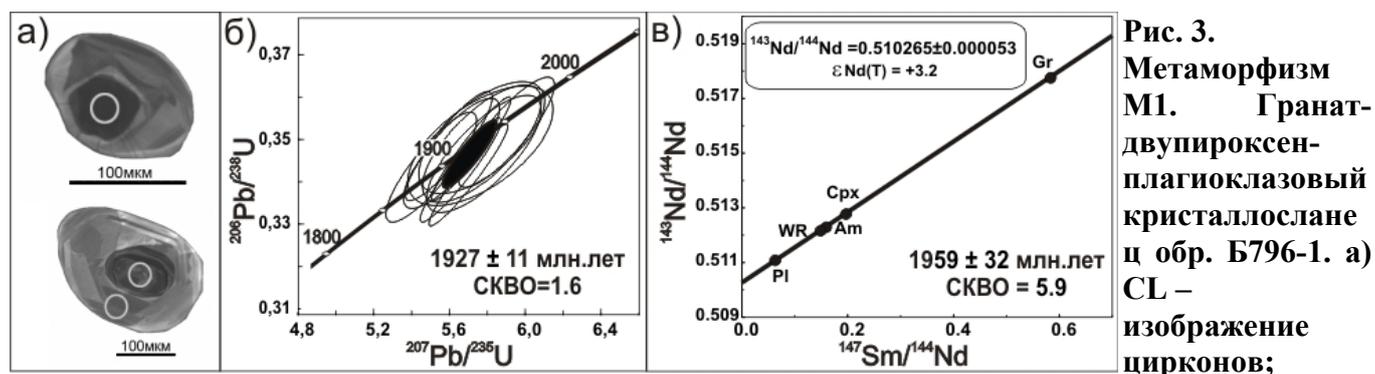


Рис. 3. Метаморфизм М1. Грант-двупироксен-плаггиоклазовый кристаллосланец обр. Б796-1. а) CL – изображение цирконов;

б) диаграмма с конкордией для цирконов. Эллипсы ошибок соответствуют доверительному интервалу 2σ ; в) минеральная Sm-Nd изохрона.

Для многоплоскостных округлых цирконов из лейкосомы ортопироксенового кристаллосланца стадии М2 получена датировка 1912 ± 2 млн. лет (ID TIMS, Кислицын, 2001). В метасоматитах, синхронных метаморфизму М2, в рамках данной работы исследованы цирконы аналогичного облика с конкордантным возрастом 1914 ± 26 (Рис.4.а) млн. лет. Также исследовались зональные цирконы со структурой «метасоматическая оболочка - магматическое ядро» (Рис.5). Для оболочек получен возраст 1913 ± 18 млн. лет (Рис.4.б).

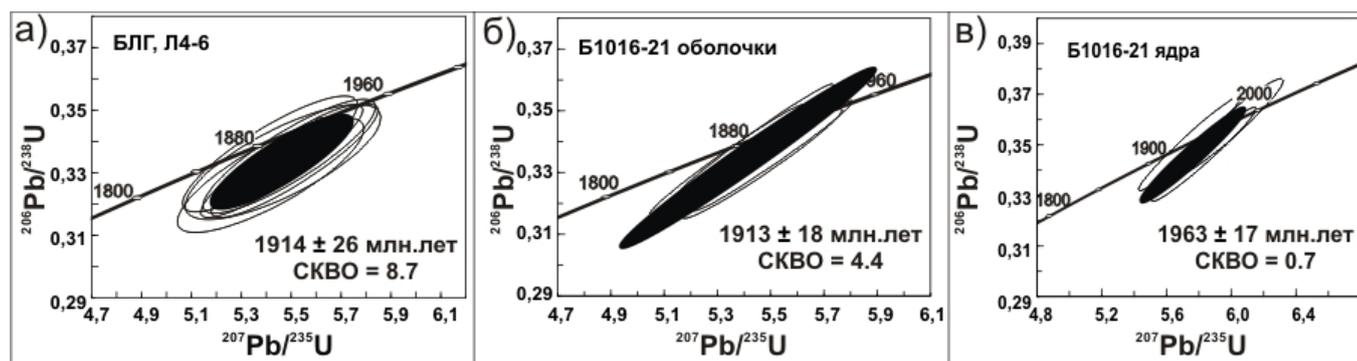


Рис. 4. Диаграммы с конкордией для цирконов из богатых кварцем метасоматических пород. Эллипсы ошибок соответствуют доверительному интервалу 2σ .

Метасоматические оболочки представлены неоднородным веществом циркона с пятнистой зональностью и многочисленными ориентированными, как и в матрице метасоматической породы, включениями силлиманита (Рис.5.б), который отсутствует во вмещающих породах. Для них характерна величина $Th/U < 0.1$.

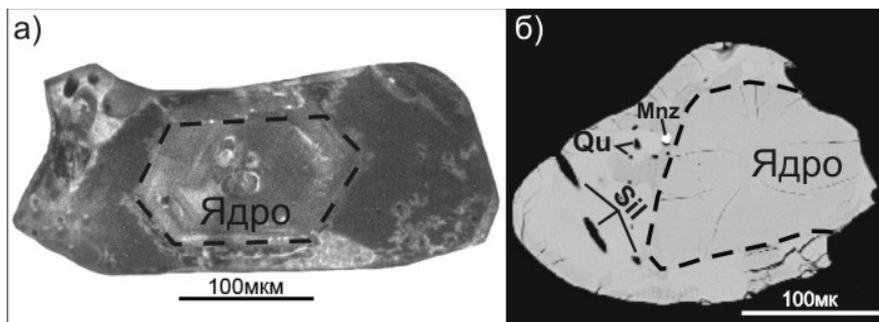


Рис. 5. Примеры анализировавшихся цирконов. а) СЕ - изображение циркона из метасоматической породы, с оболочкой и зональным ядром; б) BSE изображение циркона с включениями монацита, кварца и

ориентированными включениями силлиманита в метасоматической оболочке.

Таким образом, полученный возраст около 1913 млн. лет датирует время образования именно метасоматического ортопироксен-силлиманитового парагенезиса стадии М2. Возраст ядер с тонкой осцилляторной магматической зональностью (Рис. 5а), для которых характерна величина $Th/U = 0.15 - 0.4$, составил 1963 ± 17 млн. лет (Рис. 4.в) и отвечает возрасту магматического протолита. Принадлежность этих ядер магматическому протолиту, подтверждается еще и параметрами $\epsilon Hf(T)$ по циркону и $\epsilon Nd(T)$ по породе (Лохов и др., 2013)). Полученная оценка возраста определяет нижнюю возрастную границу проявления метаморфизма стадии М1.

Исследованием Rb-Sr и Sm-Nd систем в минералах и породах в целом получены согласующиеся значения изохронного возраста. Для богатых кварцем метасоматитов обр. Б1016-21 - 1876 ± 11 млн. лет и 1865 ± 20 млн. лет соответственно. Для обр. Л4-6 - 1877 ± 13 млн. лет и 1879 ± 20 млн. лет соответственно. Для железо-магнезиальных метасоматитов по пробе Л4-3 получены изохронные возраста: Rb-Sr - 1870 ± 5 млн. лет и Sm-Nd - 1885 ± 9 млн. лет. Для обр. Л4-2 получены менее надежные, но согласующиеся данные по Rb-Sr - 1876 ± 14 млн. лет и по Sm-Nd - 1890 ± 17 млн. лет.

Таким образом, возраст метаморфизма ранней стадии М1 не моложе 1916 млн. лет. Возраст метаморфизма поздней главной стадии М2 около 1912 млн. лет. Возраст метасоматоза около 1913 млн. лет (метасоматические оболочки цирконов), около 1885 млн. лет. (Sm-Nd, минеральные изохроны) и около 1870 млн. лет (Rb-Sr, минеральные изохроны).

Положение 2. Метасоматическое окварцевание пород (кислотное выщелачивание) и сопряженный Fe-Mg метасоматоз (базификация) в зонах наиболее интенсивных сдвиговых деформаций и флюидной переработки протекали при пиковых параметрах до 11.4 кбар и $960^\circ C$ и продолжались в отдельных зонах на ретроградной стадии, завершившись при 8.4-7.9 кбар и $760-680^\circ C$. Тренд изменения P-T параметров метаморфизма и сопряженного метасоматоза отвечает стадиям: (а) погружения и прогрева (М1), (б) быстрой компрессии и разогрева до пиковых параметров (М2), с метасоматозом при пиковых параметрах, (в) метасоматоза на фоне декомпрессии и охлаждения, (г) субизотермической декомпрессии.

Второе защищаемое положение обосновано геолого-структурными и петрографическими данными, детальным картированием и документированием зон

метасоматоза на опорных участках, документацией минеральной метасоматической зональности, термодинамическими расчетами, анализом эффектов фракционирования изотопного состава кислорода в породообразующих минералах метасоматитов.

Метасоматические породы с Sil-Орх-Qu парагенезисом имеют ряд особенностей: они сосредоточены в узкой зоне сдвиговых деформаций протяженностью около 16 км в средней части Порьегубского покрова; представлены двумя главными типами - богатыми кварцем породами ($Qu \pm Pl_{5-34}^* \pm Gr_{49-68} \pm Орх_{74-84} \pm Bt_{80-94} \pm Sil \pm Kfs$, $Qu + Pl_{32-40} \pm Bt_{76-83} + Crd_{87-89} \pm Gr_{41-55} \pm Орх_{70-73} \pm Sil$ и др.) и железо-магнезиальными породами (базификатами) ($Орх_{71-75} + Gr_{47-57} \pm Pl_{27-36} \pm Qu \pm Bt_{80-84}$, $Crd_{90-91} \pm Gr_{49-61} \pm Bt_{78-89} \pm Орх_{73-77} \pm Pl_{23-29} \pm Qu \pm Kfs$ и др.); временная связь с этапом сдвиговых деформаций доказана структурными исследованиями (Козлова и др., 1991). Для богатых кварцем пород характерны четко выраженная тонкополосчатая бластомилонитовая текстура и зональное распределение минералов от полиминеральных до мономинеральных зон, реакционные соотношения минералов на границах зон, что хорошо согласуется с моделью метасоматической зональности Д.С. Коржинского.

И в обнажениях, и в масштабах образцов можно наблюдать все элементы метасоматической зональности. Наблюдается последовательное исчезновение минералов. Например, на участке Паленый метасоматическая колонка для богатых кварцем метасоматитов выглядит следующим образом: исходная порода - $Pl + Орх + Gr + Qu \pm Bt$ кристаллический сланец или $Pl + Qu + Gr + Bt \pm Орх$ гнейс. I. $Qu + Sil + Gr + Орх + Bt \rightarrow$ II. $Qu + Sil + Gr \pm Bt$ или $Qu + Sil + Орх \pm Bt \rightarrow$ III. $Qu + Sil \rightarrow$ IV. Qu . Переход от внешних зон метасоматической колонки к внутренним связан с уменьшением числа темноцветных минералов в процессе растворения под воздействием флюида.

Методом TWEEQU (Berman, 1991; Berman, Aranovich, 1996) были исследованы богатые кварцем и железо-магнезиальные метасоматиты с Орх-Sil-Qu, Crd-Орх и Crd-Gr парагенезисами. Для кордиеритсодержащих парагенезисов из-за высокой чувствительности к изменению состава кордиерита (даже в пределах погрешности микронзондового анализа) используются «пучки» с большими СКО. Для пород, содержащих Sil-Орх-Qu парагенезис, получен 41 «пучок» (4-5 IR) с параметрами 9.8-11.4 кбар, 0-0.8 кбар и 833-961°C, СКО 2-31°C (Рис.6). Пиковые параметры по давлению получены для богатой кварцем породы (Рис.6.а). Пиковые параметры по температуре получены для железо-магнезиальной породы (Рис.6.в).

* Индексы после минералов: Crd, Gr, Орх, Bt, Sp, Sap - xMg; Pl - номер плагиоклаза.

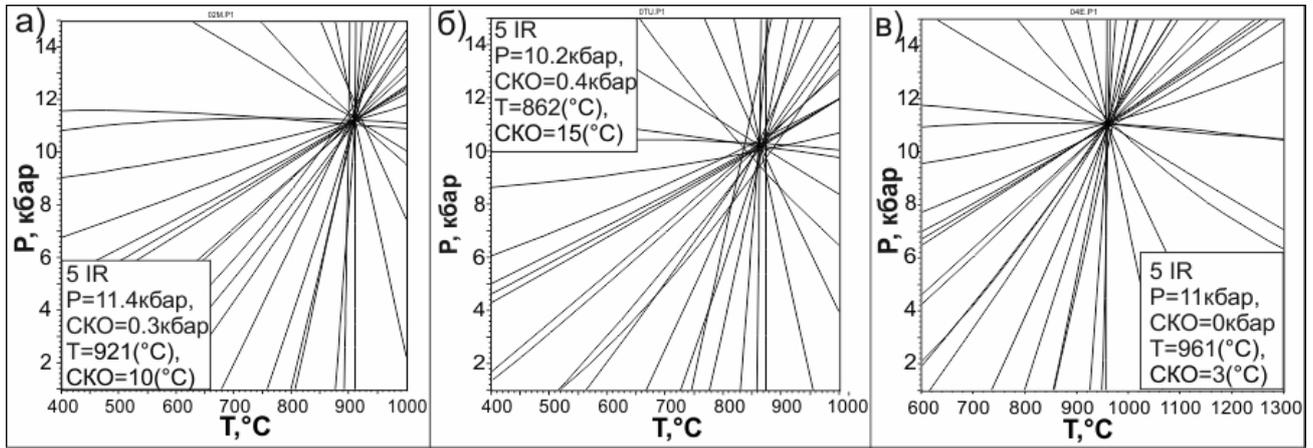


Рис. 6. Результаты термобарометрического исследования метасоматических пород с $Qu+Pl+Orx+Gr+Sil+Bt$ парагенезисом. а, б) Богатые кварцем метасоматиты; в) железомagneзиальные метасоматиты.

Начало регрессивной стадии метасоматоза проявляется в распространении парагенезиса Crd и Orx . В таких породах силлиманит часто окружен кордиеритовыми «рубашками» и уже не имеет прямых контактов с ортопироксеном. Для этих пород (и бог. Qu и $Fe-Mg$) получено 10 «пучков» (4 IR) с параметрами 9.9-9.2 кбар, SKO 0.2-0.6 кбар и 929-841°C, SKO 15-38°C (Рис.7.а). Информация о заключительном этапе регрессивной стадии метасоматоза получена по $Fe-Mg$ метасоматитам с парагенезисом Crd и Gr . Для таких пород получено 8 «пучков» (3-4 IR) с параметрами 8.4-7.9 кбар, SKO 0.2-0.4 кбар и 756-680°C, SKO 5-13°C (Рис.7.б). Парагенезисы поздних кордиеритсодержащих симплектитовых структур, образующих прерывистые каймы или короны вокруг порфиробластов граната, позволяют построить «пучки» с 4-5 IR. Получено 4 «пучка» с параметрами 8.7-5.5 кбар, SKO 0.8-1.4 кбар и 757-666°C, SKO 14-34°C (Рис.7.в).

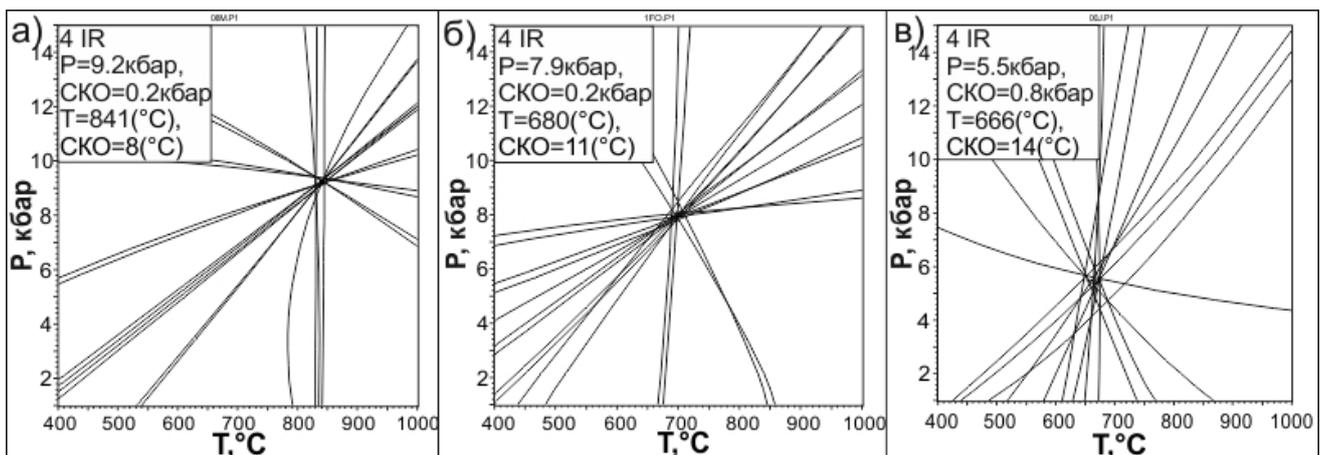


Рис. 7. Результаты термобарометрического исследования метасоматических пород. Регрессивная стадия метасоматоза. а) Парагенезис $Qu+Crd+Orx+Sil+Bt$; б) парагенезис $Pl+Qu+Bt+Crd+Gr+Sil$; в) парагенезис $Gr+Pl+Orx+Crd$.

Кордиеритсодержащие симплектиты отражают самый поздний этап преобразований пород, происходящий при затухании процессов перед выводом пород на поверхность.

Таким образом, тренд изменения Т-Р параметров коллизионного метаморфизма и сопряженного метасоматоза (Рис.8), отвечает стадиям: (а) быстрого погружения,

компрессии и прогрева (M1-M2), (б) компрессии и разогрева до пиковых параметров (M2), с метасоматозом при пиковых параметрах, (в) метасоматоза на фоне декомпрессии и охлаждения, (г) субизотермической декомпрессии при выводе на поверхность.

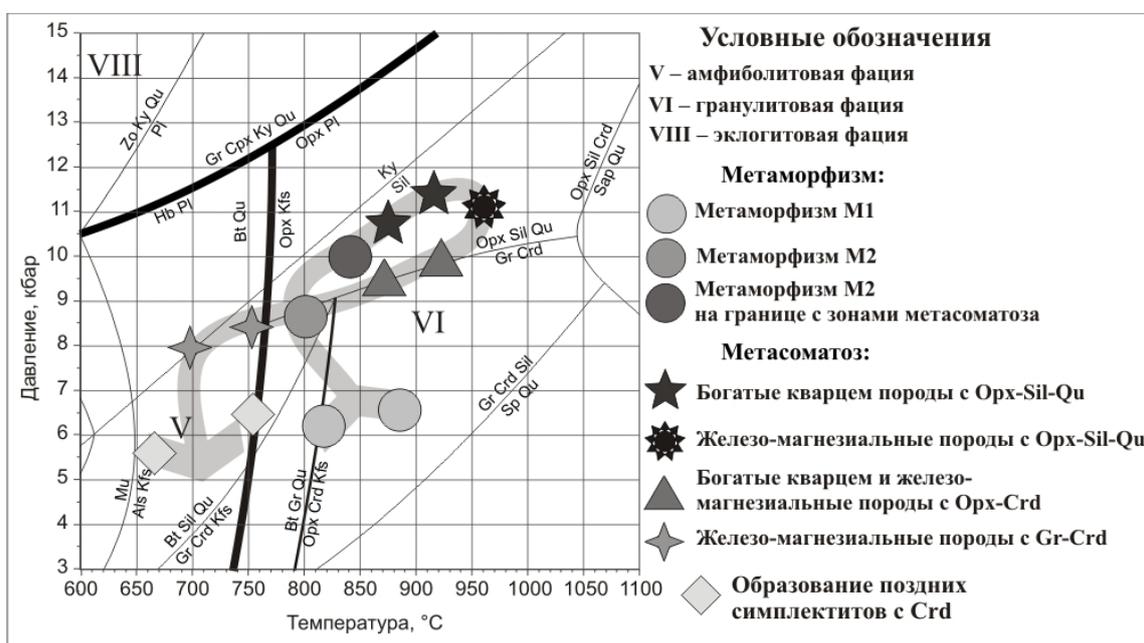


Рис. 8. Тренд P-T эволюции пород в Пор'егубском покрове (ЛГП).

Масс-спектрометрические измерения изотопного состава кислорода, выделенного из силикатных пород и минералов методом фторирования, выполнены Е.О. Дубининой (ИГЕМ РАН) на масс-спектрометре DELTAplus (Thermo, Finnigan). Было изучено фракционирование изотопов кислорода между главными минералами изученных ассоциаций - кварцем, ортопироксеном и гранатом (Аранович и др, 2010). Метасоматическая ассоциация ортопироксен+гранат+кварц во всех случаях показывает высокую температуру изотопно-кислородного равновесия: ~ 820-950°C (Qu - Gr, рис.9.а) и ~ 750-940°C (Qu - Орх, рис.9.б). Такие величины температуры хорошо согласуются с результатами минеральной термометрии методом TWEEQU.

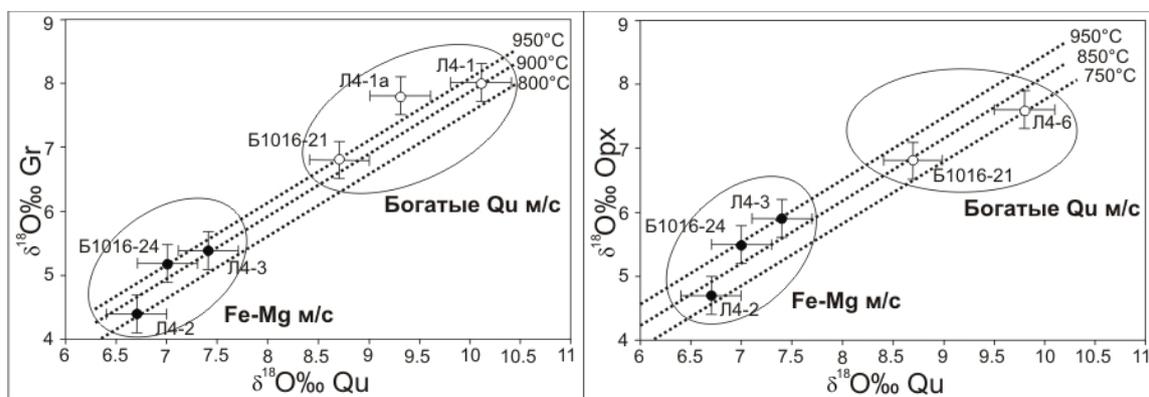


Рис. 9. Диаграммы изотопного фракционирования в системе Qu-минерал. Линии изотерм рассчитаны по (Valley, 2001). а) Для граната; б) для ортопироксена.

Таким образом давление и температура при метасоматозе в целом определялись глубиной, но максимальные T и P (пиковые условия), по-видимому,

достигались в сдвиговых зонах и за счет компрессионного эффекта в ходе надвигообразования при наличии дискретных потоков высокотемпературных флюидов. На удалении от сдвиговых зон (между ними) T были меньше, так как процессы флюидной переработки, затухая, происходили на микроуровне.

Расчетные термобарометрические данные, указывающие на присутствие в сдвиговых зонах локализованных потоков HT-флюида при пиковых параметрах минералообразования, подтверждаются и высокотемпературными минеральными замещениями во вмещающих породах. Например, прямо на контакте с зоной богатых кварцем метасоматитов с ортопироксеном, силлиманитом и гранатом, наблюдалось образование кайм ортопироксена по биотиту в прослое мигматизированного гранат-биотит-плаггиоклазового гнейса среди вмещающих плаггиоклаз-ортопироксеновых кристаллосланцев. Присутствию HT-флюидного потока не противоречат и находки прямого контакта шпинели и кварца в богатых кварцем метасоматических породах, что может указывать на высокие температуры минералообразования, хотя обращает на себя внимание примесь цинка в шпинели (иногда до 13.2-13.5% ZnO (0.27-0.28 ф.к. Zn), значительно расширяющая поле устойчивости шпинели с кварцем.

Положение 3. Флюидные потоки в сдвиговых зонах обладали высокой активностью воды как при метаморфизме (0.49-0.65), так и при метасоматических процессах (0.53-0.76). Метасоматическая переработка гранулитов была относительно кратковременной на пике метаморфизма и была вызвана флюидными потоками мантийного происхождения.

Третье защищаемое положение обосновано геолого-структурными данными, документированием многочисленных разнообразных по составу гидротермальных и метасоматических жил в районе исследований, расчетами величин активности воды, исследованиями изотопного состава кислорода породообразующих минералов и изотопного состава углерода графита из метасоматических пород, а также определением изотопного состава аргона из газово-жидких включений в минералах метасоматитов по валовым пробам.

О мощных дискретных флюидных потоках в сдвиговых зонах свидетельствуют широко распространенные разнообразные по составу жильные тела гидротермальных и метасоматических пород. Это разнообразные кварцевые жилы с силлиманитом, гранатом, ортопироксеном и кордиеритом; кварцевые жилы с силлиманитом и графитом; тела железо-магнезиальных пород (с Орх, Gr, Crd, Sil) разного масштаба (от первых сантиметров до нескольких метров); рудные силлиманитовые кварциты и Fe-Mg породы; кварц-сульфидные жилы.

Расчеты величин активности воды по равновесным минеральным парагенезисам с биотитом и калишпатом в метаморфических кристаллосланцах и метасоматических породах выполнены методом TWEEQU, позволяющим оценить активность воды во флюиде. Оценки активности воды во флюиде при метаморфизме M1, метаморфизме M2 и метасоматозе стадии метаморфизма M2 были получены на основании расчета равновесий с участием щелочного полевого шпата с максимальным содержанием калия по тем минеральным парагенезисам, которые показали наилучшие результаты определения PT-параметров и в которых калишпат

обнаруживал структурную равновесность с другими минералами, то есть был с ними в парагенезисе.

Расчетные величины активности воды при метаморфизме как ранней, так и главной стадий, оказались достаточно большими ($a_{H_2O} \sim 0.49-0.65$, Рис. 10), и еще большими - при метасоматозе ($a_{H_2O}=0.53-0.76$, Рис.11). Такая высокая активность воды во флюидах хорошо согласуется с устойчивостью высокомагнезиального и высокотитанистого глиноземистого биотита в метаморфических породах и его широкой устойчивостью в метасоматических породах.

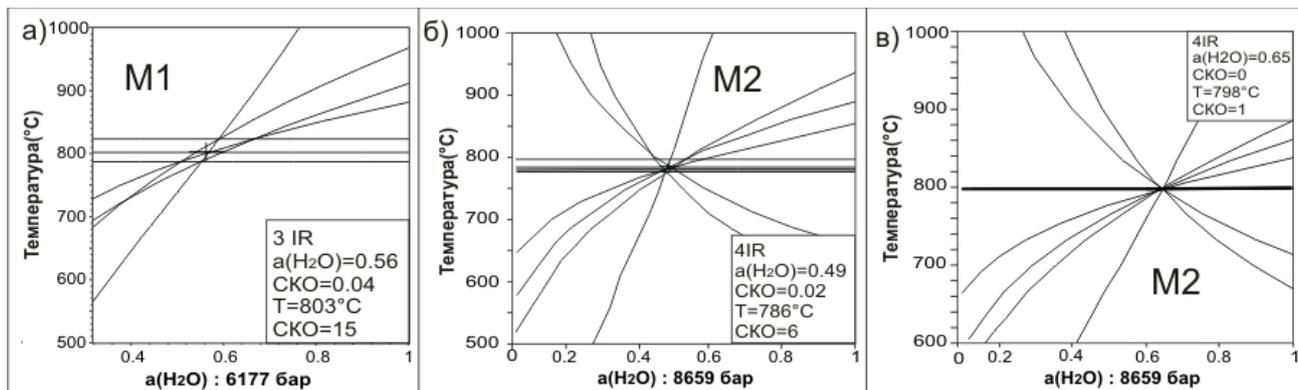


Рис. 10. Результаты расчета величин активности воды методом TWEEQU для метаморфических пород.

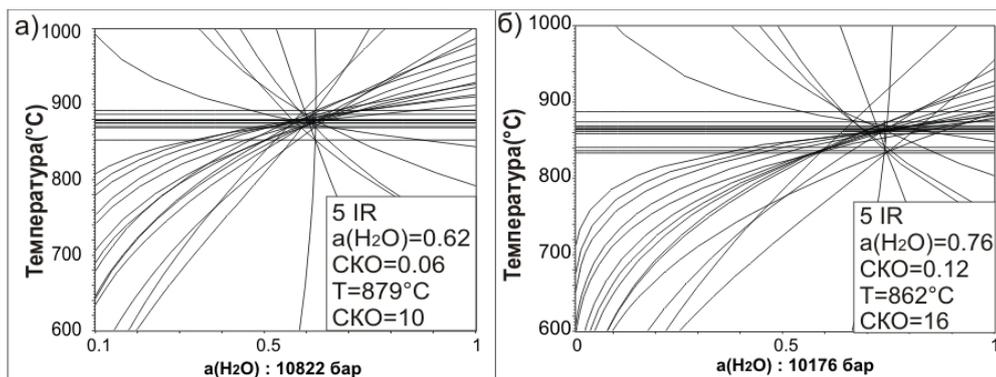


Рис. 11. Результаты расчета величин активности воды методом TWEEQU для метасоматических пород.

Богатые кварцем и железо-магнезиальные метасоматиты отчетливо отличаются друг от друга по изотопному составу кислорода в сосуществующих минералах и породах в целом. Кварцевые метасоматиты характеризуются умеренно повышенными величинами $\delta^{18}O$ (7.3 - 8.6 ‰), а железо-магнезиальные - экстремально низким для коровых эндогенных пород $\delta^{18}O = 4.7 - 5.7$ ‰. При этом и в той, и в другой группе пород наблюдаются незначительные вариации изотопного состава кислорода, хотя образцы были отобраны из разных тел метасоматических пород. Полученный температурный интервал кристаллизации метасоматических минералов 750-950°C (Рис.9.) свидетельствует об отсутствии низкотемпературного перераспределения изотопов кислорода, что может говорить об относительно быстром остывании и/или о существовании на пике дислокационного метаморфизма достаточно кратковременного весьма интенсивного внешнего флюидного потока, вызвавшего инфильтрационный метасоматоз в локальных сдвиговых зонах. Для оценки изотопного состава кислорода метаморфического протолита были изучены образцы кристаллосланца и гнейса с ассоциацией Pl+Gr+Opx+Bt+Qu, вмещающих

рассматриваемые метасоматиты. Величины $\delta^{18}\text{O}$, полученные для валовых проб этих пород, составили 9.4‰ для гнейса и 10.2 ‰ для кристаллосланца. Такой изотопный состав кислорода мог сформироваться в процессе воздействия на исходные породы метасоматизирующего флюида, имеющего более «легкий» изотопный состав, чем флюид, равновесный с минералами Fe-Mg метасоматитов. Например, таким флюидом мог быть флюид с «мантийным» изотопным составом кислорода. Результаты исследования изотопного состава углерода графита в богатых кварцем метасоматитах согласуются с данным выводом.

Исследование изотопного состава углерода графита выполнено О.В. Лоховой в Институте истории материальной культуры РАН при помощи IRMS масс-спектрометра Delta V (Thermo, Finnigan) с элементным анализатором CE-1100. Полученные величины $\delta^{13}\text{C}$ в графите из богатых кварцем метасоматитов (-12.5 ÷ -17.2‰) указывают на его abiогенное происхождение. Такой графит мог находиться в равновесии с мантийным углекислым газом ($\delta^{13}\text{C} = -6‰$) при температуре 400-830°C (Valley, 2001). Процесс осаждения углерода из флюида в виде графита мог происходить при изотермической компрессии или изобарическом остывании (Luque et.al, 1998). Согласно установленному тренду эволюции PT-параметров выпадение графита из флюида происходило на регрессивном этапе при субизобарическом остывании (Рис.8).

Валовый изотопный состав аргона флюидных включений минералов метасоматитов исследовался в Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ при помощи масс-спектрометра Micromass NG-5400, с выделением газов из флюидных включений при дроблении образцов пород в вакууме. В изученных пробах метасоматитов величина отношения $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ составила от 2400 до 11580 (Глебовицкий и др., 2012б), что соответствует доли атмосферной компоненты аргона от 2.5 до 12.5%. Минимальное значение величины $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ характерно для Fe-Mg метасоматической породы, содержащей трещиноватые кристаллы граната, что определяет значимую атмосферную контаминацию пробы. Максимальное значение установлено для метасоматического кварцевого бластомилонита. Изотопный состав аргона ($^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} = 11580$) близок к характеристикам деплетированной мантии ($^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} = 15000-25000$), что указывает на глубинный источник флюидного потока и исключает участие летучих компонентов поверхностного происхождения.

Список работ по теме диссертации, опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России

1. Бушмин С.А., Доливо-Добровольский Д.В., Лебедева Ю.М. Инфильтрационный метасоматоз в условиях гранулитовой фации высоких давлений (на примере ортопироксен-силлиманитовых пород сдвиговых зон Лапландского гранулитового пояса) // Доклады АН. 2007. Т. 412. № 3. С. 383-387.
2. Бушмин С.А., Глебовицкий В.А., Савва Е.В., Лохов К.И., Пресняков С.Л., Лебедева Ю.М., Сергеев С.А. Возраст высокобарического метасоматоза в зонах сдвиговых деформаций при коллизионном метаморфизме в Лапландском гранулитовом поясе: U-Pb-SHRIMP-II-датирование цирконов из силлиманит-

гиперстенновых пород Порьегубского покрова // Доклады АН. 2009. Т. 428. № 6. С. 792-796.

3. Аранович Л.Я., Бортников Н.С., Бушмин С.А., Викентьева О.В., Дубинина Е.О., Козловский В.М., **Лебедева Ю.М.** Флюидные потоки в региональных зонах деформаций // Петрология. 2009. Т. 17. № 4. С. 415-436.

4. **Лебедева Ю.М.**, Глебовицкий В.А., Бушмин С.А., Богомолов Е.С., Савва Е.В., Лохов К.И. Возраст высокобарического метасоматоза в зонах сдвиговых деформаций при коллизионном метаморфизме в Лапландском гранулитовом поясе: Sm-Nd метод датирования парагенезисов из силлиманит-ортопироксеновых пород Порьегубского покрова // Доклады АН. 2010. Т. 432. № 1. С. 99-102.

5. Аранович Л.Я., Дубинина Е.О., Авдеенко А.С., **Лебедева Ю.М.**, Бушмин С.А., Доливо-Добровольский Д.Д. Изотопный состав кислорода осуществляющих минералов силлиманит-гиперстенновых пород порьей губы: свидетельства участия флюида в метаморфизме гранулитовой фации // Геохимия. 2010. № 8. С. 787-800.

6. **Лебедева Ю.М.**, Бушмин С.А., Глебовицкий В.А. Термодинамические условия метасоматоза в высокотемпературных и высокобарических зонах сдвиговых деформаций (Кандалакшско-Умбинская зона, Кольский полуостров) // Доклады АН. 2012. Т. 445. № 2. С. 191-195.

Список работ по теме диссертации в других изданиях

7. Бушмин С.А., Доливо-Добровольский Д.В., **Лебедева Ю.М.** Породы с ассоциацией ортопироксен + силлиманит юго-восточной части Лапландского гранулитового пояса как результат инфильтрационного метасоматоза при высоких давлениях в сдвиговых зонах // Теория, история, философия и практика минералогии: Материалы IV Международного минералогического семинара. Сыктывкар. 2006. С. 145-148.

8. **Лебедева Ю.М.**, Бушмин С.А., Доливо-Добровольский Д.В. Минеральные реакции и условия образования гиперстен-силлиманитовых пород в гранулитах района Порьей губы (Кольский п-ов) // Научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Молодые - наукам о Земле" тезисы докладов. Москва. 2006. С. 75.

9. **Лебедева Ю.М.** Породы с ассоциацией гиперстен + силлиманит в гранулитах района Порьей губы (Кольский п-ов): минеральные реакции и условия образования // Научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Молодые - наукам о Земле". Избранные доклады. Москва. 2006. С. 70-73.

10. **Лебедева Ю.М.** Состав минералов и минеральные реакции в ортопироксен - силлиманитовых породах среди гранулитов Порьей губы (Лапландский гранулитовый пояс) // Геология, полезные ископаемые и геоэкология северо-запада России. Материалы XVII молодежной научной конференции, посвященной памяти К.О. Кратца. Петрозаводск. 2006. С. 149-151.

11. Бушмин С.А., **Лебедева Ю.М.** Инфильтрационный метасоматоз в условиях гранулитовой фации высоких давлений в зонах сдвиговых деформаций юго-восточной части Лапландского гранулитового пояса // Гранулитовые комплексы в геологическом развитии докембрия и фанерозоя. Материалы II Российской

конференции по проблемам геологии и геодинамики докембрия. СПб. 2007. С. 55-61.

12. **Лебедева Ю.М.**, Бушмин С.А. Условия образования гранат-ортопироксен-силлиманит-кварцевых пород при глубинной флюидной переработке гранулитов лапландского комплекса (район Порьей губы Белого моря) // Гранулитовые комплексы в геологическом развитии докембрия и фанерозоя. Материалы II Российской конференции по проблемам геологии и геодинамики докембрия. СПб. 2007. С. 182-188.

13. Скублов С.Г., **Лебедева Ю.М.** Особенности распределения редкоземельных и редких элементов в минералах ортопироксен-силлиманитовых пород из зон флюидной переработки гранулитов лапландского комплекса (район Порьей губы) // Гранулитовые комплексы в геологическом развитии докембрия и фанерозоя. Материалы II Российской конференции по проблемам геологии и геодинамики докембрия. СПб. 2007. С. 308-316.

14. **Lebedeva Yu.**, Dubinina E., Aranovich L., Avdeenko A., Bushmin S., Dolivo-Dobrovolsky D Fluid-present granulite facies metamorphism: evidence from oxygen isotopes, Porya Guba shear zone, Lapland Granulite Belt // Geophysical Research Abstracts. 2008. V. 10. Abst.# EGU2008-A-01085.

15. Аранович Л.Я., Дубинина Е.О., Авдеенко А.С., **Лебедева Ю.М.**, Бушмин С.А., Доливо-Добровольский Д.В. Участие флюидного потока в метаморфизме гранулитовой фации: свидетельства по изотопному составу кислорода сосуществующих минералов силлиманит-гиперстеновых пород из Порьегубского покрова юго-восточного фрагмента Лапландского гранулитового пояса // Изотопные системы и время геологических процессов. Т. 1. СПб. ИГГД РАН. 2009. С. 40-44.

16. Бушмин С.А., **Лебедева Ю.М.** Высокотемпературный высокобарический метасоматоз в условиях гранулитовой фации в зонах сдвиговых деформаций // Физико-химические факторы петро- и рудогенеза: новые рубежи. Москва. ИГЕМ РАН. 2009. С. 85-88.

17. Бушмин С.А., Савва Е.В., Лохов К.И., Пресняков С.Л., **Лебедева Ю.М.**, Сергеев С.А. Изотопный возраст силлиманит-гиперстеновых пород из Порьегубского покрова юго-восточного фрагмента Лапландского гранулитового пояса: U-Pb SHRIMP II датирование цирконов // Изотопные системы и время геологических процессов. том 1. СПб. ИГГД РАН. 2009. С. 92-96.

18. Капитонов И.Н., Лохов К.И., Пресняков С.Л., Бушмин С.А., **Лебедева Ю.М.**, Сергеев С.А.. Изотопно-геохронологические исследования цирконов из метаморфических и метасоматических пород Порьегубского покрова юго-восточного фрагмента Лапландского гранулитового пояса: сопоставление U-Pb, Lu-Hf и Sm-Nd систематик // Изотопные системы и время геологических процессов. Т. 1. СПб. ИГГД РАН. 2009. С. 220-222.

19. **Лебедева Ю.М.**, Бушмин С.А., Богомолов Е.С., Савва Е.В., Лохов К.И.. Изотопный возраст силлиманит-гиперстеновых пород из Порьегубского покрова юго-восточного фрагмента Лапландского гранулитового пояса: Sm-Nd метод датирования метаморфических парагенезисов // Изотопные системы и время геологических процессов. СПб. ИГГД РАН. 2009. Т. 1. С. 318-321.

20. Прасолов Э.М., Лохов К.И., Бушмин С.А., Савва Е.В., Козлов Е.Н., **Лебедева Ю.М.** Происхождение и состав флюида при НТ/НР метасоматозе в

Порьегубском покрове Лапландского гранулитового пояса: изотопный состав благородных газов и углерода // Новые горизонты в изучении процессов магмо- и рудообразования. Материалы научной конференции. Москва. ИГЕМ РАН. 2010. С. 370-371.

21. **Лебедева Ю.М.** Метасоматические процессы при высоких температурах и давлениях в зонах сдвиговых деформаций Порьегубского покрова Лапландского гранулитового пояса Балтийского щита // Гранулитовые и эклогитовые комплексы в истории Земли. Петрозаводск. 2011. С. 118-121.

22. **Лебедева Ю.М.** РТ-условия свекофеннского метаморфизма и метасоматоза в Порьегубском покрове Лапландского гранулитового пояса // Геология, геофизика и геоэкология: исследования молодых. Круглый стол «стратегические виды минерального сырья России, СНГ и сопредельных государств». Апатиты. 2011. С. 77-79.

23. Глебовицкий В.А., Бушмин С.А., **Лебедева Ю.М.**, Лохов К.И., Прасолов Э.М., Богомолов Е.С., Бороздин А.П., Савва Е.В. Метаморфизм и метасоматоз в зонах сдвиговых деформаций (Балтийский щит): петрология и изотопный возраст / В кн.: Фундаментальные основы формирования ресурсной базы стратигического сырья (Au, Ag, Pt, Cu, редкие элементы и металлы). Ред. Бортников Н.С. М.: ГЕОС, 2012. С. 223-274.

24. **Лебедева Ю.М.** Активность воды при гранулитовом метаморфизме и метасоматозе (район Порьей губы Белого моря) // Актуальные проблемы геологии докембрия геофизики и геоэкологии. XXV Молодежная конференция, посвященная 100-летию чл.корр. АН СССР К.О. Кратца. СПб. 2014. С. 136-141.