

На правах рукописи

Салимгараева Ляйсан Ильшатовна



**ГЕОХИМИЯ РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ
ВЫСОКОБАРИЧЕСКОМ МЕТАМОРФИЗМЕ
(НА ПРИМЕРЕ ЭКЛОГИТОВ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО
БЕЛОМОРЬЯ И ЮГО-ЗАПАДНОЙ НОРВЕГИИ)**

*Специальность 25.00.09 - Геохимия, геохимические методы
поисков полезных ископаемых*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук**

Санкт-Петербург – 2022

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель:

доктор геолого-минералогических наук, доцент

Скублов Сергей Геннадьевич

Официальные оппоненты:

Каулина Татьяна Владимировна

доктор геолого-минералогических наук, Геологический институт – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук», лаборатория геологии докембрия, заведующий лабораторией;

Скобленко Анфиса Владимировна

кандидат геолого-минералогических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геологический институт Российской академии наук, лаборатория геодинамики позднего докембрия и фанерозоя, старший научный сотрудник.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт экспериментальной минералогии имени академика Д.С. Коржинского Российской академии наук (ИЭМ РАН), Московская обл., г. Черноголовка.

Защита диссертации состоится 30 сентября 2022 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.04 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 30 июля 2022 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ГУЛЬБИН
Юрий Леонидович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В последнее время в метаморфической петрологии большое внимание уделяется вопросам подвижности редких элементов в ходе регионального метаморфизма (Scambelluri, Philippot, 2001; Bebout, 2007; Zack, John, 2007; Hermann et al., 2013). Проблемы мобильности редких элементов имеют важное значение для геохронологии и реконструкции геодинамических обстановок образования эклогитов.

Диссертационное исследование направлено на выявление характера перераспределения главных, редких и редкоземельных (REE) элементов на породном и минеральном уровнях и поведения изотопных систем (U-Pb, Sm-Nd и кислород) в меняющихся условиях высокоградиентных режимов метаморфизма.

Актуальность исследования заключается в установлении эволюции состава сосуществующих пород и минералов из высокоградиентных метаморфических комплексов на основе комплексного подхода с использованием петрологических и минералого-геохимических (в т.ч. изотопно-геохимических) методов.

Степень разработанности темы исследования

Наиболее полную историю метаморфических преобразований возможно реконструировать, только связывая геохронологические данные с параметрами метаморфизма и сохранностью изотопных систем в породах и минералах (Vance et al., 2003; Kylander-Clark et al., 2013; Engi et al., 2017; Bosse, Villa, 2019). Важными вопросами являются подвижность редкоземельных и редких элементов и степень закрытости метаморфических систем (Baxter, Scherer, 2013; Ague, 2017). Решение этих задач полностью отвечает новому научному направлению – петрохронологии, связывающему возраст

(продолжительность) геологических процессов с физико-химическими условиями их протекания (Engi et al., 2017).

Цель работы заключается в выявлении закономерностей поведения редких элементов на породном и минеральном уровнях при образовании эклогитов и их последующих изменениях (на примере проявлений эклогитов Беломорского подвижного пояса, Западного гнейсового региона и комплекса Берген Аркс).

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Оценка степени изменения первичного химического состава пород при преобразовании эклогитов в амфиболиты и гранулитов в эклогиты.

2. Характеристика перераспределения редких и редкоземельных элементов между сосуществующими минералами (гранатами, пироксенами и амфиболами) в процессах эклогитизации гранулитов и амфиболизации эклогитов.

3. Локальное датирование циркона из главных разновидностей пород комплекса Берген Аркс U-Pb методом, сопровождаемое изучением изотопного состава кислорода, а также исследование распределения редких и редкоземельных элементов в цирконе.

4. Оценка устойчивости изотопных систем (U-Pb и изотопная система кислорода) при высокобарическом метаморфизме.

Научная новизна работы:

1. Для опорных участков эклогитов установлены тенденции изменения редкоэлементного состава пород при полиметаморфизме. Преобразование эклогитов в амфиболиты Западного гнейсового региона происходит с привнесением Rb и выносом LREE, а процессы амфиболизации эклогитов

Керетского архипелага и эклогитизации гранулитов комплекса Берген Аркс в основном субзихимичны.

Выявлены закономерности изменения состава породообразующих минералов в отношении редких и редкоземельных элементов при преобразовании эклогитов в амфиболиты и гранулитов в эклогиты (при эклогитизации гранулитов гранаты обогащаются HREE; при амфиболитизации эклогитов гранаты обедняются HREE, Ti и Y, пироксены обогащаются REE, при этом амфиболы наследуют характер распределения REE в пироксенах).

2. Проведена сравнительная оценка устойчивости изотопных систем (U-Pb и кислород) при высокоградиентном метаморфизме.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Проведенное исследование вносит вклад в развитие нового научного направления – петрохронологии, сопоставляющего геохронологические данные, в данном случае, с условиями метаморфизма, а также способствует решению проблем эволюции метаморфических комплексов Фенноскандинавского щита. Полученные результаты комплексного изотопно-геохимического исследования высокометаморфизованных пород Фенноскандинавского щита были использованы при написании отчета по НИР ИГГД РАН «Разработка новых подходов к изотопному датированию и изучение особенностей распределения редких элементов в минералах-геохронометрах для целей совершенствования геохронологической школы докембрия», № FMNU-2019-0002, что зафиксировано в акте внедрения от 12 мая 2022.

Результаты и научные выводы диссертации могут быть использованы при картировании метаморфических комплексов, а также в учебных курсах «Общая геохимия», «Изотопная геохимия» и «Петрология».

Методология и методы исследования.

Методологической основой исследования является научный подход с комплексированием современных изотопно-геохимических и минералого-геохимических методов. В диссертации были использованы образцы пород, собранные автором в составе коллектива ИГГД РАН в ходе полевых работ в 2018-2019 гг. Дополнительно в работе использовались образцы, отобранные на островах Керетского архипелага в ходе полевых работ 2011–2017 гг. сотрудниками ИГГД РАН под руководством С.Г. Скублова. Изученная коллекция состоит из 65 образцов, отобранных из всех разновидностей пород на опорных обнажениях (как правило, из будин эклогитов), где наблюдаются однозначно интерпретируемые переходы одной породы в другую. Химический состав петрогенных (главных) элементов в породах определен методом XRF на спектрометре ARL-9800, содержание редких и редкоземельных элементов в породе проанализировано методом ICP-MS на масс-спектрометре ELAN-DRC-6100 по стандартным методикам (ВСЕГЕИ). Состав минералов исследован в ИГГД РАН на сканирующем электронном микроскопе JEOL-JSM-6510LA с энергодисперсионным спектрометром JED-2200 (JEOL) (~1500 точек) и микрозонде (JEOL JXA-8230), оснащенном 4 волновыми детекторами (~200 точек). Картирование гранатов по главным элементам выполнено в ИГМ СО РАН на микрозонде JEOL JXA-8230. Анализ минералов (циркона, гранатов, пироксенов и амфиболов) на содержание редких и редкоземельных элементов (300 анализов) выполнен методом SIMS на ионном микрозонде Cameca IMS-4f (Ярославский филиал ФТИАН РАН). Локальное датирование циркона U-Pb методом выполнено на ионном микрозонде Cameca IMS-1280-HR, изотопный состав кислорода в цирконе определен на ионном микрозонде Cameca IMS-1280 в Институте геологии и

геофизики Китайской Академии наук (IGG CAS, 38 точек). Датирование пород и минералов Sm-Nd методом (4 образца) выполнено методом ID-TIMS в ИГГД РАН.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Образование эклогитов и их последующие изменения происходят с разной степенью нарушения первичного химического состава пород по редким элементам: преобразование эклогитов в амфиболиты Западного гнейсового региона сопровождается привнесением Rb и выносом LREE, процессы амфиболитизации эклогитов Керетского архипелага и эклогитизации гранулитов комплекса Берген Аркс в основном суббизохимичны.

2. В процессах эклогитизации гранулитов и амфиболитизации эклогитов редкие и редкоземельные элементы активно перераспределяются между сосуществующими минералами (при эклогитизации гранулитов гранаты обогащаются HREE; при амфиболитизации эклогитов гранаты обедняются HREE, Ti и Y, пироксены обогащаются REE, при этом амфиболы наследуют характер распределения REE в пироксенах).

3. При наложенном на гранулиты комплекса Берген Аркс высокобарическом метаморфизме происходит изменение редкоэлементного состава краевых зон циркона с приобретением ими типичных эклогитовых геохимических характеристик (пониженное содержание REE с субгоризонтальным спектром в области HREE) при сохранности U-Pb и O изотопных систем.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена представительностью каменного материала и использованием аналитических данных, полученных в аккредитованных лабораториях.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и

конференциях: Молодежная научно-практическая конференция XVI конференция студенческого научного общества «Современные исследования в геологии» (Санкт-Петербург, 2018), XVI Ферсмановская научная сессия ГИ КНЦ РАН (Апатиты, 2019), VI конференция «Ультрамафит-мафитовые комплексы: геология, строение, рудный потенциал» (Иркутск, 2019), Российско-Германский сырьевой форум (Санкт-Петербург, 2019), "Минералогические музеи 2019 – Минералогия вчера, сегодня, завтра" (Санкт-Петербург, 2019), XI Всероссийская молодежная научная конференции «Минералы: строение, свойства, методы исследования» (Екатеринбург, 2020), XIX Международный семинар «Геология, геоэкология, эволюционная география» (Санкт-Петербург, 2020), Geological International Student Summit (Санкт-Петербург, 2021), XXIX Всероссийская молодежная конференция «Строение литосферы и геодинамика» (Иркутск, 2021), XX Российская молодёжная научно-практическая Школа с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования» (Москва, 2021), Конференция MinGeoIntegration – XXI (Киев, 2021).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования, в анализе научной литературы по теме работ, участии в полевых работах и отборе образцов, получении и обработке аналитических данных, интерпретации результатов.

Публикации по работе. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 17 печатных работах, в том числе в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 6 глав с выводами по каждой из них, заключения, список литературы включает 246 наименований, три приложения. Диссертация изложена на 151 странице, содержит 62 рисунка и 19 таблиц.

Благодарности. Автор выражает искреннюю признательность своему научному руководителю проф. С.Г. Скублову за всестороннюю поддержку. Автор благодарит А.В. Березина (ИГГД РАН) за помощь в процессе работы и обсуждение результатов.

За проведение аналитических работ автор признателен О.Л. Галанкиной, Е.С. Богомолу (ИГГД РАН), С.Г. Симакину, Е.В. Потапову (ЯФ ФТИАН РАН), Д.И. Резвухину (ИГМ СО РАН), Ч.-Л. Ли, С.-Х. Ли, А.Е. Мельнику, Х.-Х. Линг и Г. Тангу (IGG CAS). Исследование было поддержано грантом РФФИ (проект № 20-35-90001).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе охарактеризована проблема мобильности химических элементов в процессе эклогитового метаморфизма.

Во второй главе представлена общая информация о геологическом строении района и объектах исследования (эклогиты и ассоциирующие с ними породы Фенноскандинавского щита и его обрамления).

В третьей главе описаны использованные в работе аналитические методы.

В четвертой главе приведена петрографическая и геохимическая характеристика исследуемых пород, а также выполнена оценка изохимичности метаморфических систем.

В пятой главе дана характеристика состава породообразующих минералов, как по главным, так и по редким и редкоземельным элементам, и показаны закономерности перераспределения примесных элементов

между сосуществующими минеральными фазами при полиметаморфизме.

В шестой главе приведена изотопно-геохимическая характеристика циркона из пород комплекса Берген Аркс, а также выполнена оценка устойчивости изотопных систем при высокоградиентном метаморфизме.

Заключение отражает обобщенные выводы по результатам исследования в соответствии с целью и решаемыми задачами.

Краткая характеристика объектов исследования

Фенноскандинавский щит является классической областью распространения комплексов пород раннего докембрия и в то же время самым крупным выходом фундамента Восточно-Европейской платформы. Исследованные объекты (рисунок 1а) находятся в пределах Беломорского подвижного пояса на северо-востоке и Каледонского орогена на юго-западе Фенноскандинавского щита.

Беломорский подвижный пояс (БПП) – линейная структура полициклического развития, вытянутая в направлении с северо-запада на юго-восток и сформированная между Карельским и Кольским кратонами в восточной части Фенноскандинавского щита (Глебовицкий, 2005; Слабунов, 2008).

Беломорский подвижный пояс слагают мезо- и неоархейские глубокометаморфизованные метаосадки, метавулканиды и плутонические породы тоналит-трондьемит-гранодиоритовой ассоциации (Бибикова и др., 2004; Слабунов, 2008; Щербак и др., 2010). Структурные исследования предшественников (Миллер, Милькевич, 1995; Глебовицкий и др., 1996; Миллер, 1997) указывают на то, что Беломорский подвижный пояс является коллизионной зоной между Карельским и Кольским кратонами.

В Беломорском подвижном поясе эклогиты и эклогитоподобные породы распространены довольно широко, в настоящей работе в основном речь идёт об эклогитах, обнаруженных сравнительно недавно на островах Керетского архипелага (Березин и др., 2013; Березин, Скублов, 2014; Скублов

и др., 2016; Березин и др., 2020). Здесь эклогиты представлены будинированными телами (рисунок 1b). В работе приведены результаты исследования циркона из эклогитов Гридино, с которых начался современный период исследования эклогитов БПП (Володичев и др., 2004).

Западный гнейсовый регион (ЗГР) Норвегии представляет собой крупный (~ 30 000 км²) выход основания Фенноскандинавского щита в пределах скандинавских каледонид, погребенный и преобразованный во время каледонской орогении (Andersen, Jamtveit, 1990). Эклогиты каледонского возраста (400-440 Ma) (Griffin, Brueckner, 1985) встречаются в виде линз размером от первых метров до километров в гнейсах, испытавших широко распространенные позднекаледонские деформации и метаморфизм амфиболитовой фации (Andersen, Jamtveit, 1990; Krabbendam, Wain, 1997), и демонстрирующих слабо проявленные признаки метаморфизма эклогитовой фации (Wain et al., 2000).

Большинство эклогитов в ЗГР, по-видимому, являются результатом НР метаморфизма, ограниченного полем устойчивости кварца (Krogh, Carswell, 1995), однако встречаются и проявления УНР-метаморфизма (Smith, 1984; Cuthbert et al., 2000; Wain et al., 2000).

Полиметаморфический комплекс Берген Аркс (БАК) расположен в пределах каледонского орогена на западе Норвегии, сформированного в результате коллизии Балтики и Лаврентии. Региональная геологическая структура, с которой связаны эклогиты, имеет дугообразную в плане форму, обращенную выпуклой стороной на восток. Она состоит из нескольких тектонических покровов, сменяющих друг друга и надвинутых на породы Западного гнейсового региона. Контакт между комплексами тектонический, с развитием зоны пластической деформации (Boundy et al., 1992).

Метаанортозитовый комплекс, представленный на о-ве Холсной, интерпретируется как выведенная на поверхность пластина нижней континентальной коры. Предполагается, что он был сформирован как расслоенная интрузия, сложенная анортозитами, мангеритами, чарнокитами, габбро и ультрамафитами. Кроме того, в пределах комплекса выделяются в

подчиненном количестве гнейсы и метаосадки. Основные породы имеют признаки гранулитового метаморфизма, на который был впоследствии локально наложен эклогитовый (Austrheim, Robins, 1981). Процессы эклогитизации были локализованы вдоль так называемых шир-зон (рисунок 1с), проницаемых для флюида, сопровождавшего процессы метаморфизма (Austrheim, Griffin, 1985).

Основные результаты диссертации отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Образование эклогитов и их последующие изменения происходят с разной степенью нарушения первичного химического состава пород по редким элементам: преобразование эклогитов в амфиболиты Западного гнейсового региона сопровождается привнесением Rb и выносом LREE, процессы амфиболитизации эклогитов Керетского архипелага и эклогитизации гранулитов комплекса Берген Аркс в основном субизохимичны.

Для корректной оценки баланса привноса-выноса вещества в ходе метаморфизма химические анализы пород рассматривались преимущественно «парами», реже «тройками», по отдельности для каждого обнажения. Для оценки баланса вещества по главным элементам использовались два взаимодополняющих метода: кислородный метод Барта (Barth, 1948) и метод инертного компонента (Казицын, Рудник, 1968).

Породы БПП по петрохимическим характеристикам относятся к группе низкоглиноземистых основных пород калиево-натриевой серии ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 1-4$). Магнезиальность исследуемых пород лежит в пределах 0.30-0.47. Результаты расчетов показали, что процессы формирования гранатовых амфиболитов из гранатовых прослоев для некоторых из будин (о-ва Сидоров и Кемлуды) происходили с привнесением TiO_2 (до 111 отн.%), Fe_2O_3^* (до 54 отн.%) и MnO (до 32 отн.%) и выносом относительно эклогитов MgO (до 42 отн.%), Na_2O (до 54 отн.%) и K_2O (до 100 отн.%). Процессы формирования амфиболитов отличаются значительным привнесением только K_2O (до 268 отн.%) (рисунок 2а). Предполагается, что K привносился внешним флюидом из вмещающих пород (гранито-гнейсов). Воздействие флюида фиксируется по появлению пегматоид-

ных обособлений на границе будин и вмещающих их гранито-гнейсов. Спектры распределения REE для большинства пород, характеризуются слабой дифференциацией с понижением содержания от легких к тяжелым REE. Суммарное содержание REE для большинства образцов варьирует слабо (от 85 до 120 ppm). Гранатовые амфиболиты обогащены REE (до 437 ppm) относительно эклогитов и амфиболитов. При рассмотрении перехода эклогитов в амфиболиты не отмечается изменение состава пород по редкоземельным элементам (рисунок 2а).

Породы ЗГР по петрохимическим характеристикам преимущественно относятся к основным низкоглиноземистым. Результаты расчета по инертному компоненту показали, что во всех изученных будинах в ходе амфиболитизации эклогитов происходит привнос MgO и K₂O и вынос Na₂O. По редким элементам отмечается обогащение амфиболитов Rb относительно эклогитов. В большинстве случаев спектры REE для эклогитов характеризуются пологой формой, реже – слабой дифференциацией с обеднением в области HREE (La_N/Lu_N достигает 8.5). Амфиболиты, в свою очередь, преимущественно обедняются LREE относительно эклогитов. Суммарное содержание REE понижается от эклогитов к амфиболитам примерно вдвое (разница достигает 80 ppm) (рис. 2b).

Породы БАК по петрохимическим характеристикам относятся к высокоглиноземистым магнезиальным (Mg# > 0.55-0.65) основным породам натриевой серии (Na₂O/K₂O > 4). Результаты расчета по инертному компоненту показали, что эклогитизация гранулитов происходит с привносом Fe₂O₃* (до 87 отн.%), MgO (до 139 отн.%), MnO (до 151 отн.%). Спектры REE для всех изученных пород имеют дифференцированный характер с пониженным содержанием HREE относительно LREE (La_N/Lu_N ≈ 5.7-34.4). Наблюдается четко выраженная положительная Eu-аномалия (Eu/Eu* ≈ 2.4-9.8), связанная с тем, что метаанортозиты содержат значительное количество плагиоклаза – минерала-концентратора Eu. Суммарное содержание REE в породах варьирует от 7.4 до 18.4 ppm. По содержанию редких элементов также не наблюдается значимых различий в составах гранулитов и эклогитов (рисунок 2с).

2. В процессах эклогитизации гранулитов и амфиболитизации эклогитов редкие и редкоземельные элементы активно перераспределяются между сосуществующими минералами (при эклогитизации гранулитов гранаты обогащаются HREE; при амфиболитизации эклогитов гранаты обедняются HREE, Ti и Y, пироксены обогащаются REE, при этом амфиболы наследуют характер распределения REE в пироксенах).

Для установления эволюции состава минералов в ходе высокоградиентного метаморфизма был изучен редкоэлементный состав ряда сквозных минералов из пород разных фаций метаморфизма. При изучении характера распределения редких элементов в гранатах из эклогитов и гранат-амфиболовых прослоев БПП было установлено, что во всех исследованных гранатах состав центральных и краевых частей зерен контрастно отличается. Распределения REE в моноклиновых пироксенах из пироксен-плаггиоклаз-амфиболовых симплектитов из эклогитов (обр. 707) характеризуются слабо дифференцированным спектром с понижением содержания от легких к тяжелым REE, что связано с присутствием в парагенезисе гранатов – типичных концентраторов HREE. В изученных породах выделяется две генерации амфиболов: мелкозернистый амфибол в составе симплектитов в эклогитах (обр. 707) и крупнозернистый (до 300 мкм в поперечнике) амфибол в амфиболитах каймы (обр. 711). Спектры REE в амфиболах из эклогитов соответствуют по форме спектрам REE для моноклиновых пироксенов – таким образом проявляется эффект наследования, возникающий при замещении одного минерала другим (Скублов, 2005).

Для гранатов из эклогитовых и гранатовых амфиболитов ЗГР установлены следующие закономерности: гранаты из эклогитов по REE не зональны, а гранаты из гранатовых амфиболитов характеризуются наличием слабовыраженной зональности – краевая часть гранатов из гранатовых амфиболитов характеризуется пониженным относительно центральной содержанием тяжелых REE и Y, а также пониженным содержанием Ti и повышенным – Sr. Моноклиновые пироксены (омфацит) в эклогитах характеризуется синусои-

дальной формой спектров с обогащением в области LREE и обеднением в области HREE относительно хондрита, характерной для минералов, образованных при неравновесных процессах. Диопсид из симплектитов в гранатовых амфиболитах характеризуется повышенным, относительно омфацита, содержанием REE (до 45 ppm), в основном HREE, и более пологой формой спектра REE. Амфиболы в эклогитах характеризуются спектрами REE, которые полностью повторяют форму спектров омфацита. Спектры REE для амфиболов из амфиболитов также характеризуются синусоидальной формой, однако, более пологой, с обогащением спектра в области MREE и HREE. Кроме того, в ходе амфиболитового метаморфизма амфиболы обогащаются рядом высоkozарядных элементов – Ti, V, Y, Zr, Hf.

Гранаты из гранулитов (обр. 1801) комплекса Берген Аркс характеризуются отсутствием зональности по REE и редким элементам. Спектры распределения характеризуются резко выраженной дифференциацией от легких к средним REE с обеднением спектра в области LREE (до 10 хондритовых отношений) и практически отсутствием дифференциации от Gd до Lu (La_N/Lu_N находится в интервале 0.02-0.05). В гранатах из эклогитов проявлена зональность в распределении REE между центральной зоной и каймой. Форма спектров распределения REE для центральных частей зерен аналогична спектрам распределения REE в гранатах из гранулитов (рисунок 3а): с дифференцированным распределением от La к Sm и почти пологим наклоном графика в области от Gd до Lu (La_N/Lu_N лежит в интервале 0.01-0.05). Суммарное содержание REE для центральных зон находится в пределах от 3.1 до 4.5 ppm, что несколько ниже, чем в гранатах из гранулитов. Величина положительной Eu-аномалии выше, чем в гранатах из гранулитов. В центральной части гранатов из эклогитов содержание Ti, V, Cr и Y ниже, чем в гранатах из гранулитов: содержание Ti варьирует в пределах 555-675 ppm, V – 64-86 ppm, Cr – 88-113 ppm, Y – 1.2-1.5 ppm. В каймах гранатов из эклогитов относительно центральных зон понижается содержание Ti (до 212 ppm), V (до 31 ppm) и Cr (до 44 ppm) и повышается содержание Y (до 8.1 ppm).

3. При наложенном на гранулиты комплекса Берген Аркс высокобарическом метаморфизме происходит изменение редкоземельного состава краевых зон циркона с приобретением ими типичных эклогитовых геохимических характеристик (пониженное содержание REE с субгоризонтальным спектром в области HREE) при сохранности U-Pb и O изотопных систем.

Из гранулитов (обр. 1801) комплекса Берген Аркс было выделено около 45 зёрен циркона. В большинстве случаев зерна циркона имеют округлую форму, коэффициент удлинения не более 2 при размере в пределах 300-500 мкм. На CL-изображении наблюдается гетерогенность части зёрен циркона, выражающаяся в наличии центральных частей и краевых зон переменной мощности. Центральные части зёрен обладают мозаичной зональностью в серых тонах, характерной для гранулитового циркона (Каулина, 2010). Краевые зоны светлого цвета однородны, мощность их переменная (до 100 мкм), и в ряде случаев они «срезают» рисунок зональности центральных частей зёрен.

Датирование циркона проводилось локально, как в центральных, так и в краевых частях зёрен. Все 38 продатированных точек циркона образуют конкордантный кластер с конкордантным значением возраста 933 ± 7 Ma (MSWD = 0.93) (рисунок 3с).

Несмотря на сходство значений возраста, циркон из центральных и краевых частей зерен, контрастно отличается по распределению REE (рис. 3b). Для центральных частей зёрен характерны спектры с резко выраженной дифференциацией от легких к средним REE с обеднением спектра в области LREE и выполаживанием спектра в области HREE (Lu_N/La_N находится в интервале 1.14-3.57, $Lu_N/Gd_N = 0.90-2.04$). Содержание REE варьирует от 35.6 до 138 ppm. Наблюдается ярко выраженная положительная Ce-аномалия (Ce/Ce^* в интервале от 8.84 до 28.9) и слабо выраженная отрицательная Eu-аномалия ($Eu/Eu^* = 0.65-0.93$). Содержание Y для центральных частей зёрен составляет в среднем 114 ppm, U – 92.8 ppm, Th – 26.4 ppm. Th/U отношение составляет в среднем 0.28.

Краевые зоны зёрен характеризуются близкой формой спектров REE с обеднением в области LREE и выполаживанием в области HREE (Lu_N/La_N лежит в интервале 2.29-208, $Lu_N/Gd_N = 0.86-1.62$), однако содержание REE в них ниже: если в центральных частях зерен оно составляет в среднем 82.8 ppm, то в краевых зонах – в несколько раз меньше (18.3 ppm). Величина Ce-аномалии в краевых зонах понижается по сравнению с центральными частями (Ce/Ce^* составляет 17.5 и 13.0, соответственно). Отрицательная Eu-аномалия слабо проявлена ($Eu/Eu^* = 0.48-0.98$), в двух точках Eu-аномалия положительная ($Eu/Eu^* = 1.32-1.34$). Обе группы циркона характеризуются субгоризонтальным спектром распределения в области HREE. Пологая форма спектра в области HREE характерна для циркона гранатсодержащих эклогитовых и гранулитовых парагенезисов (Rubatto, 2002; Скублов и др., 2012).

Из редких элементов в краевых частях зерен наиболее значительно понижается содержание Y (от 114 до 21.4 ppm, соответственно). Содержание неформульных для циркона элементов – Ca, Sr, Ba, Ti, Nb варьирует слабо, что указывает на отсутствие привноса этих элементов флюидом при кристаллизации краевых частей зерен. Содержание Hf повышается от 12967 до 15050 ppm. Содержание Th и U уменьшается примерно в 1.5-2 раза при переходе от центральной к краевой части зерен циркона (17.4 и 44.9 ppm соответственно), Th/U отношение при этом незначительно увеличивается (до 0.39).

Указанные выше закономерности изменения состава, в первую очередь, характер поведения HREE, Y и Hf (Скублов и др., 2012), указывают на образование краевых зон циркона при эклогитизации гранулитов. Циркон оказывается достаточно устойчивым к воздействию эклогитового флюида, поскольку краевые зоны, испытавшие перекристаллизацию, вероятно, преимущественно в твердом состоянии (Hoskin, Black, 2000), распространены не повсеместно и в основном имеют незначительную ширину. При этом U-Pb система демонстрирует устойчивость к перекристаллизации минерала, возраст циркона сохраняется. Изотопная система кислорода

также не реагирует на перекристаллизацию циркона в процессе эклогитового метаморфизма. Среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ для обеих групп циркона совпадает в пределах погрешности определения – 5.84 и 5.80‰, соответственно (рисунок 3с). Причина такого несоответствия поведения изотопной системы кислорода и редкоземельного состава циркона, вероятно, заключается в том, что атомы кислорода более устойчиво «закреплены» в кристаллической структуре циркона, в отличие от несовместимых для циркона элементов (REE и ряда других редких элементов). Сохранность U-Pb возраста отражает относительную ненарушенность кристаллической структуры циркона, когда изменение абсолютного содержания U не отражается на изотопных U/Pb отношениях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой, в результате проведенного комплексного минералого-геохимического и изотопно-геохимического исследования пород проявлений эклогитов Беломорского подвижного пояса, Западного гнейсового региона и комплекса Берген Аркс, были установлены закономерности эволюции состава пород и минералов в процессах эклогитизации гранулитов и амфиболитизации эклогитов.

Проведенные исследование состава пород и расчеты баланса привноса-выноса вещества в ходе метаморфизма доказали мобильность ряда редких элементов в метаморфических процессах, связанных с образованием эклогитов и их дальнейшими преобразованиями. Показано, что преобразование эклогитов в амфиболиты Западного гнейсового региона происходит с привносом Rb и выносом LREE, а процессы амфиболитизации эклогитов Керетского архипелага, эклогитизации гранулитов комплекса Берген Аркс относительно редких элементов в основном субзихимичны. Наблюдаемые различия можно объяснить вариациями флюидного режима при метаморфизме (что требует дальнейшего исследования).

Выявлены общие закономерности распределения REE при амфиболитизации эклогитов для минералов из пород ЗГР и БПП. К ним относятся: характер зональности гранатов по REE; проявление эффекта наследования при замещении пироксенов

амфиболами; перераспределение Ti из гранатов в рудный акцессорный минерал (вероятно, ильменит, рутил и магнетит). При этом, при дальнейшем процессе наложения регрессивного метаморфизма на эклогиты для ЗГР амфиболы обедняются REE, причем в большей степени – LREE, а для БПП амфиболы обогащаются HREE.

В ходе перехода гранулитов в эклогиты для пород комплекса Берген Аркс происходит перекристаллизация кайм гранулитового граната с изменением его геохимических характеристик, типичных для эклогитового граната. Построена схема перераспределения редких и редкоземельных элементов (рис. 3d), на которой показано, что в процессе эклогитизации гранулитов HREE перераспределяются из циркона в каймы гранатов, а Ti, V и Cr из кайм гранатов в рудные акцессорные фазы – ильменит, рутил и магнетит. При эклогитизации гранулитов и дальнейшей амфиболизации эклогитов происходит перераспределение LREE из кайм гранатов в клинопироксены и далее в клинопироксен-плаггиоклазовые симплектиты.

В ходе перекристаллизации циркона из гранулитов БАК в условиях эклогитовой фации происходит изменение редкоземельного состава циркона при сохранении U-Pb и $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ изотопных систем.

В качестве перспективы продолжения исследования мобильности редких элементов на минеральном уровне при процессах регионального метаморфизма запланировано расширение набора изучаемых акцессорных минералов, а также привлечения данных по другим изотопным системам (Rb-Sr, Sm-Nd, Lu-Hf).

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

1. Березин, А.В. Эволюция состава минералов при эклогитовом метаморфизме в Беломорском подвижном поясе (на примере о-ва Виченная Луда) / А.В. Березин, **Л.И. Салимгараева**, С.Г. Скублов // Петрология. – 2020. – Т. 28. – №. 1. – С. 85-107.

2. Skublov, S.G. Zircons from a pegmatite cutting eclogite (Gridino, Belomorian Mobile Belt): U-Pb-O and trace element constraints on eclogite metamorphism and fluid activity / S.G. Skublov, A.V. Berezin, X.H. Li, Q.L. Li, **L.I. Salimgaraeva**, V.V. Travin, D.I. Rezvukhin // Geosciences. – 2020. – 10 (5). – 197.

Прочие публикации:

1. **Салимгараева, Л.И.** Фальбанды Керетского архипелага Белого моря: характеристика состава пород и минералов, рудная минерализация / **Л.И. Салимгараева**, С.Г. Скублов, А.В. Березин, О.Л. Галанкина // Записки Горного института. – 2020. – Т. 245. – С. 513-521.

2. **Salimgaraeva, L.I.** Chemical composition features of garnets from the Bergen Arcs eclogites (Southern Norway) / **L.I. Salimgaraeva**, A.V. Berezin, S.G. Skublov // Minerals: Structure, Properties, Methods of Investigation. – 2020. – P. 205-213.

3. Скублов, С.Г. Комментарии к статье М.В. Минца и К.А. Докукиной "Субдукционные эклогиты Беломорской эклогитовой провинции (восток Фенноскандинавского щита, Россия): мезоархей, неоархей или поздний палеопротерозой?" / С.Г. Скублов, А.В. Березин, **Л.И. Салимгараева** // Геодинамика и тектонофизика. – 2021. – Т. 12. – № 3. – С. 652-661.

4. Skublov, S.G. Comment on Volodichev et al. Archean zircons with omphacite inclusions from eclogites of the Belomorian Province, Fennoscandian Shield: the first finding. Minerals 2021, 11, 1029 / S.G. Skublov, A.V. Berezin, **L.I. Salimgaraeva** // Minerals. – 2022. – 12 (2). – 141.

5. Скублов, С.Г. Эклогиты Беломорского подвижного пояса: геолого-петрологические и изотопно-геохимические критерии возраста. / С.Г. Скублов, А.В. Березин, **Л.И. Салимгараева** // Геохимия. – 2022. – Т. 67. – №. 7. – С. 621-638.

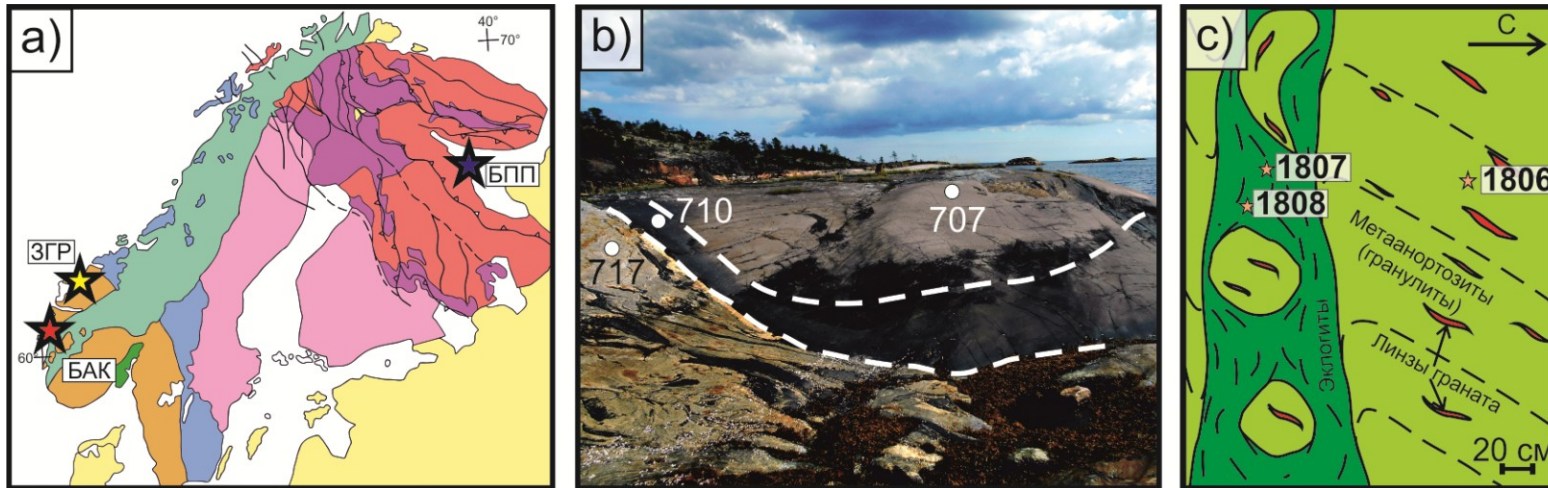


Рисунок 1 – а) Положение объектов исследования в пределах Фенноскандинавского щита и его складчатого обрамления по (Vergh et al., 2014); б) Фото будины на острове Виченная Луда; в) Схема обнажения на западном склоне горы Эльдсфеллет в пределах комплекса БАК

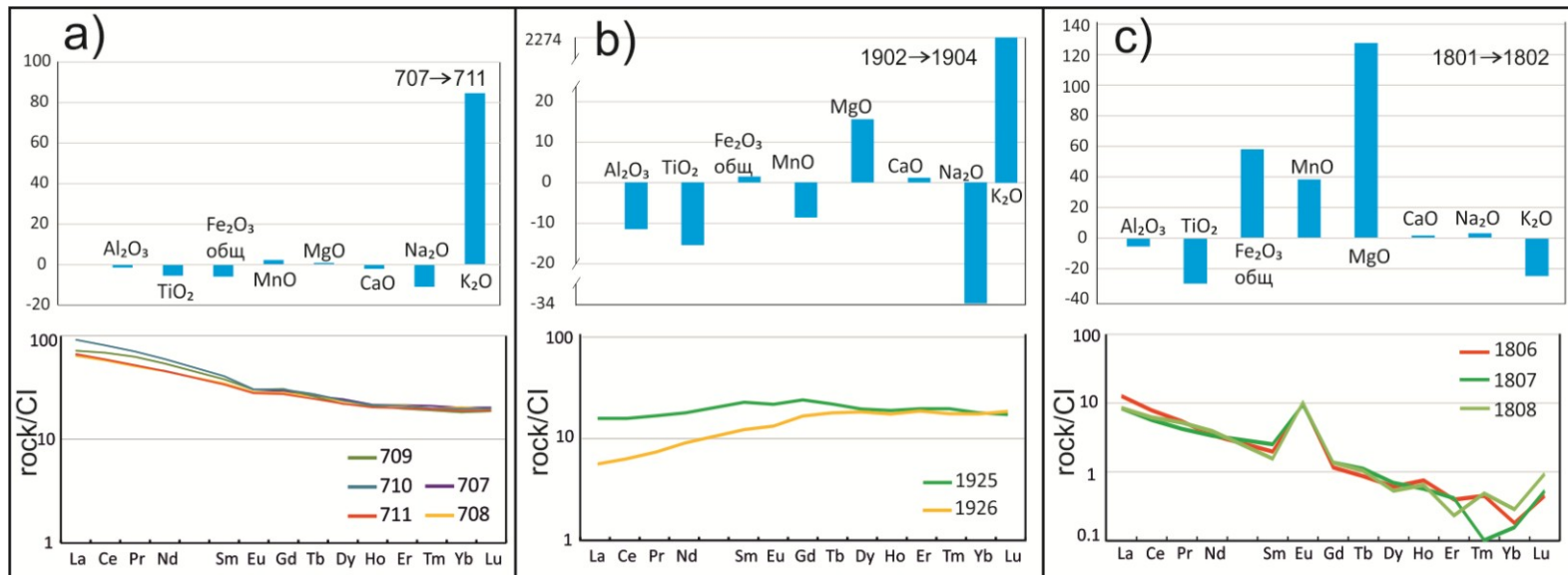


Рисунок 2 – Результаты расчета баланса вещества методом инертного компонента и спектры распределения REE для пород: а) БП; б) ЗГР; в) БАК

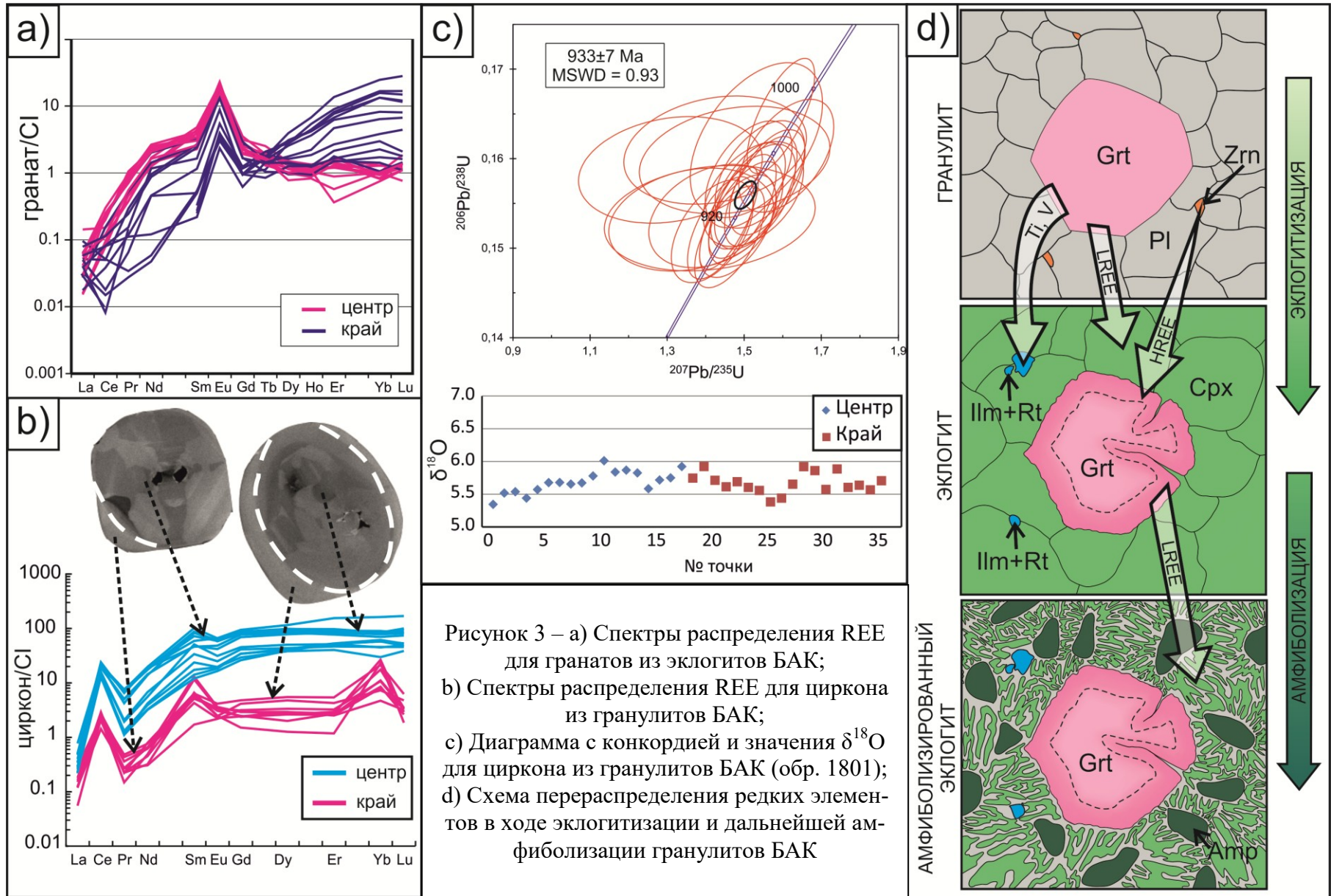


Рисунок 3 – а) Спектры распределения REE для гранатов из эклогитов БАК; б) Спектры распределения REE для циркона из гранулитов БАК; в) Диаграмма с конкордией и значения $\delta^{18}\text{O}$ для циркона из гранулитов БАК (обр. 1801); д) Схема перераспределения редких элементов в ходе эклогитизации и дальнейшей амфиболитизации гранулитов БАК