

**Утверждаю**  
Директор ФГБУН Институт экспериментальной  
минералогии им. академика Д.С. Коржинского РАН,  
доктор геолого-минералогических наук, профессор РАН,  
Сафонов Олег Геннадьевич

« 5 » сентября 2022 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации **Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института экспериментальной минералогии им. академика Д.С. Коржинского Российской академии наук на диссертацию САЛИМГАРАЕВОЙ Ляйсан Ильшатовны «ГЕОХИМИЯ РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ВЫСОКОБАРИЧЕСКОМ МЕТАМОРФИЗМЕ (НА ПРИМЕРЕ ЭКЛОГИТОВ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО БЕЛОМОРЬЯ И ЮГО-ЗАПАДНОЙ НОРВЕГИИ)», представленную на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.09 – Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых**

Актуальность работы Л.И. Салимгараевой определяется недостаточной изученностью подвижности редких и рассеянных элементов в ходе регионального метаморфизма, в частности, метаморфизма в условиях эклогитовой фации. Эти элементы часто более чувствительны и информативны, чем главные породообразующие элементы, к изменениям P-T и флюидных условий, и информация об их поведении является важным, а в некоторых случаях решающим, дополнением для расшифровки физико-химических условий метаморфизма.

Основу диссертации составляют результаты исследований образцов, собранных Л.И. Салимгараевой в ходе полевых работ в 2018 - 2019 гг, а также образцов, предоставленных сотрудниками ИГГД РАН. Интерпретация полученных минералогических и геохимических данных позволила автору оценить степень изменения первичного химического состава пород и их минералов при прогрессивном преобразовании гранулитов в эклогиты и регрессивном преобразовании эклогитов в амфиболиты как в отношении главных, так и редких элементов, определить закономерности перераспределения редких и редкоземельных элементов между сосуществующими минералами в этих процессах. Автором были получены также новые данные локального датирования циркона из главных разновидностей пород комплекса Берген Аркс и пегматитов Гридино U-Pb методом, которое было сопоставлено с данными по изотопному составу кислорода и распределения редких и редкоземельных элементов в цирконе, что дало возможность для оценки устойчивости U-Pb и кислородных изотопных систем при метаморфизме высоких давлений.

Среди результатов диссертационной работы, по нашему мнению, следующие выводы составляют ее **новизну**.

1. Для трех крупных районов проявления эклогитов установлены закономерности в изменении состава пород и породообразующих минералов (граната, пироксенов, амфиболов) в отношении редких и редкоземельных элементов в ходе прогрессивного (эклогитизация гранулитов) и регрессивного (амфиболитизация эклогитов) метаморфизма.

ОТЗЫВ

ВХ. № 9-6/9 от 19.09.22  
АУ УС

2. Проведена сравнительная оценка устойчивости U-Pb и кислородных изотопных систем при метаморфизме эклогитовой фации.

3. Получены новые геохронологические данные для гранулитов комплекса Берген Аркс и подтвержден возраст внедрения пегматитов на острове Столбиха, район Гридино, являющихся важным маркером для выявления возраста эклогитового метаморфизма в Беломорской провинции.

**Практическая значимость работы.** В целом результаты работы развивают методы и подходы научного направления – петрохронологии (которое, кстати, не такое уж и новое, как утверждает автор), связывающего возраст и продолжительность геологических процессов с физико-химическими условиями их протекания. Фундаментальные вопросы геохимии метаморфических пород, решенные в диссертации, могут быть использованы для картирования метаморфических комплексов, в частности Фенноскандинавского щита. Данные, приведенные в диссертации, могут использоваться в учебных курсах метаморфической петрологии и геохимии.

Диссертация объемом 151 страница состоит из Введения, шести глав с выводами по каждой из них, Заключения. Диссертация содержит 62 рисунка и 19 таблиц, а список литературы включает 246 наименований. Диссертация сопровождается приложениями в виде таблиц химических составов пород и минералов.

Во Введении приведены общие сведения об актуальности, новизне и практической значимости работы, объектах, задачах и целях исследования, фактическом материале, личном вкладе автора в работу и о публикациях автора по теме диссертации. По нашему мнению, помимо общей актуальности работы, во Введении необходимо было бы отразить актуальность проведенных исследований в отношении выбранных объектов в пределах Фенноскандинавского щита и его обрамления. Во Введении автор также формулирует 3 защищаемых положения, которые отражают главные выводы работы. Однако, на наш взгляд, в них недостаточно логических взаимосвязей, они отражают лишь полученные факты, но не решение научных задач, требующих защиты. Первые два защищаемых положения следовало бы построить в соответствии с процессами: сначала охарактеризовать перераспределение элементов в процессе прогрессивного метаморфизма (эклогитизации), а затем – регрессивного (амфиболизации эклогитов). Во втором защищаемом положении новым является лишь факт, что амфиболы унаследовывают характер спектров REE в пироксенах, поскольку тезис, что «редкие и редкоземельные элементы активно перераспределяются между сосуществующими минералами» очевиден и не требует защиты. Из формулировки третьего защищаемого положения не понятно, на что делается акцент: на то, что циркон приобретает «типично эклогитовые характеристики» (кстати, довольно жаргонный термин, неприемлемый в защищаемых положениях) или на то, что изотопные характеристики циркона сохраняются, несмотря на изменение состава. Почему третье защищаемое положение включает лишь результаты исследований циркона из пород Берген Аркс, но не включает результаты исследований циркона из пегматитов района Гридино, представленные в диссертации?

В Главе 1 приведен обзор состояния геохимических исследований пород, метаморфизм которых связан с процессами субдукции. Эта глава, призванная представить краткий, но исчерпывающий обзор, написана очень скупо (чуть более 2 страниц). Например, в разделе 1.2 автор указывает на две точки зрения на подвижность редких элементов в ходе метаморфизма в зонах субдукции. Однако остается не ясно, являются ли эти точки зрения конфликтующими. Следовало бы не просто привести ссылки на опубликованные работы, но более обширно рассмотреть примеры исследований, доказывающих различные выводы.

В Главе 2 представлена информация о геологическом строении районов и объектов исследования в пределах Фенноскандинавского щита и его обрамления, информация о местах отбора образцов, характеристика основных геологических событий и особенностей изученных участков. Существенных замечаний к этой главе нет. Лишь отметим, что в главе присутствуют путаница с рисунками и неточности в ссылках на литературные источники. Например, статьи Щипанского и др. (2012а, б) описывают эклогиты не Салмы, а Куру-Ваары. К сожалению, в главе не упоминаются работы А.Л. Перчука и А.А. Моргуновой (Сердюк) (напр. Perchuk, Morgunova, 2014, *Gondwana Res.*, 25, 614-629) по изучению эклогитов и метаультрабазитов района Гридино. Отметим также, что несмотря на множество геологических схем и фотографий обнажений на них обозначены не все места отбора образцов. Например, для БПП показана лишь одна точка отбора образца из пегматитовой жилы района Гридино (рис. 2.8).

К Главе 3, в которой автор описывает примененные методы аналитических исследований, проведенных в ИГГД РАН, ВСЕГЕИ, ИГМ СО РАН, Ярославском филиале ФТИАН РАН и Китайском Институте Геологии и Геофизики, также нет принципиальных замечаний. Хотя из главы не понятно, с какими из аналитических методов автор работала лично, дальнейшее описание и анализ полученных результатов в диссертации не вызывает сомнения в высокой квалификации соискателя.

В Главе 4 приведены петрографические, минералогические и петрохимические характеристики типичных разновидностей изученных пород. Однотипные схемы описания образцов по каждому району, хотя и довольно скупы, но все же позволяют сравнить и выявить особенности процесса минералообразования в каждом конкретном комплексе. К этой главе у нас возникли замечания по представлению материалов. Не во всех частях этой главы присутствуют ссылки на иллюстрации (см. стр. 40 и 46). Приведены лишь общие фотографии шлифов без иллюстраций взаимоотношений минералов. Да и то приведены фотографии не всех реперных пород. Например, в описании пород с острова Виченная Луда приводятся описания эклогита, гранатового амфиболита и амфиболита (каждая из которых важна для характеристики процесса преобразования эклогитов), но фотографии шлифов приводятся лишь для эклогита и амфиболита (рис. 4.2). К сожалению, в этой главе нет BSE фотографий, на которых лучше видны взаимоотношения минералов. Например, они были бы полезны для отображения взаимоотношений минералов в породах ЗГР, поскольку на оптических фотографиях рис. 4.4 взаимоотношения минералов трудно различимы. В описании «гранатита» (стр. 42) указывается, что «матрикс сложен пироксен-плагиоклазовыми и амфибол-плагиоклазовыми симплектитами», которые не видны на рис. 4.4 (на рисунках нет указателей Pl и/или Amp), а из приведенных фотографий создается впечатление, что эклогит (рис. 4.4а) отличается от гранатита (рис. 4.4с) лишь большим содержанием граната.

В подразделе 4.2.1, обсуждающем преобразования пород БПП, присутствует несоответствие с материалами из предыдущего раздела 4.1. Указано, что для петрохимического исследования выбраны пробы «эклогитов, эклогитоподобных пород (метагаббро), гранатитов и амфиболитов из каймы амфиболизации», но в разделе 4.1 ни эклогитоподобные породы (метагаббро), ни гранатиты вообще не рассматриваются. В главе присутствует путаница в терминах «гранатит» и «гранатовый амфиболит», поскольку автор, видимо, подразумевает под этими терминами одни и те же породы. В подразделе 4.2.1 указываются породы с островов Большая Илейка, Сидоров, Кемьлуды, Красная Губа, описание которых отсутствует в разделе 4.1. И, наоборот, в этом разделе нет геохимических характеристик пород с острова Виченная Луда, описанных в 4.1. Где на рис. 4.8 и 4.9 точки пород, описанных в разделе 4.1? На рис. 4.11, представляющем спектры редких элементов для пород, совершенно не ясно к каким объектам они относятся, поскольку не указаны не места отбора, ни типы пород, а только номера

образцов. В подписи к этому рисунку сообщается, что представлена спектры из «будин БПП» (правильнее, пород будин из БПП), подразумевая, что там должны присутствовать анализы для пород из разных островов. Однако номера образцов 707, 709, 711, по-видимому, относятся лишь к породам с острова Виченная Луда, но почему-то это не упоминается в тексте (стр. 50) (и кстати нет в таблице А.1 в Приложении), и при этом там упоминаются «породы из будин островов Кемьлудский, Красная Губа и Большая Илейка», которые отсутствуют на рис. 4.11. На рис. 4.16 не ясно, приведены ли на нем обобщенные (усредненные) спектры для обоих типов пород или представительные для конкретных образцов.

В Главе 5 рассматриваются характеристики состава граната, пироксенов и амфиболов в изученных породах по главным и редким элементам, показаны закономерности перераспределения элементов между сосуществующими минералами при полиметаморфизме. Опять же к этой главе у нас возникли следующие замечания по представлению материалов. В тексте указывается на контрастные отличия в составе центральных и краевых частей зерен минералов. Однако этот вывод в тексте нельзя проследить на рисунках. Так, на рис. 5.2, 5.3, 5.4 показаны номера точек, но не указано, какие из них относятся к центрам и краям зерен.

Глава 6 посвящена изотопным характеристикам (U-Pb, Sm-Nd, кислород) минералов из гранулитов Берген Аркс (как выясняется на стр. 95, лишь из одного образца) и из пегматитовой жилы, секущей эклогиты в районе Гридино (БПП). Если выбор пород Берген Аркс логичен, так как они рассмотрены в предыдущих главах, то выбор пегматитовой жилы из района Гридино не объяснен в тексте. Почему не выбраны в качестве объектов исследования цирконы из охарактеризованных в предыдущих главах эклогитов и амфиболитов с островов Керетского архипелага?

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

Помимо вопросов, приведенных выше к каждой главе, у нас возникли следующие общие замечания, касающиеся научных выводов в диссертации.

1. В работе не всегда обоснованы выводы о P-T условиях формирования минеральных ассоциаций изученных пород. В работа полностью отсутствуют какие-либо попытки численно оценить P-T условия. На наш взгляд, это очень серьезное упущение работы по метаморфизму, несмотря на то, что в организация, с которой активно сотрудничал диссертант (ИГГД РАН) – это ведущий центр исследований термодинамического и флюидного режима метаморфизма. Оценки характера P-T эволюции в работе делаются лишь на качественной (и, по нашему мнению, вольной) интерпретации зональности в гранате, без учета характера вариации составов сосуществующих минералов. Например, для эклогитов БПП (стр. 61) на основе роста содержания пироповой составляющей делается вывод о проградной стадии эволюции. Однако это не согласуется со снижением содержания гроссуляра, которое обычно знаменует снижение давления. При этом на стр. 79 для эклогитов Берген Аркс, снижение рост содержания гроссуляровой составляющей совместно с увеличением альмандиновой составляющей интерпретируется как «...понижение температуры метаморфизма и повышение давления», хотя подобное поведение состава граната возможно при субизобарическом остывании. На стр. 61 делается вывод о том, что «обогащенные пироповым компонентом краевые части зерен граната (в эклогитах) отвечают пику температурных условий». Означает ли это, что ретроградная эволюция пород вообще не записана в зональности граната? В отличие от вышеприведенных примеров, снижение содержания пироповой составляющей в центральных зонах зерен граната в «гранатитах» ЗГР автором интерпретируется (стр. 68) наоборот как следствие проградной стадии, а его увеличение в краях – как следствие ретроградной стадии. Где же логика?

Согласно утверждению автора (стр. 63) вывод о проградной зональности в гранате из эклогитов БПП не соответствует распределению редких элементов (РЗЭ, Y), которое следовало бы ожидать при повышении температуры. Снижение содержания Ti («более чем в пять раз», стр. 63) также может указывать на снижение температуры (об этом автор упоминает в разделе про Берген Аркс, стр. 85, ссылаясь на работу Kawasaki, Motoyoshi, 2007). Почему же в одних случаях снижение содержания Ti сопровождается «проградную зональность» (стр. 63), а в других «...может указывать на понижение температуры метаморфизма» (стр. 85).

При описании зональности граната, автор не обращает внимание на интересные ее особенности. Например, при описании эклогитов Берген Аркс (стр. 79) автор упускает замечательные структуры – стрингеры и сопровождающие их каймы, хорошо проявленные на элементных картах рис. 5.9а. Эти структуры возникают при растрескивании зерен граната и залечивании трещин другой генерацией при декомпрессии пород (напр. Perchuk, Philippot, 2000).

Необоснованные выводы об условиях образования автор допускает также в отношении не только граната. Так объясняя наличие одного анализа пироксена, обедненного РЗЭ с положительной Eu-аномалией (анализ 707-24, рис. 5.3, стр. 64) в одном из образцов из БПП, автор приходит к выводу о «реликтовом» характере этого пироксена, «сохранившемся от пика эклогитового метаморфизма». Но почему этот пироксен обеднен жадеитовой составляющей, кристаллизуясь в отсутствие плагиоклаза?

2. Процессы перераспределения элементов в процессах эклогитизации и амфиболитизации автор объясняет участием флюидов. Квинтэссенцией этого вывода является фраза на стр. 58: «Наблюдаемые различия возможно объяснить вариациями флюидного режима (состав, степень его воздействия) при метаморфизме (что требует дальнейшего исследования)». Этот принципиальный вывод не подкреплен исследованиями флюидно-минеральных равновесий, пусть даже на уровне описания реакционных структур в породах или содержаний летучих в минералах. Чем доказывается наличие «внешнего флюида из вмещающих гнейсов», обусловившего, по мнению автора, миграцию  $K_2O$  при образовании амфиболитов по эклогитам в БПП (стр. 49). Был ли этот флюид внешним и для вмещающих гнейсов и для будин эклогитов, или же он генерировался в пределах толщи гнейсов за счет локальной дегидратации? Из-за отсутствия каких-либо оценок флюидного режима в диссертации возникает путаница в интерпретации геохимических данных. Примером может служить связь между процессами образования гранатовых амфиболитов и амфиболитов по эклогитам БПП. По мнению автора, образование гранатовых амфиболитов сопровождалось привносом и выносом компонентов, но для него не делается вывод об участии флюида. И наоборот, для процесса образования амфиболитов делается заключение об участии флюида, но при этом пропагандируется «ограниченная мобильность компонентов» (стр. 51). Были ли два процесса разорваны по времени и по P-T параметрам?

3. В работе отсутствует объяснение некоторых аспектов методики оценки привноса и выноса компонентов. Почему именно  $SiO_2$  был выбран как инертный компонент для этих оценок? В условиях метаморфизма повышенных давлений,  $SiO_2$  хорошо растворим во флюидах (напр. Manning, Frezzotti, 2020), а значит хорошо переносится. В подразделе 4.2.2 не дано разъяснение, как производилась «оценка погрешности, обусловленной зернистостью пород на оценку мобильности компонентов», представленная на рис. 4.14?

4. При обсуждении моделирования привноса и выноса компонентов автор выборочно описывает результаты. Так на стр. 53 обсуждается, что «в ходе амфиболитизации эклогитов происходит привнос  $MgO$  и  $K_2O$  и вынос  $Na_2O$ », но почему-то не рассматривается вынос  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ , масштаб выноса которых не многим меньше, чем привноса  $MgO$  (рис. 4.15). Для пород

Берген Аркс указан лишь привнос  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$  (стр. 54), но не упоминается вынос  $\text{TiO}_2$  и  $\text{K}_2\text{O}$ , хорошо различимый на рис. 4.19.

Замечания по построению и представлению материала в диссертации следующие.

1. В диссертации, написанной на русском языке, неоправданно выглядят иллюстрации с надписями на английском языке (напр. рис. 5.6 - 5.12).
2. Работа изобилует формулировками, требующими значительной корректировки. Например, «существенная реакция дегидратации», «водные флюиды подвержены высвобождению», «водорастворимые элементы» (водорастворимыми могут быть вещества, соединения), «высокая способность растворять...нерастворимые элементы» (стр. 8), «пегматоидные контакты с вмещающими гнейсами» (стр. 14), «межбудинное пространство» (стр. 16), «...объёмная деформация, частично вытекающая...» (стр. 22), «...возрастной градиент примерно параллелен градиенту давления...» (стр. 24), «по составу главных элементов», «вариации содержания миналов колеблются...» (стр. 68), «профили минальных составов практически пологие» (стр. 73).
3. Отметим также наличие в диссертации терминов, далеких от петрографии и петрологии. Примером может служить термин «директивная структура» на стр. 42 и 46. Такого термина в петрографии метаморфических пород нет, а для описания структур используются термины нематогранобластовая (с преобладанием вытянутых кристаллов), лепидогранобластовая (с преобладанием слоистых минералов) и другие. Неприемлем также термин «гранатизация эклогитов», используемый автором для описания процесса образования гранатовых амфиболитов по эклогитам (стр. 50).
4. В тексте раздела 4.2., где рассмотрены петрохимические характеристики пород, на основе, по-видимому, валовых составов пород из таблиц 2 - 4 в приложении Б, нет ссылок на эти таблицы. В таблицах составов минералов в Главе 5 нет пересчетов на формульные количества, а также отсутствует таблица составов пироксенов.
5. Номера образцов из БПП в приложении А не соответствуют номерам образцов в приложении Б. Образцы, указанные в приложении А, вообще не рассматриваются в работе.

Тем не менее, перечисленные замечания не снижают уровень представленной работы и не являются препятствием к защите ее на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. Работа актуальна, выводы и результаты достаточно обоснованы, собранный материал и новые данные, полученные в результате исследований являются перспективными для дальнейшего развития.

Результаты работы соискателя опубликованы в семи статьях в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, что является достаточным для защиты диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. Текст автореферата полностью отражает содержание всей диссертационной работы, написан кратко, но емко. Диссертация «ГЕОХИМИЯ РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ВЫСОКОБАРИЧЕСКОМ МЕТАМОРФИЗМЕ (НА ПРИМЕРЕ ЭКЛОГИТОВ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО БЕЛОМОРЬЯ И ЮГО-ЗАПАДНОЙ НОРВЕГИИ)», представленная на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.09 – Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых полностью отвечает требованиям раздела 2 «Положения о присуждении ученых степеней» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», предъявляемым к научно-квалификационным работам, и утвержденного приказом ректора Горного университета от 20.05.2021 № 953 адм, а ее автор, **Салимгараева Ляйсан Ильшатовна**, заслуживает присуждения ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.09 – Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых.

Отзыв на диссертацию и автореферат диссертации Л.И. Салимгараевой «ГЕОХИМИЯ РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ВЫСОКОБАРИЧЕСКОМ МЕТАМОРФИЗМЕ (НА ПРИМЕРЕ ЭКЛОГИТОВ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО БЕЛОМОРЬЯ И ЮГО-ЗАПАДНОЙ НОРВЕГИИ)» заслушан и утвержден в качестве официального на заседании Ученого Совета ФГБУН Институт экспериментальной минералогии имени академика Д.С. Коржинского Российской академии наук (ИЭМ РАН) № 3 от 05 сентября 2022 г.

Ученый секретарь ИЭМ РАН,  
кандидат геолого-минералогических наук



Т.Н. Ковальская

Подпись Ковальской Т.Н. заверяю.

*Зав. кафедрой минералогии ИЭМ РАН  
и т.п. (г. И. Сердюков)*

Составители отзыва:

Доктор геолого-минералогических наук,  
ведущий научный сотрудник Лаборатории  
метаморфизма, магматизма и геодинамики литосферы ИЭМ РАН,

Ходоревская Лилия Ивановна



Л.И. Ходоревская

Кандидат геолого-минералогических наук,  
ведущий научный сотрудник Лаборатории  
метаморфизма, магматизма и геодинамики литосферы ИЭМ РАН,

Федькин Валентин Васильевич



В.В. Федькин

Кандидат геолого-минералогических наук,  
научный сотрудник Лаборатории  
метаморфизма, магматизма и геодинамики литосферы ИЭМ РАН,

Сердюк Алена Александровна



А.А. Сердюк

Подписи авторов отзыва, Ходоревской Л.И., Федькина В.В., Сердюк А.А., заверяю.

*Зав. кафедрой минералогии ИЭМ РАН  
и т.п. (г. И. Сердюков)*

**Сведения о ведущей организации:**

Федеральное государственной бюджетное учреждение науки Институт экспериментальной минералогии им. академика Д.С. Коржинского РАН

Почтовый адрес: 142432 г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 4.

тел. 8(496)5244425

e-mail: [iem\\_direct@iem.ac.ru](mailto:iem_direct@iem.ac.ru)

официальный сайт <http://www.iem.ac.ru>