

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Максимова Олега Александровича
на тему: «Метаморфическая эволюция Гридинского эклогитсодержащего комплекса
(Фенноскандинавский щит)»,
представленную на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук
по специальности 1.6.3 – «Петрология, вулканология»

Диссертационная работа Максимова Олега Александровича посвящена петрологической и геохронологической характеристике Гридинского эклогитсодержащего комплекса Беломорской провинции Фенноскандинавского щита и направлена на решение вопроса этапности тектонометаморфической эволюции комплекса, в особенности доказательства существования раннего (архейского) этапа высокobarического метаморфизма в пределах комплекса. Для решения данной проблемы диссертантом выполнены детальные минералого-петрографические исследования эклогитов *sensu stricto* и иных пространственно ассоциирующих с ними и предположительно изофациальных (гранатовых пироксенитов, метаэндербитов, цоизититов), выявлены индикаторы и установлены условия высокоградного метаморфизма и последовательного ретроградного преобразования, которые достаточно подробно увязаны во времени посредством U-Pb геохронологии циркона (SHRIMP, LA-ICP-MS). Диссертация О.А. Максимова общим объемом 179 страниц состоит из введения, 7 глав, заключения, списка литературы, содержит 57 рисунков и 3 приложения. Список литературы содержит 208 источников.

Актуальность диссертационной работы и защищаемые положения

Актуальность диссертационного исследования обусловлена особым интересом к крайне редким раннедокембрийским комплексам, содержащим прямые свидетельства высокobarического метаморфизма. Диссертантом справедливо отмечено, подобные комплексы распространены крайне ограниченно и таким образом являются важным источником информации о состоянии и эволюции раннедокембрийской литосферы в обстановках палеоконвергенции. Подобный интерес к раннедокембрийским высокobarическим комплексам (а не только Гридинскому ЭК) во многом обусловлен многолетней дискуссией о времени начала действия тектоники литосферных плит, о чем диссертантом указано во введении (но почему-то не в обосновании актуальности). Цель и задачи исследования сформулированы достаточно конкретно. В качестве главного результата позиционируется геологическое, минералогическое и изотопно-геохронологическое обоснование двухэтапного высокobarического метаморфизма. Этот же результат и является основой для трех защищаемых положений.

По самим защищаемым положениям есть вопросы и замечания.

1. Первое положение нуждается в конкретизации. Что подразумевается диссертантом под «локальным неравновесным характером» палеопротерозойской эклогитизации? Формирование индикаторных гранат- и омфацитсодержащих высокobarических парагенезисов даже в краевых частях тел подразумевает локальное, но равновесие, которое и является основой для расчета P-T условий метаморфизма. Какие геологические тела имеются в виду и есть ли какая-либо явная пространственная приуроченность зон эклогитизации в контактах метабазитов к конкретному типу вмещающего субстрата (метаосадки, другие метабазиты, метагранитоиды или иное)? Каким условиям соответствуют ранние минеральные парагенезисы, сохранные в виде реликтов?

2. Во втором положении нет указания на условия метаморфизма ранних эклогитов и гранатовых пироксенитов, что существенно для доказательства высокobarической природы метаморфизма. Приводятся условия только для эндербитов, секущих эклогиты, но и они рассматриваются диссертантом как ретроградные.

Введение

Во введении к диссертации автором индикаторная роль высокобарических комплексов для процессов эволюции Земли в общем и для обоснования конвергентных взаимодействий плит в современном стиле - частности. Диссертантом справедливо отмечена преимущественная распространенность подобных комплексов в фанерозойских орогенах и их редкость – среди раннедокембрийских структур, в связи с чем обоснование архейского и палеопротерозойского эпизодов высокобарического метаморфизма в тектонометаморфической эволюции ГЭК является безусловно актуальной задачей. На мой взгляд, стоило посвятить эту часть работы более подробному анализу существующих данных о раннедокембрийских высокобарических комплексах и особенностях тектонических обстановок их формирования. Помимо указанного единственного примера палеопротерозойских метаморфических поясов, например, есть работы по Канадскому щиту (Baldwin et al., 2005, JMG) и серия работ по Северо-Китайскому кратону (Ning et al., 2022, PNAS; Wu et al., 2022, EPSL и др.). Кроме того, как отмечает сам автор, есть масса иных, в т.ч. геолого-геохимических индикаторов раннего становления современного стиля субдукции, но вопрос этот далее никак не раскрывается.

В **Главе 1** рассматриваются особенности геологического строения Беломорской провинции и ее позиция в пределах Фенноскандинавского щита, а также основные черты метаморфизма геологических комплексов. Отмечается, что в отличие от Мурманской, Карельской провинций и провинции Норрботтен, становление которых завершилось к концу архея, история формирования и тектонометаморфической переработки пород Беломорской провинции является полициклической. По литературным данным для архейского этапа приведены три субдукционно-аккреционных цикла, два из которых маркируются эклогитами (2.88–2.82 млрд лет – Салма и Куру-Ваара, 2.75–2.72 млрд лет – Гридино). Поскольку архейский этап и представляет здесь наибольший интерес, стоило привести здесь конкретные литературные источники, объекты и методы изотопного датирования (для эклогитов и надсубдукционных офиолитов). Этих же деталей недостает и в последующем описании конкретных районов, где обнаружены эклогиты – доводы исследовательских групп с противоположными воззрениями на этапность высокобарического метаморфизма необходимо было сопроводить конкретной геохронологической или иной фактурой, на которую их взгляды опираются. В главе не хватает детальной геологической карты или схемы с положением всех указанных эклогитсодержащих комплексов (карта на рис. 2а имеет слишком крупный масштаб, положение комплексов относительно региональных структур прослеживается плохо, аббревиатуры СЭК и ГЭК не расшифрованы).

Глава 2 рассматривает положение и геологическое строение Гридинского эклогитсодержащего комплекса – основного объекта диссертационного исследования. Приведено описание и представительные фотографии взаимоотношений основных типов пород (TTG гнейсы, амфиболиты и амфиболизированные эклогиты, пироксениты, мезэндербиты и секущие их поздние габбронориты и гранодиориты), структуры деформаций, обсуждаются возможные процессы частичного плавления, связанные с постэклогитовым метаморфизмом. Глава, на мой взгляд, неудачно структурирована, в ней чередуются абсолютно разноплановые разделы о строении, истории изучения, где информация преимущественно того же толка (о геологическом строении и особенностях метаморфизма пород), об отдельных типах пород (к примеру, пироксенитах и цоизититах), после чего основная часть главы построена исключительно на географии распространения выходов высокобарических пород (о. Столбиха, уч. Самылино, о. Прянишная Луда, о. Цоизититовый). Местами непоследовательно выглядит и изложение материала в пределах разделов, многократно и без надобности приводятся одни и те же общие фразы о повышенном интересе к возрасту высокобарического метаморфизма БЭП и ГЭК, о

преобладающих в будинах метабазитах и т.п.; вновь не приводятся данные о методах изотопного датирования, которыми получены противоречивые друг другу возрасты метаморфизма в пределах ГЭК (с. 26-27). Петрологическая информация здесь же также приводится избирательно: к примеру, приведены Р-Т условия, восстановленные для эклогитов Володичевым с соавторами (2004, 2013), однако не приводятся для работ зарубежных коллег («близкие условия»).

Глава 3 посвящена петро- и геохимической характеристике пород ГЭК с целью восстановления первичного состава их протолита. В главе приводится довольно ограниченная информация о содержании главных оксидов (только на базе TAS- и AFM-диаграмм), которые оцениваются качественно, нежели количественно («относительно высокое», «относительно низкое») и редких элементов (только нормированные графики) и еще более ограниченное обсуждение возможной подвижности отдельных компонентов. Если диссертант полагает, что подвижность кремнезема и щелочных металлов могла быть существенной и объясняет вариации состава метаморфитов, стоило уделить этому больше внимания и обосновать факт подвижности и привноса/выноса с использованием реперных составов неметаморфизованных пород, рассмотрением пород вдали от контактов с TTG-гнейсами, использованием диаграмм с нормированием на содержание относительно инертных компонентов или иных инструментов. Дополнительного же рассмотрения и доказательства требует гипотеза о роли дифференциации расплава в формировании первичной полосчатости. Кроме того, чем обусловлен выбор элементов, приведенных на редкоэлементных диаграммах, и какой использован способ подготовки проб к анализу? Все эклогиты имеют пологие спектры распределения РЗЭ и в целом бедны несовместимыми элементами по образу океанических базитов, однако имеют явные минимумы по высокозарядным Zr (где Hf?) и Nb, что возможно вследствие недоразложения рутила и циркона в пробах. Серьезные вопросы вызывают нанесенные на те же диаграммы для изверженных пород составы цоизититов и их рассмотрение в плане близости по составу к ультраосновным породам, что лишено всякого смысла. В целом, несмотря на то, что вещественные характеристики пород не являются фокусом диссертационного исследования, глава выглядит явно непроработанной.

Глава 4 посвящена минералого-петрографическим характеристикам пород, приводятся основные типы структур и текстур, составы ключевых минералов с использованием общепринятых классификационных диаграмм. Глава является одной из ключевых для дальнейшего использования в восстановлении тектонометаморфической истории ГЭК. Информация приведена достаточно детально, за исключением ряда вопросов, которые было бы крайне полезно прояснить:

- не указано, каким образом реконструирован состав первичного омфацита по диопсид-плаггиоклазовым симплектитам, а также не приведены иные важные характеристики (железистость, содержание чермакитового компонента);

- зональность граната в отдельных зонах не установлена, однако диапазоны составов достаточно значительные как в преобразованных, так и в однородных эклогитах, в связи с этим стоило привести графики распределения основных компонентов в отдельных зернах граната;

- насколько воспроизводима в пределах отдельных образцов модель роста граната, приведенная на рис. 24, и каким образом объясняется сосуществование в пределах зоны 2 включений омфацита с амфиболом и плаггиоклазом?

- интерпретация зональности граната в эклогитах уч. Самылино не представляется ясной; какие конкретно критерии использованы для констатации «завершения ретроградного и начала прогрессивного метаморфизма» без соответствующих расчетов Р-Т условий? Вдобавок, если судить по рис. 29, парагенезис в зонах граната I может как

включать кианит и цоизит, так и не включать данные фазы (вопрос тот же, что выше к эклогитам о. Столбиха).

Глава 5 содержит результаты определения Р-Т условий метаморфизма пород ГЭК, выполненного как методами классической геотермобарометрии, так и с привлечением специализированных программных средств (TWQ, Perple_X). Диссертантом проведена большая работа с целью реконструкций как собственно пиковых условий эклогитового и высокобарического гранулитового метаморфизма, так и таковых для последующих полистадийных ретроградных преобразований. По данной главе основные замечания следующие:

1. О. Столбиха. Не указано, каким образом рассчитывался эффективный валовый состав для фазового моделирования. С учетом ретроградного преобразования пород и подвижности компонентов, о которых упоминается выше, это может быть критично для расчетов. В особенности это касается определения доли трехвалентного железа ($X_{Fe^{3+}}$). Для однородных эклогитов при определенных параметрах (12–14 кбар, 710–740°C) гранат и омфациит сосуществует с плагиоклазом (рис. 38), что в принципе не позволяет рассматривать парагенезис как эклогитовый, тогда как все эклогитовые (безплагиоклазовые) поля характерны для меньших Т/Р. Следовательно, либо величина давления недооценена в расчетах, либо исследованные породы не являются собственно эклогитами. Для эклогитов-2 получен значительный диапазон температур – это реальный масштаб вариаций в пределах одного образца или результат применения различных гранат-клинопироксеновых геотермометров к одним из тем же минеральным парам?

2. Уч. Самылино. Тот же вопрос с присутствием плагиоклаза в парагенезисе. В то время, как условия, восстановленные по парагенезису $Grt + Cpx + Zo + Ky + Rt + Qz$ вполне удовлетворяют определению эклогитовых, гранат-омфациитовые парагенезисы пород реконструируются как плагиоклазсодержащие.

3. Для пород обеих локаций предполагаемые пиковые условия (рис. 39, 41) характеризуются большой разницей температур, а с учетом пироксенитов еще и при заметно различными давлениями. При этом для гранатовых пироксенитов регрессивный метаморфизм проходил по сути в тех же условиях, что и основной этап метаморфизма эклогитов. Чем, с точки зрения диссертанта, это может быть обусловлено?

4. Прогрессивная часть тренда для цоизититов очень сомнительна, поскольку основана на широком диапазоне температур, определенных для титанита и рутила. Возможно, проблема здесь в отсутствии парагенетической связи цоизита с Ti-минералами и/или стадийности их образования.

Глава 6 содержит изотопно-геохронологические данные по эклогитам и ассоциирующим типам пород ГЭК. Исследования проведены и описаны достаточно детально. Несмотря на то, что результаты датирования не позволяют однозначно говорить о фациальности метаморфизма, в качестве основного достижения отмечу здесь, что архейский и палеопротерозойский высокоградные этапы разделены достаточно уверенно. Отдельно здесь хотелось бы выделить полученные результаты по геохронологическому разделению сложных для изучения мелких метаморфогенных цирконов нескольких генераций, которое явным образом свидетельствует о двухэтапности метаморфизма. Из мелких замечаний к этой главе отмечу следующее:

1. Полосчатые эклогиты о. Столбиха. Не указан метод U-Pb анализа циркона, 2-5 кг – все-таки проба, а не навеска; непонятно, по каким критериям разделялись две популяции/генерации цирконов, если усредненные датировки аналогичны в пределах ошибки – по каким зонам циркона проводились эти анализы? Присутствие ассоциации минеральных включений, содержащих пост-эклогитовые фазы, как раз-таки исключает возможность интерпретации цирконов как сформированных на пиковой высокобарической стадии.

2. Однородные эклогиты о. Столбиха. Менее 0.82 – все-таки конкордантность (с. 107). Древнее (2.75 млрд лет) зерно магматического (?) циркона-I – скорее «в качестве реперного для оценки возраста магматического протолита».

3. Эклогиты уч. Самылино. В описании и разделении изученных цирконов наблюдается явная путаница. Мелкие однородные зерна второй популяции/группы, выделенные авторами на основании облика и внутренней структуры зерен, не могут быть и метаморфогенными, и магматическими просто в силу их разных отношений Th/U. Исходя из указанных характеристик, все эти зерна метаморфогенные, но (1) отношения Th/U в различной степени контролировалось парагенетически связанными фазами, или (2) отражает унаследованные отношения из магматогенного циркона, что нормально для циркона гранулитов, или (3) указывает на различную степень подвижности Th-U и степень рекристаллизации магматогенного циркона. Поскольку диссертант при обсуждении оперирует только $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возрастaми, сложно оценить, насколько приведенный диапазон (3007–2700 млн лет) соответствует реальным событиям и полихронности формирования циркона (а не последовательной потере Pb цирконом одного возраста). Кроме того, непонятно, почему цирконы этой популяции (включая наиболее молодые с предположительным возрастом ~2700 млн лет) считаются в числе прочих ксеногенными, а выше описанные магматогенные и более древние с возрастом 2787 ± 23 млн лет – «родными».

На мой взгляд, не считая высокоуранового метаморфогенного циркона, вероятно связанного (судя во возрасту) с флюидной активностью на этапе магматической реактивации и переработки литосферы плюмом (с. 18), в исследованных породах есть архейский первично-магматический циркон протолита и/или более древнего ксеногенного материала в нем, архейский метаморфогенный (включая новообразованный и рекристаллизованный магматогенный) и палеопротерозойский метаморфогенный (также новообразованный и рекристаллизованный по всем ранее существовавшим).

4. Цоизититы. Тот же вопрос с использованием исключительно $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ дат. Вдобавок, соотнесение отдельных «поздних» генераций основано только на интерпретации возраста и никак не подтверждается иными свидетельствами (в т.ч. составом минеральных включений).

Глава 7 содержит резюме двух главных глав, касающихся условий метаморфизма и возрастных оценок основных тектонотермальных событий с целью реконструкции общих трендов эволюции ГЭК и факторов, которые контролировали состояние литосферы региона в довольно протяженный период времени в без малого миллиард лет. В данной главе хотелось бы увидеть не повторение уже изложенных фактов (к примеру, содержание отдельных минералов в минералах), а согласованные на основании полученных результатов геолого-тектонические модели. То же самое касается и заключения к диссертации. Добавлю здесь, что после столь детального геохронологического исследования стоило приводить более конкретизированные даты/возрасты и их диапазоны, а не повторять реперные оценки в ~2.7 и 1.9 млрд лет.

Дополнительные замечания и рекомендации

1. Начиная с вводных глав, в диссертации акцентируется внимание на термине «эклогит» и приводятся общепринятые определения из литературы, однако впоследствии по тексту термин применяется как к породам с единичными реликтами высокобарических парагенезисов, так и для пород, матрикс которых содержит свободный плагиоклаз (с. 57). На мой взгляд, терминологию стоило унифицировать и привести в соответствие с общепринятой, называть разновидности описываемых пород по их фациальной принадлежности и/или минералогическому составу (гранатовый амфиболит и пр.), для обозначения существенно преобразованных пород по эклогитам использовать термин «апоэклогит».

2. По тексту диссертации здесь и далее автором неаккуратно использована терминология, касающаяся фациальной специфики метаморфизма. Не только метаморфизм позднего, палеопротерозойского ($P=14-17$ кбар, $T=700-800^{\circ}\text{C}$), но и собственно дискуссионного архейского (выше 11 кбар и 740°C) называется то высокобарным, то эклогитовым, то высокобарическим гранулитовым.

3. Несмотря на детальный структурно-текстурный анализ приуроченности реликтов высокобарических парагенезисов в будинах в обнажениях и шлифах, в работе практически не обсуждаются факторы их формирования и сохранности на ретроградной стадии (за исключением доводов на с. 41 и обсуждение генезиса цоизититов на с. 99-100). То же касается вопроса изофациальности эклогитов в будинах и вмещающих их пород, в которых, по словам диссертанта, «индекс-минералы эклогитовой фации отсутствуют». Данный вопрос имеет прямое отношение к решению вопроса о совместной эволюции будин и меланжа/матрикса (?) и региональном характере высокобарического метаморфизма (Володичев, 1990).

4. Не приводятся схемы расчета кристаллохимических формул, в частности для амфиболов, какие подходы к учету Fe^{3+} использованы.

5. С. 12 – все-таки не приборы, а масс-спектрометры. В принципе, не считая электронно-зондовых исследований, все остальные не сопровождаются сколь-либо детальным описанием методической части.

Приведенные замечания и рекомендации могут быть использованы диссертантом в дальнейшей работе и при публикации результатов. Вместе с тем, проведенное исследование выглядит законченным и целостным, основная цель его достигнута. Приведенные защищаемые положения и выводы в достаточной степени обоснованы с точки зрения новизны и актуальности, подтверждены большим объемом оригинального фактического материала, апробированы в 4 статьях в рецензируемых изданиях из базы Web of Science и дополнительно 5 статьях – из списка изданий, рекомендованных ВАК, а также тезисах докладов российских и международных совещаний. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации и защищаемым положениям.

Содержание диссертационного исследования полностью отвечает критериям пункта 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор Максимов Олег Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.3 – «Петрология, вулканология».

Официальный оппонент

Скузоватов Сергей Юрьевич, кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора по научной работе, старший научный сотрудник лаборатории геохимии изотопов, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской Академии наук (ИГХ СО РАН), 664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1А. Тел. 89148766339, email: skuzovатов@igc.irk.ru.

Дата оформления отзыва – 9 февраля 2024 г.

Я, Скузоватов Сергей Юрьевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой Диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

Подпись Скузоватов С.Ю.
ЗАВЕРЯЮ 09.02.2024
Зав. канцелярией
ИГХ СО РАН

