

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию АБДРАХМАНОВА ИЛЬНУРА АЛЬБЕРТОВИЧА «Эволюция минерального состава и условия формирования гранулитов оазиса Бангера. Восточная Антарктида», представленную на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.4. - «Минералогия, кристаллография. Геохимия. геохимические методы поисков полезных ископаемых».

Актуальность темы диссертации определяется тремя факторами. Во-первых – гранулитовые комплексы – это сравнительно редкие метаморфические образования, для формирования которых требуются специфические условия в Земной коре – повышенный тепловой поток. Поэтому они играют весьма важную роль для восстановления геологической истории районов их распространения. Особенно это касается формирования УНТ-гранулитов умеренного и невысокого давления, которое определяет необходимость интенсивного прогрева большой толщи пород на сравнительно невысокой глубине. Во-вторых – минералы гранулитов, особенно УНТ-гранулитов, редко сохраняются неизмененными, что затрудняет изучение гранулитов и требует применения качественных аналитических методов. В-третьих – район работ – восточная Антарктида – сравнительно мало изучен и трудно доступен для геологов. Поэтому геологические коллекции из этого района представляет собой редкий и ценный материал для исследования. Кроме того, гранулиты оазиса Бангера, которому посвящена диссертация, изучены существенно хуже, чем классические гранулиты других областей Антарктиды.

В основу диссертации положена коллекция метаморфических пород, отобранная автором в ходе 64-ой Российской антарктической экспедиции 2018-2019 г. Всего было исследовано 144 образца из 41 точки наблюдения; из них 24 образца исследованы подробно. Коллекция образцов характеризует проявление гранулитового метаморфизма в оазисе Бангера. Район характеризуется хорошей обнаженностью, что позволило автору проводить как петрографические, так и геологические наблюдения. Материалы, полученные при исследовании этой коллекции, изложены в диссертации на 193 страницах. Диссертация состоит из шести глав, четырех приложений и списка литературы из 260 источников. В тексте диссертации содержится 73 рисунка и 6 таблиц. Кроме того, на 27 страницах приложений приведены таблицы с валовыми химическими составами пород и микрозондовыми анализами минералов; все анализы минералов пересчитаны на структурные формулы. Практические результаты работы соискателя, заключающиеся в создании компьютерной программы по определению давления по

ОТЗЫВ

ВХ. № 9-362 от 17.10.25
АУ УС

заданному химическому составу минералов на основе гранат-шпинелевого барометра, приведены в приложениях «А» и «Б» на стр. 164 и 165 в виде акта о внедрении и свидетельства государственной регистрации. Основные защищаемые положения соискателя опубликованы в 14 печатных работах, среди которых 1 статья - из перечня ВАК и 3 статьи в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus; 10 публикаций в материалах конференций, в которых автор принимал личное участие. Личный вклад автора в диссертацию весьма внушителен – от постановки задач исследований, до получения результатов. В том числе участие в полевых работах, камеральная обработка материала, лабораторные аналитические исследования, построение моделей и формулировка выводов.

В первой главе диссертации приводятся современные представления о гранулитах и гранулитовой фации метаморфизма. Глава представляет собой литературный обзор, охватывающий основные вопросы метаморфической петрологии высокотемпературных пород. Здесь подробно охарактеризованы основные минеральные ассоциации, формирующиеся в гранулитовой фации, особенно – минералы УНТ-метаморфизма. В этой главе показаны особенности применения различных минералогических термометров и барометров, а также приводятся возможные пути эволюции Р-Т-параметров гранулитов в разных геологических режимах развития областей Земной коры.

Вторая глава – Геологическое строение района исследования – начинается с обзора геологических исследований, проведенных в восточной Антарктиде. Далее в ней приводится краткое описание геологического строения отдельных провинций и очень подробное описание геологического строения оазиса Бангера – основного объекта исследований диссертанта. Глава построена на основе анализа геологической карты, составленной ранее нашими соотечественниками, и в обилии подкреплена полевыми наблюдениями автора. Описание взаимоотношений интрузивных тел и стратиформных подразделений, складчатых и разрывных структур, тектонических нарушений и др. сопровождается многочисленными фотографиями этих объектов. Приведены литературные данные, показывающие неопротерозойский возраст гранулитового метаморфизма пород оазиса Бангера.

В третьей главе охарактеризован набор методов, которые были использованы для диагностики минералов и анализа макро- и микроэлементного состава минералов и пород. В своей работе автор применял самые современные методы анализа вещества и методики обработки аналитических данных. Кроме того, в главе приведена карта фактического материала, в которой показаны места отбора проб для анализа. Для определения валового состава пород автором применялся комплекс методов пламенной фотометрии и атомной абсорбции. Ведущими минералогическими методами, позволившими провести оценку

макрокомпонентного состава минералов, являлись методы растровой электронной микроскопии, которую автор проводил на различных современных сканирующих электронных микроскопах - JSM-6460LV, JSM-7001F, JSM-6510LA. Условия съёмки выбирались соответственно исследуемому материалу. Микроэлементный состав минералов (кварца, граната, ортопироксена; 6 образцов, 32 точки анализа) изучался методом вторично-ионной масс-спектрометрии (SIMS) на базе ионного зонда Cameca IMS-4f в Ярославском филиале Физико-технического института РАН. Диагностика минералов во включениях проводилось методом конфокальной КР-спектроскопии с возбуждением спектра ИК-лазером с длиной волны $\lambda = 785$ нм. Мощность лазера составляла 300 мВт. В этой главе также подробно охарактеризованы методы термобарометрии и построения траекторий эволюции P-T параметров метаморфизма. Автором применялись как традиционные методы P-T оценок, основанные на минеральных реакциях (гранат-шпинель-силлиманит-кварцевый, шпинель-кордиеритовый, гранат-кордиеритовый, гранат-ортопироксеновый, гранат-ортопироксен-плаггиоклаз-кварцевый термометры и барометры), так и мономинеральные термометры («Ti-в-кварце», «Ti-в-биотите», сольвусный полевошпатовый). Моделирование условий устойчивости минеральных парагенезисов и путей эволюции гранулитов оазиса Бангера проводилось с помощью одной из последних версий программы Theriak/Domino (01.08.09) с использованием современной базы согласованных термодинамических данных. Псевдосечения дополнялись сеткой изоплет, показывающих расположение модельных составов минералов и позволяющих проводить их сравнение с реальными измеренными составами.

В главе 4 приводится петрохимическая и минералого-петрографическая характеристика гранулитов оазиса Бангера. Это самая объемная глава диссертации. В ней собрано петрографическое описание гранулитов, а также анализ их химического состава и микроэлементного состава некоторых порообразующих минералов (граната и ортопироксена). Обработка диаграмм валовых составов гранулитов показала, что протолитом для них служили обломочно-глинистые осадочные толщи. Компактное расположение точек на диаграмме AFM показало, что существенного изменения химического состава пород при метаморфизме, вероятно, не происходило. Петрографическое описание выполнено на профессиональном уровне и сопровождается необходимыми микрофотографиями шлифов и профилями составов минералов, позволяющими оценить изменение составов зерен от центральных зон к краевым. Обобщение данных по петрографическому анализу позволило автору показать, что, в толще метapelитовых гранулитов можно выделить три доминирующих типа пород (минеральных ассоциаций): гранат-силлиманитовые сланцы (с кордиеритом), гранат-кордиеритовые сланцы, гранат-ортопироксеновые сланцы (с кордиеритом). Отличительной особенностью гранулитов

оазиса Бангера является весьма высокая доля Al_2O_3 в ортопироксене, достигающая в отдельных зернах 9 мас %.

Пятая глава посвящена диагностике и анализу составов рудных минералов. Материал, изложенный в этой главе, вызывает наибольший интерес, так как включает описание интересных минералогических образований и интерпретацию их происхождения. В этой главе приводятся описание как относительно крупных выделений рудных минералов, так и рудных минералов в микровключениях в кварце. Для анализа рудных минералов автор использовал наиболее современные методы локального анализа – электронную микроскопию и КР-спектроскопию. Аналитическая сложность работы с микровключениями заключается в том, что их размер соизмерим, или даже меньше зоны возбуждения спектров электронным лучом или лазером. Применение этих методов позволило показать, что некоторые микровключения в кварц – двухфазные, состоящие из шпинели и рутила. Для интерпретации генезиса этих включений Ильнур Альбертович предложил оригинальный механизм, включающий сочетание эксклюзии и просачивания флюидов по трещинам.

Шестая глава посвящена минеральной термобарометрии, построению Р-Т-траекторий и реконструкции геодинамических обстановок метаморфизма. Глава состоит из трех частей. В первой части автор приводит результаты оценок температуры и давления при метаморфизме с помощью традиционных термометров и барометров, основанных на перераспределении компонентов между равновесными минералами. Здесь примечательно то, что автор использовал современные Al-ортопироксеновые термометры, опираясь на высокий уровень Al_2O_3 в ортопироксене. Кроме классических термометров и барометров автор использовал менее надёжные способы оценки температуры – мономинеральные термометры типа Ti-в-кварце. Результаты термометрии показали, что гранулиты оазиса Бангера сформировались в области УНТ-метаморфизма при температуре пика метаморфизма более 900°C (по отдельным оценкам – до 1030°C). Но при столь высокой температуре оценки давления оказались весьма умеренными – $P=5-7$ кбар. Вторая часть этой главы посвящена анализу минеральных парагенезисов с помощью псевдосечений в координатах Р-Т (или изохимических диаграмм). Расположение полей минеральных ассоциаций на приведенных псевдосечениях хорошо согласуется с результатами оценок методом классической термобарометрии. Важный вывод из этих построений заключается в том, что проградная и ретроградная ветви метаморфизма лежат в области умеренных давлений (ниже устойчивости рутила). При этом ретроградная ветвь преобразований протекает при практически таком же давлении, что и проградная. То есть декомпрессия на ретроградном этапе проходила на очень небольшую величину, сопоставимую с погрешностями оценок. Показательно, что Ильнур Альбертович обратил внимание на важную

роль активности воды при метаморфизме, которая инициирует анатектические процессы и формирование мигматитов. В этой части главы, сопоставляя поля устойчивости минералов с наблюдениями псевдоморфоз мелкого игольчатого силиманита по кордиериту, автор делает вывод о компрессии на заключительной фазе ретроградных преобразований. Это построение, на мой взгляд, является неоправданным. В третьей части шестой главы приводится геологическая интерпретация Р-Т-тренда метаморфических преобразований. Показано, что тренд имеет траекторию узкой субгоризонтальной петли и направлен по часовой стрелке. Такое направление Р-Т эволюции автор связывает с повышенным тепловым потоком, который инициирован растяжением и утонением участков Земной Коры.

Таким образом, диссертация Абдрахманова Ильнура Альбертовича представляет собой логически завершенную научную работу, аккумулирующую большой объем минералогических и петрологических наблюдений по УНТ-гранулитам оазиса Бангера в восточной Антарктиде. По структуре рукопись содержит все необходимые разделы и отвечает требованиям, установленным ВАК для диссертаций.

В целом диссертация Абдрахманова Ильнура Альбертовича оставляет вполне положительное впечатление. Текст диссертации хорошо структурирован и не осложнен лишними фактами и рассуждениями. Все иллюстрации и микрофотографии выполнены качественно и помогают восприятию материала из текста. Ссылки на литературу – корректные и уместные. Несомненная положительная сторона диссертации — это практическое внедрение результатов исследований. Высокое качество проведенных работ подтверждается тем, что соискатель смог заинтересовать своими результатами стороннюю организацию - крупный научный институт «ВНИИ Океангеология». Создание программы по оценке давления по гранат-шпинелевому барометру может быть использовано как для научных вычислений при исследовании аналогичных комплексов, так и в учебных целях.

Несомненной положительной стороной работы соискателя является то, что он очень ответственно подошел к обзору проблемы формирования гранулитов вообще, и УНТ-ассоциаций в них в частности. Об этом говорит объемная и содержательная глава 1, сопровождаемая весомым списком современной литературы. Кроме того в Главе 2 приводится подробный анализ большого количества литературы по геологическому строению и истории исследования Антарктиды. Поэтому у читателей складывается впечатление, что диссертация Ильнура Альбертовича закономерно встраивается как отдельное звено в большую цепь исследований, проведенных несколькими поколениями геологов.

Также стоит отметить высокий уровень аналитических исследований, приведенных в работе. Все анализы выполнены на современном высокотехнологичном оборудовании.

Обработка и пересчеты анализов выполнены соискателем по стандартным хорошо проверенным схемам и методикам. Весьма примечательно, что соискатель показал высокие навыки исследований рудных минералов и микровключений рудных минералов в кварце, размер которых сопоставим с диаметром зоны возбуждения лазером или электронным микрозондом, или меньше неё. Для работы с такими мелкими фазами автор освоил современный метод КР-спектроскопии и методику обработки и сравнения спектров минералов. Примененная автором комбинация рентгеноспектральных и рамановских спектров показала хороший результат, позволив провести диагностику микровключений и показать их полифазное строение.

Из диссертации отчетливо видно, что соискатель во многом овладел сложным и перспективным петрологическим инструментом - методом построения псевдосечений (изохимических диаграмм) в координатах интенсивных параметров. Весьма важно и принципиально то, что при построении псевдосечений соискатель учитывает не только традиционные интенсивные параметры – температуру и давление, но и активность H_2O , которая существенно меняет конфигурацию полей на диаграммах, и влияет на интерпретацию результатов. Кроме того необходимо отметить, что в качестве исходного состава системы автор использует реальные составы пород. При этом, параметры пика метаморфизма, оцененные по положению изоплет на псевдосечениях оказываются сопоставимыми с параметрами, рассчитанными по мультиминеральным термобарометрам.

Отдельно хочется обратить внимание на методы традиционной минералогической термо- и барометрии, используемые автором. Из текста диссертации следует, что автор перебрал практически *все* возможные способы оценки P-T условий метаморфизма и привел сравнение полученных результатов (что является достаточно трудоемкой и ответственной работой). Очень хорошо проведен анализ типохимизма шпинелей, применительно к минералогической термобарометрии на её основе. Остаётся пожелать Ильнуру Альбертовичу дальнейшего совершенствования в проведении исследований методами количественной метаморфической петрологии.

Очень интересным разделом диссертации является интерпретация формирования полифазных шпинель-рутиловых игольчатых микровключений в кварце. Понимая, что сольвусный механизм не способен полностью объяснить появление высокомагнезиальных ориентированных фаз в кварце, автор приводит два аргументированных механизма, приводящих к их росту. Первый механизм рассматривает «сквозную» диффузию атомов магния вдоль ослабленных зон кристаллической решетки кварца. Второй - просачивание флюидов, обогащенных Mg, по микротрещинам спайности. Этот механизм, предусматривает

важную роль потоков флюидов при их формировании. Оба механизма, совершенно обосновано, приводят к выводу о том, формирование ориентированных микровключений проходило в условиях активных деформаций.

Однако, несмотря на общее, вполне положительное впечатление о диссертации, некоторые её аспекты вызывают вопросы и замечания.

1. Стр. 21, третий абзац. Непонятно, как тренды изобарического охлаждения могут быть “закручены как по часовой стрелке, так и против часовой стрелки”? Кроме того, термин – “закручены” – стоит избегать, так как он больше подходит для устной речи, а не для научных трудов.

2. Стр. 11, рис. 1. Хорошо было бы показать всю сетку фаций, а не только её высокотемпературную часть. Это необходимо для того, чтобы у читателя складывалось впечатление о всём температурном интервале метаморфических пород и о месте гранулитов в общей температурной градации метаморфизма.

3. Стр. 51, раздел Рамановская микроскопия. Автор указывает, что спектры возбуждались полупроводниковым лазером с длиной волны 785 нм мощностью 300 мВт. Непонятно зачем был выбран лазер, работающий в ближнем ИК-диапазоне? Интенсивность рамановского отклика – маленькая, а величина прохождения вглубь материала – большая. При этом мощность лазера 300 мВт – это очень высокая мощность, при которой многие рудные минералы просто выгорают или переходят в другую, более высокотемпературную фазу. Не лучше ли было использовать менее разрушительные методы воздействия на исследуемое вещество?

4. Стр. 57, рис. 28. Диаграмма АФМ имеет смысл в том случае, если на неё нанесены реальные составы равновесных минералов. Тогда она выступает как диаграмма состав-парагенезис и может применяться для петрогенетических построений. Простое нанесение на эту диаграмму точек валовых составов пород не дает никакой информации. В этом виде рис. 28 лишний.

5. Стр. 60, абзац 2. Автор утверждает, что кордиерит “.... В скрещенных николях изотропен, что указывает на высокую степень вторичных изменений минерала.” Необходимо пояснить, чем именно замещается кордиерит. Наиболее часто кордиерит замещается слюдами, силиманитом, глинистыми минералами. Но ни эти минералы, ни сам кордиерит – не изотропны (хотя некоторые и обладают малым двупреломлением). Может это и не кордиерит, а другой минерал? Тогда ретроградная ветвь Р-Т-тренда может иметь другую конфигурацию и не опускаться в поле устойчивости кордиерита.

6. Стр. 76-85. Глава 4.3. содержит описание особенностей составов породообразующих минералов. На 10 страницах текста перечисляются важные числовые характеристики. Но в этой главе нет *ни одной* сравнительной диаграммы, где бы мы видели относительное расположение составов минералов. А таких диаграмм придумано очень много, они информативны и просты для построения; можно, при необходимости, и свою диаграмму предложить. Ибо только текстовое описание особенностей составов – совершенно не способствует восприятию информации. Сравнительный анализ по составу минералов из разных пород не приведен вообще. А он необходим именно в этой главе.

7. Стр. 87, рис. 49. Смысл графиков распределения РЗЭ между минералами $DHREE$ (Opx/Grt) не понятен. Для чего этот рисунок?

8. Стр. 90-91. Выводы главы 4 о петрографии пород и составе породообразующих минералов. А выводов, собственно и нет. Есть только краткий пересказ главы 4 ещё раз.

9. Стр. 121, первый абзац, последнее предложение. Предложение состоит из 7 строк – слишком длинное и непонятное.

10. Стр. 125, рис. 68. Рисунок очень перегружен. В тексте указано для образца 2а температура начала метаморфизма – 730 °С, а на рисунке область оконтурена на уровне 830 °С. Чему верить? Непонятно, что означают зелёные не закрашенные прямоугольники и чем они отличаются от синих закрашенных.

Одних изоплет X_{Mg} в гранате – явно не достаточно для оценки положения породы в Р-Т-поле. Необходимо кучное расположение хотя бы двух или трех независимых изоплет. Почему не использовались изоплеты состава ортопироксена или шпинели? Никак не учтен состав кордиерита!

Вообще создается впечатление, что псевдосекция существует сама по себе, а Р-Т-оценки по независимым от нее минеральным термобарометрам – сами по себе.

11. Рисунки 68, 69, 70. Эти рисунки иллюстрируют расчеты, выполненные для разной активности H_2O . Но при этом, во всех породах Р-Т-преобразования проходят при минимальном изменении давления, на уровне 5-7 кбар. В этом случае имеет смысл говорить об изобарическом метаморфизме и поэтому координата Р – для графиков, иллюстрирующих эти процессы - не информативна. Рассматривать такие процессы необходимо не в координатах Р-Т, а в координатах Т- aH_2O .

12. Стр.132-133. Автор опровергает схему метасоматического образования позднего игольчатого силиманита, выполняющего агрегат замещения, развивающийся по кордиериту. Вместо нее предлагается схема компрессионного формирования этого силиманита. Но

выглядит эта схема совершенно не обосновано. Тем более, что эта компрессия происходит практически в пределах ошибки оценки давления. Никаких других – геологических или петрографических свидетельств компрессии на заключительном этапе – нет. Гораздо логичнее предположить формирование мелкого игольчатого силиманита в результате открытия системы на заключительной фазе ретроградного этапа и изменения её химического состава. Например, увеличения активности кислотных компонентов неизбежно должно привести к расширению полей устойчивости силикатов Al. То есть поле силиманита может расшириться в низкobarическую область, а при этом поле кордиерита - сократится. И это избавит нас от необходимости компрессии и необходимости придумывать для неё геологическое обоснование.

13. Стр. 138, вывод 4. Вытекает из предыдущего замечания. Постпиковые преобразования, заключающиеся в развитии позднего силиманита – это недостаточно для выделения стадии сжатия. Это обычное спокойное остывание на глубине.

Высказанные замечания имеют, преимущественно, рекомендательный характер и направлены на то, чтобы сделать последующие работы соискателя более совершенными, а петрологические модели – более реалистичными и обоснованными.

Автореферат отражает содержание диссертации.

В итоге можно заключить, что диссертация «Эволюция минерального состава и условия формирования гранулитов оазиса Бангера. Восточная Антарктида» представляет собой законченный научный труд, который является существенным вкладом в изучение геологии и петрологии древних кристаллических пород восточной Антарктиды. Диссертация соответствует всем требованиям ВАК, установленным к диссертационным работам на соискание учёной степени кандидата наук. Автор диссертации – Абдрахманов Ильнур Альбертович заслуживает присуждения учёной степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.4. Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых.

26.09.2025 г.

Составитель отзыва:

Зав. лаб. метаморфизма и метасоматизма ИГЕМ РАН, старший научный сотрудник, д.г.-м.н.

Козловский Василий Михайлович



Козловский В.М.

119017, Москва, Старомонетный пер. д. 35. ФГБУН Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН; тел.8(916)992-7628; e-mail: bazily.koz@gmail.com

Я, Козловский Василий Михайлович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

26.09.2025 г.



Козловский В.М.

Подпись автора отзыва, В.М.Козловского заверяю.

Зав. лаб. метаморфизма и метасоматизма ИГЕМ РАН

