

О Т З Ы В

официального оппонента, к.г.-м.н. Сухорукова Василия Петровича на диссертацию Абдрахманова Ильнура Альбертовича на тему: «Эволюция минерального состава и условия формирования гранулитов оазиса Бангера, Восточная Антарктида», представленную на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых.

1. Актуальность темы диссертации

Изучение условий метаморфизма древних кратонов является ключом к расшифровке условий формирования земной коры и реконструкции палеогеодинамических обстановок на ранних этапах ее формирования. Актуальность данной работы в первую очередь связана с труднодоступностью и малоизученностью объекта исследования. Любые данные, полученные по столь отдаленным объектам, представляют собой ценный вклад в развитие научного направления. Восточная Антарктида является регионом, где, в сравнении с другими областями, известно наибольшее число проявлений УНТ метаморфизма. Они расположены в пределах Земли Эн-дерби и примыкающих районах Земли Королевы Мод и залива Прюдс (комплекс Нейпир, серия Рауэр и др.). Еще одним участком локализации УНТ гранулитов может стать оазис Бангера (Земля Уилкса).

Ультравысокотемпературный метаморфизм как отдельный тип высокотемпературного метаморфизма стал рассматриваться сравнительно недавно и за последние годы сформировалось представление о метаморфизме сверхвысоких температур как закономерном этапе эволюции докембрийских складчатых поясов. Вместе с тем, тема не потеряла актуальность и изучение новых объектов вносит существенный вклад в понимание процессов, происходящих при формировании древней континентальной коры.

Одна из минералогических проблем, с которой сталкиваются при изучении гранулитов – трудности выявления минеральных парагенезисов, образовавшихся при высоких и сверхвысоких температурах. Решение этой задачи, получение температурных оценок, характеризующих проградную стадию гранулитового метаморфизма, требуют детальных исследований микроструктур агрегатов и составов индикаторных минералов, несущих информацию об экстремальных P–T условиях минеральных равновесий. В работе рассматриваются минеральные взаимоотношения минералов, индикаторных для эволюции высокотемпературных комплексов.

2. Научная новизна диссертации

Диссертация содержит ряд заключений, характеризующих ее научную новизну.

ОТЗЫВ

ВХ. № 9-326 от 31.10.2025
АУ УС

1. Впервые на основе данных минеральной термобарометрии доказана УНТ природа метаморфизма гранулитов оазиса Бангера. 2. В метапелитовых гранулитах обнаружены и описаны «пламенеvidные» выделения ульвошпинели; находящиеся в закономерных сростаниях с ильменитом, с содержанием Usp минала до 67–78 мол.%. Показано, что после распада твердого раствора Ti-Mag SS температура равновесия двух минералов превышала 1000 °C. 3. Впервые в регионе выявлены ориентированные микровключения герцинита в кварце и показано, что их генезис связан с распадом высокотемпературного твердого раствора и пластическими деформациями кварца на ретроградной стадии. 4. Показано, что термобарическая эволюция метаморфизма описывается P–T траекторией, демонстрирующей изобарический нагрев на проградной стадии и изобарическое охлаждение на ретроградной стадии, что согласуется представлениями о формировании гранулитов оазиса Бангера в обстановке растяжения земной коры.

3. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Высокая степень обоснованности обусловлена представительностью каменного материала, использованием современных методов локального анализа минерального вещества, выполненного в аккредитованных лабораториях, комплексным подходом к обработке аналитических данных, использованием современных методов и подходов к оценке P-T-параметров метаморфизма, реконструкции P-T-трендов.

4. Научные результаты, их ценность

В работе на основе комплексного минералого-геохимического исследования выявлены главные закономерности эволюции минерального состава метапелитовых гранулитов оазиса Бангера, уточнены условия метаморфизма, построены P–T траектории и дана геодинамическая интерпретация полученных результатов.

На основании проведенных исследований сделаны следующие главные выводы:

1. Гранулитовый комплекс оазиса Бангера является проявлением метаморфизма сверхвысоких (>900 °C) температур, протекавшего при давлении 6–7 кбар. Минеральными индикаторами УНТ метаморфизма выступают: парагенезис низкоцинкистого герцинита с кварцем в метапелитовых гранулитах; ассоциация граната и высокоглиноземистого ортопироксена; кварц с высоким содержанием примеси титана; мезопертиты и антипертиты, реинтегрированные составы которых отвечают гомогенным K-Na полевому шпату с повышенным содержанием анортитового минала и Ca-Na полевому шпату с повышенным содержанием ортоклазового минала; закономерные сростания ильменита и

ульвошпинели, являющиеся продуктами распада высокотемпературного твердого раствора.

2. В породах установлены и описаны закономерно ориентированные игловидные включения рутила и герцинита в кварце. Их генезис связан с распадом твердого раствора и высокотемпературной диффузией структурных примесей кварца (Al, Fe, Ti) в направлении зон трансляционного скольжения параллельных $(10\bar{1}0)$, по которым происходили пластические деформации кварца на ретроградной стадии. Появление шпинели в составе микропарагенезиса Al–Fe–Mg–Ti оксидов интерпретируется как результат «сквозной» диффузии атомов Mg вдоль ослабленных зон кристаллической решетки кварца или просачивания флюидов, обогащенных Mg, по микротрещинам, формирующимся в результате гидроразрыва.

3. Термобарическая история гранулитов включает изобарический нагрев при 6–7 кбар до температуры ~940–1030 °C и последующее изобарическое охлаждение при 5–6 кбар до температуры ~750 °C. Проградная ветвь P–T траектории располагается в полях устойчивости Grt ± Sil–Crd–Ilm и Grt–Crd–Opx–Ilm парагенезисов ниже фазовой границы Ilm–Rt, демонстрируя умеренное давление при метаморфизме. Ретроградная ветвь проходит через область стабильности кордиерита. На поздних стадиях этот минерал частично замещается поздним силлиманитом, что по данным моделирования указывает на рост давления.

4. Эволюция минерального состава гранулитов Бангера отражает двухстадийную тектоническую эволюцию региона. Формирование парагенезисов, отвечающих проградной стадии метаморфизма, происходило в условиях растяжения земной коры на глубинах 20–23 км за счет высокого теплового потока под воздействием андерплейтинга. Формирование постпиковых ассоциаций – в обстановке сжатия. Подобный сценарий согласуется с моделью тектонической эволюции субдукционно-аккреционных орогенов.

Большинство сделанных выводов не вызывает сомнений, они обоснованы с использованием современных аналитических методов, современных методик и подходов к изучению метаморфических комплексов. В частности, считаю полностью обоснованным ультравысокие температуры (более 900°C) пика метаморфизма изученных пород, а также условия формирования включений герцинита в кварце, связанных с распадом твердого раствора. К реконструкции P–T – тренда метаморфизма и интерпретации минеральных реакций имеется ряд вопросов, которые отражены в разделе «Замечания и вопросы».

Научная ценность работы обусловлена ее актуальностью и научной новизной. Кроме того, хочется отметить приведенные в работе автором обширные литературные обзоры по всем ключевым научным проблемам, связанным с тематикой исследования.

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 14 печатных работах, в том числе в 1 статье – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук (далее – перечень ВАК), в 3 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, имеется 1 акт о внедрении результатов работы в текущую деятельность ФГУП «ВНИИОкеанология».

5. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации

Полученные результаты могут быть использованы в ходе геолого-съёмочных работ, проводимых геологическими организациями (Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Полярная морская геологоразведочная экспедиция, ВНИИОкеангеология) для совершенствования методики геологического картирования и поисков полезных ископаемых на изучаемой территории. Аналитические данные, содержащиеся в диссертации, и методические подходы, использованные в работе, могут применяться в учебных целях при чтении лекций и проведении лабораторных занятий по дисциплинам «Генетическая интерпретация строения минеральных агрегатов», «Минеральная термобарометрия», «Петрология».

6. Рекомендации по использованию результатов работы

Полученные результаты могут быть использованы в ходе геолого-съёмочных работ, проводимых геологическими организациями

7. Замечания и вопросы по работе

Защищаемые положения:

Второе защищаемое положение начинается словами: «Кварц из метапелитовых гранулитов содержит закономерно-ориентированные включения рутила и герцинита...» – это не защищаемое положение, а констатация факта, можно перефразировать.

Глава 4. Петрохимическая и минералого-петрографическая характеристика гранулитов

Глава 4.2.1 Рис. 31, 33 – фотографии не очень хорошего качества.

Глава 4.3. Желательно использовать диаграммы для представления составов минералов, текст воспринимается тяжелее.

Глава 4.4. Приводятся данные о спектрах распределения микроэлементов в гранате и ортопироксене и данные об их корреляции между собой. Указывается, что часть спектров имеет равновесные коэффициенты корреляции, другая часть не входит в область равновесных. Никаких выводов из этих данных не приводится, непонятно, в итоге, указывает это на равновесность ортопироксена и граната между собой или нет. Можно ли рассматривать эту систему, не принимая во внимание REE состав циркона?

Глава 5.

В части 5.1.1. описывается положение зеленой низкоцинковой шпинели в породе, при это отмечается, что «Мелкие идиоморфные кристаллы зеленой шпинели образуют включения в гранате, силлиманите и кордиерите (рисунок 50, а, б), рассеяны в кварц-полевошпатовых прослоях (рисунок 50, в). Более крупные – наблюдаются в кордиеритовых прослоях и приурочены к интерстициям в агрегатах зерен кордиерита (рисунок 50, е). Иногда ксеноморфные выделения зеленой шпинели обрастают идиоморфные кристаллы граната и силлиманита (рисунок 50, г, д), находятся в сростании с ильменитом и содержат микропрожилки позднего магнетита». В этой части совершенно не отмечается, что такая зеленая шпинель образует включения непосредственно в кварце (не игольчатые кристаллы, а просто включения). Об этом мы узнаем только в главе 5.2.1, хотя этот факт является ключевым для интерпретации условий метаморфизма и, на мой взгляд, должно упоминаться при описании микроструктурных взаимоотношений.

Глава 6.

Стр. 113 Опечатка в названии главы

6.3 Термометрия тройных растворов полевых шпатов Термометрия по полевым шпатам – один из наиболее важных геотермометров. Автор дает хороший обзор и сравнение оценки исходного состава двумя способами (SEM и пересчет по площади). Вместе с тем, термометрия по тройным полевым шпатам выполнена только для одного образца, хотя, судя по описаниям, мезопертитовые полевые шпаты встречаются во многих образцах (2а, 55, 67).

Термометрия в гранулитовых и УВТ комплексах имеет ряд сложностей, которые автор хорошо описал в соответствующем разделе. В частности, проблема переуравновешивание Fe-Mg минералов на регрессивной стадии метаморфизма. Это заставляет использовать другие виды геотермометров, менее подверженные постпиковым изменениям. При таких сложностях и ограничениях непонятно, почему при наличии в породе рутила и циркона не используются распространенные и достаточно надежные геотермометры по содержанию циркония в рутиле и титана в цирконе. Это одни из

немногих геотермометров, устойчивых к ретроградным изменениям. На этом основании можно было бы показать разницу между рутилом прогрессивной и пиковой стадий.

Для оценки РТ-параметров регрессивной стадии можно использовать традиционные обменные геотермометры.

6.6 Построение Р–Т траекторий

Интерпретация минеральных ассоциаций и данных моделирования фазовых диаграмм.

Например, образец 2а (стр. 124). Непонятно, почему в качестве пиковой ассоциации выбрана именно эта (гранат–кордиерит–шпинель–калиевый полевой шпат–ильменит–кварц). (1) В породе отмечается рутил во включениях в гранате и в матриксе породы, почему он не предполагается в пиковой ассоциации? Это могло бы указывать на более высокие давления. Включения рутила в гранате действительно может объясняться его формированием на прогрессивной стадии, но рутил встречается также и в матриксе породы. Включение рутила в пиковую ассоциацию будет указывать на более высокие давления, это важный индикатор, поскольку других приемлемых барометров в этой ассоциации не наблюдается (2) Не приводится доказательств формирования кордиерита на пике метаморфизма или наоборот, на регрессивной стадии. Судя по предполагаемому РТ-тренду (рис. 68), образование кордиерита происходило только на регрессивной стадии, при снижении давления, вместе с тем реакционных структур указывающих на это не наблюдается. Какие есть свидетельства в пользу того или другого? (3) По полученному РТ-тренду получается, что максимальные температуры метаморфизма достигались на стадии снижения давления, какой предполагается механизм, при котором при снижении давления происходит разогрев пород? (4) Содержание Fe и Mg в гранате, как подчеркивал сам автор, имеют тенденцию изменяться на регрессивной стадии метаморфизма с понижением температуры. Это доказывается зональностью в гранате в разных образцах (глава 4.3), (рис. 44). Вместе с тем, автор на диаграмме использует изоплеты xMg в гранате для определения пика метаморфизма. Как это объясняется? Обычно используют изоплетыgrossуляра, как они ведут себя на диаграммах? (5) Не всегда понятно, как оценивались РТ-параметры прогрессивного этапа метаморфизма (синие квадраты с номером 1 на рисунках 68, 69). Судя по описанию в тексте, температуры оценивались по содержанию титана в биотите во включениях в гранате, а давления по полю устойчивости соответствующей ассоциации на изохимическом сечении. Геотермометр по содержанию титана в биотите часто дает заниженные значения температуры, на мой взгляд, правильнее было бы основываться на изоплотах состава граната, которые на рисунках не показаны. В целом, минералы

проградной стадии редко сохраняются при ультравысокотемпературном метаморфизме и обнаружение таких ассоциаций требует веских доказательств.

Наиболее спорным на мой взгляд является эпизод подъема давления в конце регрессивного этапа метаморфизма. Такой подъем давления в тектоническом плане должен быть обусловлен сменой тектонического режима с обстановки растяжения, которую предполагает автор, на обстановку сжатия, т.е. ознаменовать новое тектоническое событие, которое должно сопровождаться этапами метаморфизма, магматизма и складчатости. Выводы о подъеме давления сделаны на основании только термодинамического моделирования, а в частности, обнаружения во всех образцах симплектитов биотита и силлиманита, развивающихся по кордиериту, и положению поля этой минеральной ассоциации в РТ-координатах выше по давлению, чем поле замещаемого кордиерита.

На стр.132 автор дает хороший литературный обзор условий формирования таких структур, которые связываются с взаимодействием реститовых минералов, в частности кордиерита, с поздними порциями расплава или флюида, обогащенными H_2O и К, в результате чего происходит описанная реакция замещения, но сам автор отказывается от этой идеи, приводя следующие аргументы: (1) поздний силлиманит замещает только кордиерит и никакие другие минералы, (2) на построенной фазовой диаграмме поле стабильности силлиманита расположено в области более высоких давлений по сравнению с полем устойчивости кордиерита.

Не могу полностью согласиться с автором, поскольку (1) замещение именно кордиерита может происходить, поскольку это минерал наиболее обогащен алюминием из всех присутствующих породообразующих минералов. (2) появление ассоциации Bt+Sil происходит только на контакте с кордиеритом, что указывает на то, что реакция происходит в локальном объеме породы, а не в равновесии со всеми минералами породы, замещение происходит в условиях локального равновесия флюида (или расплава) и кордиерита, т.е. полученная в результате реакции ассоциация силлиманита и биотита не может рассматриваться в качестве равновесной со всей породой в целом и, следовательно, не может моделироваться валовым составом всей породы. Для того, чтобы смоделировать РТ-поле устойчивости этой ассоциации, нужно провести моделирование по валовому составу только этого локального равновесного объема (если это возможно). Тогда может оказаться, что это поле расположено не выше поля устойчивости кордиерита, как это предполагает автор, а при тех же или меньших давлениях. Таким образом, считаю предположение о повышении давления на регрессивной стадии считаю недоказанным.

стр. 132. Предполагается протекание реакции $Grt + 2Sil = Sp + Crd$ (12). Эта реакция очень характерна для регрессивной стадии метаморфизма с субизобарическим снижением

давления и происходит совсем не обязательно при УХТ условиях. Обычно при этом возникают каймы кордиерита вокруг граната и шпинель-кордиеритовые каймы вокруг резорбированных зерен силлиманита. При этом шпинель возникает внутри зерен кордиерита и не находится в равновесии с кварцем. Какие свидетельства протекания этой реакции в изучаемых породах? Представленные фотографии ее не доказывают.

В то же время, в работе не интерпретируются некоторые реакционные структуры, обнаруженные в ряде образцов, в частности, каймы силлиманита вокруг шпинели, граната вокруг шпинели (обр. 75).

В качестве пожелания к дальнейшему развитию работы хочется предложить автору провести датирование ультравысокотемпературного метаморфизма этого региона для понимания его положения среди других высокотемпературных комплексов Антарктиды.

8. Заключение по диссертации

Диссертация представляет собой законченное исследование, посвященное изучению условий метаморфизма ультравысокотемпературных пород оазиса Бангера (Антарктида). Основой работы является оценка РТ-параметров метаморфизма, реконструкция РТ-трендов и изучение минералогических особенностей кварц-шпинелевых сростаний, обнаруженных в породах. Считаю, что работа выполнена на высоком научном уровне и несет большой вклад как в изучение региона, так и в понимание процессов гранулитового и ультравысокотемпературного метаморфизма в целом. В работе используются практически все современные методы и подходы к исследованию метаморфических пород. Все три защищаемых положения логически обоснованы и подтверждаются обширным фактическим материалом. В работе приведены литературные обзоры практически по всем существенным вопросам, что указывает на глубокое понимание автором проблематики. Работа прошла апробацию на всероссийских и международных конференциях.

Диссертация «Эволюция минерального состава и условия формирования гранулитов оазиса Бангера, Восточная Антарктида», представленная на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.4 – «Минералогия, кристаллография. 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 императрицы Екатерины II», утвержденного приказом ректора Санкт-Петербургского горного университета Екатерины II от 20.05.2021 № 953 адм, а ее автор Абдрахманов Ильнур Альбертович заслуживает присуждения ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности

«Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых».

Официальный оппонент
Старший научный сотрудник,
и.о. зав. лаб. Прогнозно-металлогенических исследований
Института геологии и минералогии СО РАН
к.г.-м.н.



Сухоруков Василий Петрович
(полностью)

Подпись ФИО оппонента заверяю

зам. директора ИГМ С О РАН
д.г.-м.н.



С.В. Хромых

Сведения об официальном оппоненте:

Полное наименование организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук

Почтовый адрес:

Российская Федерация, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3
Почтовый адрес: индекс, субъект РФ, город, улица, дом

Официальный сайт в сети Интернет: igm.nsc.ru

эл. почта: director@igm.nsc.ru телефон: (383) 333-26-00, (383) 373-03-28