

На правах рукописи

Абдрахманов Ильнур Альбертович



**ЭВОЛЮЦИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА И
УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ГРАНУЛИТОВ
ОАЗИСА БАНГЕРА, ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА**

*Специальность 1.6.4. Минералогия, кристаллография.
Геохимия, геохимические методы поисков полезных
ископаемых*

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

Санкт-Петербург – 2025

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

Научный руководитель:

доктор геолого-минералогических наук, доцент

Гульбин Юрий Леонидович

Официальные оппоненты:

Козловский Василий Михайлович

доктор геолого-минералогических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, лаборатория метаморфизма и метасоматизма, заведующий лабораторией;

Сухоруков Василий Петрович,

кандидат геолого-минералогических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория прогнозно-металлогенических исследований, старший научный сотрудник, и.о. заведующего лабораторией.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и геохронологии докембрия Российской академии наук, г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится **14 ноября 2025 г. в 15:00** на заседании диссертационного совета ГУ.3 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171а**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 12 сентября 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ВАСИЛЬЕВ
Евгений Алексеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Среди метаморфических пород древних кратонов важную роль играют гранулиты. Интерес к их изучению особенно усилился после того, как для ряда гранулитовых комплексов были установлены экстремально высокие ($> 900\text{ }^{\circ}\text{C}$) температуры метаморфизма. Итогом многолетних исследований стало представление о метаморфизме сверхвысоких (ultrahigh-temperature, УНТ) температур как закономерном этапе эволюции докембрийских складчатых поясов (Clark et al., 2011; Kelsey, Hand, 2015).

Основная проблема, 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.

Восточная Антарктида является регионом, где, в сравнении с другими областями, известно наибольшее число проявлений УНТ метаморфизма. Они расположены в пределах Земли Эндерби и прилегающих 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).

Степень разработанности темы исследования

Геологическое строение территории изучалось советскими и австралийскими геологами (Равич М.Г., Климов Л.В., Соловьев Д.С., 1965; Stüwe, Wilson, 1990; Sheraton et al., 1995; в том числе сотрудником Горного университета – Вороновым П.С.). В результате проведенных исследований была дана комплексная характеристика развитого здесь мезопротерозойского метаморфического комплекса и получены первые свидетельства высоких и сверхвысоких температур метаморфизма (Stüwe, Powell, 1989; Tucker, Hand, 2016; Tucker et al., 2018). Эти свидетельства создали предпосылки для отнесения рассматриваемого комплекса к проявлениям УНТ метаморфизма. Новые данные по минералогии метапелитовых гранулитов

оазиса Бангера, приводимые в работе, позволяют развить и более надежно обосновать это предположение.

Объект исследования – породы и минералы метаморфического комплекса оазиса Бангера, Восточная Антарктида. Каменный материал был отобран автором в ходе 64-ой Российской антарктической экспедиции (2018/19 гг.).

Предмет исследования – минералого-геохимические особенности гранулитов.

Цель работы. Выявление закономерностей эволюции состава гранулитов и слагающих их минералов, оценка P – T условий минеральных равновесий в ходе метаморфизма.

Задачи исследований:

- 1) проведение полевых работ и отбор каменного материала;
- 2) минералого-геохимическое изучение представительных образцов метапелитовых гранулитов;
- 3) оценка пиковых условий метаморфизма с помощью минеральных термобарометров;
- 4) анализ валового химического состава пород, расчет изохимических диаграмм и построение P – T траекторий;
- 5) геодинамическая интерпретация полученных данных.

Научная новизна работы

1. На основе данных минеральной термобарометрии доказана УНТ природа метаморфизма гранулитов оазиса Бангера.

2. Впервые в метапелитовых гранулитах обнаружены «пламенеvidные» выделения ульвошпинели, находящиеся в закономерных сростаниях с ильменитом, с содержанием U_{sp} минала до 67–78 мол.%. Показано, что после распада твердого раствора Ti - Mag_{ss} температура равновесия двух минералов превышала 1000 °C.

3. Впервые выявлены ориентированные микровключения герцинита в кварце. 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.

Соответствие паспорту специальности

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 1.6.4 Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых по пунктам 1, 2, 3, 13, 18, 19.

Теоретическая и практическая значимость работы

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».

Получен акт о внедрении результатов диссертации при написании разделов отчета в виде оценки параметров метаморфизма на оазисе Бангера в ФГБУ «ВНИИОкеангеология» от 03 июня 2024 г.

Методология и методы исследований

Методологической основой исследования стало комплексное применение минералого-петрографических и минералогеохимических методов (микроструктурных исследований пород, локального анализа минерального вещества, методов минеральной термобарометрии и физико-химического моделирования минеральных парагенезисов).

Изученная каменная коллекция включает более 150 образцов, детально исследованы 24 образца метаморфических пород (гранулитов). Минеральный состав пород изучался в петрографических шлифах на оптических поляризационных микроскопах Leica, для оценки содержаний минералов использовался планиметрический метод. Валовый химический состав пород определялся полным силикатным анализом (ВНИИОкеангеология, аналитики Н.Л. Лунёва, Л.В. Тесанова, Н.Е. Трофимова). Состав минералов (1300 точек наблюдений) анализировался с помощью сканирующего электрон-

ного микроскопа JSM-6460LV с системой энергодисперсионного микроанализа Oxford INCA Energy (Горный университет, аналитик И.М. Гембицкая), а также с помощью электронного микроскопа JSM-6510LA с энергодисперсионным спектрометром JED-2200 (JEOL) (ИГГД РАН, аналитик О.Л. Галанкина). Для идентификации минералов дополнительно использовался рамановский спектрометр/микроскоп Renishaw InVia (Горный университет, аналитик Е.А. Васильев). Микроэлементный состав минералов (кварца, граната, ортопироксена; 6 образцов, 32 точки анализа) осуществлялся методом вторично-ионной масс-спектрометрии (SIMS) с помощью ионного зонда Cameca IMS-4F в Ярославском филиале ФТИАН РАН (аналитики С.Г. Симакин и Е.В. Потапов). Для построения P - T траекторий метаморфизма применялся метод изохимических диаграмм (псевдосечений). Моделирование минеральных парагенезисов выполнялось с помощью программы Theriak/Domino версия 01.08.09 (de Capitani, Petrakakis, 2010) на базе внутренне согласованных термодинамических данных tcdb55c2d (Holland, Powell, 1998, с обновлениями) и ряда моделей активностей компонентов твердых минеральных растворов. Входными данными служили валовые химические анализы горных пород. С учетом относительной «сухости» гранулитового метаморфизма, при построении изохимических диаграмм задавалась пониженная активность воды в системе ($a_{H_2O} < 1$).

В работе использованы обозначения минералов по (Kretz, 1983).

На защиту выносятся следующие положения:

1. Парагенезис низкоцинкистого герцинита с кварцем и показания минеральных геотермометров («Al-в-ортопироксене», «Ti-в-кварце», тройного полевошпатового, титаномагнетит-ильменитового) свидетельствуют об образовании гранулитов оазиса Бангера в условиях метаморфизма сверхвысоких (> 900 °C) температур.

2. Кварц из метапелитовых гранулитов содержит закономерно-ориентированные включения рутила и герцинита, генезис которых связан с распадом высокотемпературного (около 1000 °C) твердого раствора и пластическими деформациями кварца на ретроградной стадии.

3. Анализ минеральных равновесий гранулитов показывает, что их P - T эволюция описывается траекторией, демонстрирующей: на

проградной стадии изобарический (6–7 кбар) нагрев до 940–1030 °С, на ретроградной стадии – изобарическое (5–6 кбар) охлаждение до 750 °С.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена представительностью каменного материала, использованием современных методов локального анализа минерального вещества, выполненного в аккредитованных лабораториях, комплексным подходом к обработке аналитических данных.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: XIII International Symposium on Antarctic Earth Sciences, Korea Polar Research Institute (Incheon, Republic of Korea, 2019); VI Российской конференции по проблемам геологии и геодинамики докембрия (СПб, 2019); X Всероссийской школе молодых ученых «Экспериментальная минералогия, петрология и геохимия» (Черноголовка, 2019); Вузовская научная конференция студентов и молодых ученых «Полезные ископаемые России и их освоение» (СПб, 2020); VII Молодежной конференции «Новое в геологии и геофизике Арктики, Антарктики и Мирового океана» (СПб, 2021); XIII Съезде Российского минералогического общества и Федоровская сессия (СПб, 2021); Научной конференции «Геология и геодинамика архея и протерозоя: сходства и различия с фанерозоем» (Петрозаводск, 2022); Годичном собрании РМО и Федоровской сессии (СПб, 2023); XI Open Science Conference during Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR, Pucon, Chile, 2024); V Международной научно-практической конференции «Природная среда Антарктики» (Республика Беларусь, Беловежская пуща, 2024).

Личный вклад автора заключается в постановке и реализации задач исследования, обосновании научных положений; проведении полевых исследований и отборе каменного материала, микроскопическом изучении пород, обработке аналитических данных, расчете параметров минералообразования, построении изохимических диаграмм и их интерпретации.

Публикации. 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.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 6 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 260 наименований, и 4 приложений. Диссертация изложена на 193 страницах машинописного текста, содержит 73 рисунка и 6 таблиц.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность научному руководителю проф. Ю.Л. Гульбину за огромный вклад в формирование личности автора. Особую благодарность автор выражает заместителю генерального директора, заведующего отделом геологии и минеральных ресурсов Антарктики «ВНИИОкеангеология» Г.Л. Лейченкову, сотрудникам «Арктического и антарктического научно-исследовательского института» А.С. Макарову, А.В. Клепикову, М.В. Бугаеву и А.С. Курило, а также сотрудникам «Полярной морской геологоразведочной экспедиции» Д.М. Воробьеву и Р.С. Борзенкову за предоставленную возможность работать в составе 64 РАЭ в регионе исследования. Значительную помощь в проведении лабораторных исследований и обработке результатов оказали Е.А. Васильев, И.М. Гембицкая (Горный университет), Е.В. Михальский, В.А. Маслов, Н.В. Боровков, Н.Л. Лунёва, Л.В. Тесанова и Н.Е. Трофимова (ВНИИОкеангеология), С.Г. Скублов, О.Л. Галанкина (ИГГД РАН). Всем им автор выражает искреннюю благодарность. Автор признателен всему коллективу кафедры минералогии, кристаллографии и петрографии Горного университета за полученные знания и особенно Ю.Б. Марину за консультации и напутствия в процессе работы.

Исследование поддержано грантом КНВШ в соответствии с постановлением Правительства Санкт-Петербурга от 25.06.2010 № 823 в 2020 г.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, определены цель, задачи и научная новизна диссертации, раскрыты теоретическая и практическая значимость исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту. **В первой главе** охарактеризовано состояние проблемы, рассмотрены современные представления о гранулитах. **Во второй главе** отмечены главные черты геологического строения Восточной Антарктиды и оазиса Бангера. **В третьей главе** охарактеризованы методы исследования, использованные в работе. **В четвертой главе** описаны особенности минерального и химического состава изученных пород и состава слагающих их минералов. **В пятой главе** приведены данные о составе Fe-Mg-Al-Ti-Zn оксидов в гранулитах и изучены ориентированные микровключения рутила и герцинита в кварце. **В шестой главе** основное внимание уделено результатам минеральной термобарометрии и физико-химического моделирования минеральных парагенезисов, рассмотрены построенные P - T траектории, дана геодинамическая интерпретация полученных данных. **В заключении** даны главные выводы работы.

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

1. Парагенезис низкоцинкистого герцинита с кварцем и показания минеральных геотермометров («Al-в-ортопироксене», «Ti-в-кварце», тройного полевошпатового, титаномagnetит-ильменитового) свидетельствуют об образовании гранулитов оазиса Бангера в условиях метаморфизма сверхвысоких (> 900 °C) температур.

Парагенезис Fe-Mg алюмошпинелей с кварцем в метапелитовых гранулитах играет роль минерального индикатора УНТ метаморфизма при условии, что алюмошпинели обеднены примесями Zn, Cr и Fe^{3+} (Harley, 2008; Kelsey, 2008). В изученных породах алюмошпинели (преимущественно герцинит) делятся на две группы: (1) с низким (ZnO 1.3–3.1 мас.%) и (2) высоким (ZnO 7–20 мас.%) содержанием примеси. Герцинит, обедненный цинком, доминирует в ряде образцов, где он образует включения в гранате, силлиманите и кордиерите, а также встречается в матриксе. Содержание Cr_2O_3 в нем варьирует в пределах 0.2–1.7 мас.%, содержание Fe^{3+} не превы-

шает 0.09 коэффициента в формуле (к.ф.). Наблюдаются сростания низкоцинкистого герцинита с кварцем.

Гранат-ортопироксеновый термобарометр, основанный на растворимости Al в ортопироксене, сосуществующем с гранатом, широко используется для оценки пиковых температур УНТ метаморфизма (Harley, 1985; Brandt et al., 2003; Santosh et al., 2007; Sukhorukov et al., 2018, 2021). В гранулитах оазиса Бангера оба минерала входят в состав Grt–Orx–Crd ($\pm$ Sil) парагенезиса; при этом ортопироксен (энстатит) отличается повышенным содержанием Al_2O_3 , которое в изученных образцах достигает 8.2–9.2 мас.%. Пиковые температуры Grt–Orx равновесия, оцененные с помощью «Al-в-ортопироксене» геотермометра (Harley, Green, 1982) составляют (при 5–7 кбар): 955 °C (обр. 15, X_{Al}^{M1} 0.17 к.ф.), 930 °C (обр. 61, X_{Al}^{M1} 0.18 к.ф.), 970 °C (обр. 63, X_{Al}^{M1} 0.19 к.ф.). Сходные или меньшие температуры дает Grt–Orx Fe–Mg термометр (Lee, Ganguly, 1988).

На диаграмме X_{Al}^{M1} – X_{En} (рисунок 2) точки составов изученного ортопироксена (X_{En} 0.56–0.65) с наиболее высоким содержанием алюминия ($X_{\text{Al}}^{M1} > 0.15$) располагаются в области >900 °C, 6–8 кбар. Согласно расчетам, при этих условиях Орх равновесен с Grt, содержащим до 46–49 мол.% пиропового минала. Наблюдаемый гранат менее магнезиальный ($X_{\text{Mg}} \leq 0.40$), что может быть связано с выносом магния на стадии ретроградного охлаждения.

Еще один подход к оценке условий гранулитового метаморфизма состоит в использовании сольвусного полевошпатового геотермометра. Особый интерес в данной связи представляет образец Grt–Orx–Crd гранулита (обр. 63), в котором сосуществуют мезопертит и плагиоклаз с антипертитовыми вростками. При этом состав матрикса мезопертита ($\text{Ort}_{0.86-0.87}\text{Ab}_{0.14-0.13}$) близок к составу ламелей в антипертитовом плагиоклазе ($\text{Ort}_{0.85}\text{Ab}_{0.15}$), а состав матрикса антипертитового плагиоклаза ($\text{Ab}_{0.78}\text{An}_{0.22}$) – к составу ламелей в мезопертите ($\text{Ab}_{0.78-0.77}\text{An}_{0.20-0.22}\text{Ort}_{0.02-0.01}$). Реинтегрированные составы полевых шпатов, рассчитанные методом (Hokada, 2001): мезопертит – $\text{Ort}_{0.62}\text{Ab}_{0.32}\text{An}_{0.06}$, антипертит – $\text{Ab}_{0.64}\text{An}_{0.17}\text{Ort}_{0.19}$. На тройной диаграмме Ab–An–Ort с кривыми сольвуса эти составы дают температуры, превышающие 900 °C (рисунок 3).

Возможности «Ti-в-кварце» геотермометрии гранулитов являются предметом дискуссии (Sato, Santosh, 2007; Ewing et al., 2013; Kelsey, Hand, 2015). В случае гранулитов оазиса Бангера пиковые температуры, рассчитанные с помощью «Ti-в-кварце» геотермометра варьируют в диапазоне 720–810 °C при использовании калибровочного уравнения (Thomas et al., 2010) и 910–1010 °C при использовании калибровочного уравнения (Huang, Audétat, 2012) (при 6–7 кбар для содержаний Ti в кварце 165–280 ppm). Большой разброс полученных оценок объясняется тем, что экспериментальные зависимости у двух групп исследователей существенно различаются. При этом температуры, рассчитанные по уравнению (Huang, Audétat, 2012), лучше согласуются с данными термобарометрии по другим минералам и результатами моделирования фазовых равновесий.

Исключительно высокие температуры метаморфизма стали причиной появления в Grt-Орх-Crd гранулитах закономерных сростаний пламенивидных выделений титансодержащего магнетита (Usp_{38-46}) и ульвошпинели (Usp_{55-78}) с ильменитом, обогащенным гематитовым миналом (X_{Hem} до 0.24), корундом и рутилом (рисунок 4). Оксидные минералы, участвующие в подобных сростаниях, являются продуктами распада высокотемпературного твердого раствора Mag_{ss} , состав которых меняется в зависимости от температуры и парциального давления кислорода. Для сосуществующих ильменита и ульвошпинели в изученных гранулитах пиковые температуры минеральных равновесий, рассчитанные с помощью Ti-Mag-Ilm термо-оксибарометра (Andersen, Lindsley, 1985; Sauerzapf et al., 2008), превышают 1000 °C.

2. Кварц из метапелитовых гранулитов содержит закономерно-ориентированные включения рутила и герцинита, генезис которых связан с распадом высокотемпературного (около 1000 °C) твердого раствора и пластическими деформациями кварца на ретроградной стадии.

В изученных породах были встречены зерна кварца, содержащие закономерно ориентированные игловидные микровключения. Для выяснения их природы детально исследовался образец Grt-Crd гранулита (обр. 75). Кварц в нем образует зерна размером 1–4 мм с

признаками пластических деформаций. Гранат и кордиерит слагают агрегаты мелких (0.2–0.4 мм) полигональных зерен, к интерстициям которых приурочены выделения рудных минералов. В сростании с кварцем и кордиеритом наблюдаются зерна низкоцинкистого герцинита состава $(\text{Fe}^{2+}_{0.61}\text{Mg}_{0.34}\text{Zn}_{0.03}\text{Fe}^{3+}_{0.02})_{\Sigma 1.00}(\text{Al}_{1.90}\text{Fe}^{2+}_{0.04}\text{Fe}^{3+}_{0.02}\text{Cr}_{0.02}\text{Si}_{0.02})_{\Sigma 2.00}\text{O}_4$ ($n = 10$).

Микровключения толщиной от 200 до многих сотен нм, длиной от 2–6 до 20–30 мкм ориентированы вдоль главной кристаллографической оси кварцевых зерен и равномерно распределены в их объеме (рисунок 5). На детальных микрофотографиях видно, что микровключения обладают неоднородным внутренним строением, которое выражено в появлении ламелей более светлого оттенка (рисунок 6). По данным электронно-зондового анализа, главными элементами, входящими в состав микровключений, выступают Al, Fe, Mg и Ti. Изредка к ним присоединяется Zn. Линейное сканирование на РЭМ JSM-7001F показало, что в пределах микровключений пики содержаний Al, Mg и Fe с одной стороны и Ti – с другой не совпадают (рисунок 7). Это свидетельствует о возможном присутствии в составе микровключений самостоятельных фаз, обогащенных этими элементами. По данным рамановской спектроскопии одной из таких фаз выступает рутил. Второй фазой, предположительно, является минерал группы шпинели. После исключения Si и Ti, результаты химического анализа микровключений хорошо пересчитываются на кристаллохимическую формулу герцинита $(\text{Fe}^{2+}_{0.59}\text{Mg}_{0.38}\text{Fe}^{3+}_{0.03})_{\Sigma 1.00}(\text{Al}_{1.95}\text{Fe}^{2+}_{0.025}\text{Fe}^{3+}_{0.025})_{\Sigma 2.00}\text{O}_4$ ($n = 10$). На тройной диаграмме состава Fe–Mg–Zn герцинит из включений попадает в ту же область, что и герцинит из матрикса гранулита.

Ранее микровключения алюмошпинелей в кварце наблюдались в гранат-кианитовых гнейсах из высокобарического комплекса Алтын Таг, Западный Китай (Liu et al., 2007). Они имели стержневидную форму, размер $1\text{--}2 \times 10\text{--}50$ мкм и ассоциировали с близкими по размеру иглами кианита и рутила. Предпочтительная ориентировка микровключений совпадала с направлением [0001] в кварце. Точный состав микровключений не определялся, они диагностировались методом дифракции отраженных электронов (EBSD). Их генезис исследователи связали с распадом твердого раствора тетраго-

нальной полиморфной модификации SiO_2 – стишовита; минеральные зерна, содержащие микровключения, были проинтерпретированы как параморфозы кварца по стишовиту (Liu et al., 2007). В отличие от алюмошпинелей, микровключения рутила в кварце из пород высоких ступеней метаморфизма более распространены; наличие вокруг них ореолов выноса Ti позволяет интерпретировать эти микровключения как продукты распада твердого раствора кварца (Cherniak et al., 2007).

По данным ионно-зондового анализа, в образце изученного гранулита из оазиса Бангера зерна кварца, содержащие микровключения рутила и герцинита, характеризуются повышенными валовыми содержаниями элементов-примесей (ppm, $n = 3$): Al 125–173, Fe 439–1257, Ti 264–280. Микровключения ориентированы вдоль оси c , что предполагает эксклюзионный механизм их образования. Для лучшего понимания особенностей этого механизма следует учесть, что пластически-деформированный кварц характеризуется наличием полос деформаций, развивающихся вдоль плоскостей трансляционного скольжения. Их предпочтительная ориентировка зависит от условий: при повышенной температуре ($> 650^\circ\text{C}$) скольжение происходит преимущественно по призме m (Mainprice et al., 1986; Родыгин, 1994; Stipp et al., 2002). Направления трансляционного скольжения могут рассматриваться как высокопроницаемые зоны с пониженной энергией активации внутрикристаллической диффузии. Связывая генезис изученных микровключений с распадом твердого раствора кварца на ретроградной стадии, можно предположить, что эти зоны осуществляли своего рода «дренаж» растворенных в кварце структурных примесей (Al, Fe, Ti). Вхождение Mg и, частично, Fe в состав микровключений могло быть связано со «сквозной» диффузией атомов вдоль ослабленных зон или с просачиванием флюидов, обогащенных Mg, по микротрещинам, приуроченных к этим зонам. Последний механизм, предусматривающий важную роль флюидов в образовании ориентированных микровключений, в том числе благодаря явлению гидроразрыва (fluid-induced fracturing), в последние годы активно обсуждается в литературе (Putnis, Austrheim, 2013).

3. Анализ минеральных равновесий гранулитов показывает, что их P – T эволюция описывается траекторией, демонстри-

рующей: на проградной стадии изобарический (6–7 кбар) нагрев до 940–1030 °С, на ретроградной стадии – изобарическое (5–6 кбар) охлаждение до 750 °С.

По особенностям химического состава большинство изученных гранулитов отвечает умеренно-глиноземистым метапелитам. На диаграмме А.А. Предовского (1980) они попадают в поля пелитов [Grt–Sil ($\pm$ Crd)] и Grt–Crd гранулиты с повышенными значениями частной глиноземистости $A = \text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ и обломочных пород (граувакк, субграувакк и аркозов) [Grt–Opx ($\pm$ Crd)] гранулиты с повышенными значениями фемичности $F = (\text{MgO} + \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)/\text{SiO}_2$. Для реконструкции P – T траекторий в наиболее представительных образцах этих пород были исследованы парагенезисы микровключений в гранате (предпиковая ассоциация) и минералов матрикса (пиковая и постпиковые ассоциации). Полученные данные учитывались при интерпретации построенных изохимических диаграмм.

Примером Grt–Sill–Crd гранулитов служит обр. 2а. Порода характеризуется полосчатой текстурой, обусловленной чередованием линзовидных кварц-полевошпатовых прослоев с прослоями, сложенными кордиеритом, гранатом, силлиманитом, биотитом и рудными минералами. Силлиманит представлен тремя генерациями: (1) включениями фибrolита в гранате, (2) призматическими кристаллами в матриксе, (3) мелкими игольчатыми кристаллами, которые развиваются по границам зерен кордиерита и замещают этот минерал. Изохимическая диаграмма для этого образца построена в системе MnNCKFMASHT ($\text{MnO}-\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{K}_2\text{O}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{TiO}_2$) (рисунок 8). Предполагаемый пиковый парагенезис: Grt–Crd–Sp–Ksp–Ilm–Qz, стабильный при давлении 5.6–6.6 кбар, температуре >940 °С и очень низкой активности воды. Через поле устойчивости этого парагенезиса проходят изоплеты пиропового минала в гранате, соответствующие наблюдаемым значениям ($X_{\text{Mg}}^{\text{Grt}}$ 0.29–0.31). Сказанное относится к модельному парагенезису с Fe–Mg шпинелью. Поскольку наблюдаемый герцинит содержит примеси Zn и Cr, поле устойчивости Sp-содержащей ассоциации может расширяться в сторону более низких температур (Nichols et al., 1992).

Согласно данным моделирования, гранат в изученной породе начал кристаллизоваться при ~7 кбар и ~730 °C в поле устойчивости рутил- и биотит-содержащих парагенезисов при повышенной активности воды. На это указывает наличие включений рутила и биотита в гранате. Температура их кристаллизации оценена с помощью «Ti-в-биотите» геотермометра (Henry et al., 2005). На проградной стадии имел место изобарический нагрев в области устойчивости силлиманита и кордиерита. Повышение температуры привело к частичному плавлению пород толщи, растворению воды в расплаве и снижению ее активности. За пиком температуры последовало изобарическое охлаждение в области устойчивости кордиерита. Появление поздних генераций Sil и Bt, замещающих кордиерит, в сочетании с данными «Ti-в-биотите» геотермометрии и результатами моделирования указывает на рост давления на заключительной стадии (~750 °C).

Обр. 75 и 78 характеризуют состав Grt-Crd гнейсов. Поскольку эти породы содержат магнетит, для термодинамического моделирования была использована система MnNCKFMASHTO (+O₂). Согласно расчетам, пиковая ассоциация Grt-Crd-Sp-Ksp-Pl-Ilm-Qz, характерная для этих пород, стабилизировалась при давлении 6–7 кбар и температуре >950 °C (рисунки 9 - 10). Результаты моделирования согласуются с показаниями «Ti-в-кварце» геотермометра. Наличие включений Sil и Bt в гранате (обр. 75) позволяет связать ранние стадии образования гнейсов с полем устойчивости Grt-Sil-Bt-Pl-Ilm парагенезиса. Геотермометрия биотитовых включений дает температуру ~760 °C для этого фрагмента проградной *P-T* траектории. В условиях высокой активности воды изобарический нагрев стал причиной смены Sil-содержащих ассоциаций на Crd-содержащие. Частичное плавление пород толщи и падение активности воды способствовало появлению в составе парагенезиса шпинели. После достижения температурного пика имело место изобарическое охлаждение при 5–5.5 кбар. На заключительных стадиях вновь стабилизировался силлиманит; с учетом данных моделирования, его появление можно считать индикатором возрастающего давления.

Обр. 15 и 63 выступают примерами Grt-Crd-Орх гранулитов. Для обоих образцов построены изохимические диаграммы в системе

MnNCKFMASHTO с изоплетами $X_{\text{Mg}}^{\text{Grt}}$ (0.36–0.40) и $X_{\text{Al}}^{\text{Opx}(M1)}$ (0.18–0.20), дополненные результатами минеральной термобарометрии (рисунок 11). Как видно на диаграммах, изоплеты, отвечающие наблюдаемым составам граната и ортопироксена, пересекаются в поле устойчивости Grt–Crd–Opx–Pl–Kfs–Ilm парагенезиса при 5–6 кбар, 920–970 °С. Эти давления и температуры хорошо согласуются с показаниями Grt–Opx термобарометра и «Ti-в-кварце» геотермометра. P – T траектория начинается в поле стабильности силлиманита и биотита при 6–6.5 кбар, ~800 °С, на что указывают включения этих минералов в гранате. Далее она демонстрирует изобарический нагрев в полях устойчивости Grt–Sil–Opx–Pl–Kfs–Ilm и Grt–Crd–Opx–Pl–Kfs–Ilm парагенезисов. В результате нагрева породы гранулитовой толщи испытали частичное плавление, что стало причиной снижения активности воды в системе. На ретроградной стадии происходило изобарическое охлаждение пород при 5–5.5 кбар с последующим небольшим увеличением давления (до 6 кбар). Благодаря компрессии на поздних стадиях образовался силлиманит, который совместно с Qz–Bt симплектитамы замещал минералы ранней (пиковой) ассоциации.

Выполненные исследования показывают, что большинство минералов, изученных гранулитов (включая биотит, рутил, гранат, кордиерит и др.) входили в предпиковую ассоциацию. В состав этой ассоциации могла входить и ранняя генерация шпинели, образующая включения в гранате, силлиманите и кордиерите. Изобарический нагрев в поле устойчивости Sil+Ilm-содержащих парагенезисов и частичное плавление пород привели к резкому снижению активности воды, что благоприятствовало протеканию реакции $\text{Grt} + 2\text{Sil} = \text{Sp} + \text{Crd}$, в ходе которой гранат и силлиманит частично заместились новообразованными кордиеритом и шпинелью 2-й генерации. На стадии ретроградного охлаждения, которая протекала в поле устойчивости кордиерита, имела место слабая (~0.5 кбар) компрессия, что стало причиной образования поздней генерации силлиманита за счет реакции $3\text{Crd} + 2\text{Kfs} + 2\text{H}_2\text{O} = 6\text{Sil} + 2\text{Bt} + 9\text{Qz}$.

Дополнительные сведения о поведении минералов в ходе проградной и ретроградной стадий метаморфизма дает распределение

редкоземельных элементов между сосуществующими гранатом и ортопироксеном (рисунок 12). По особенностям микроэлементного состава выделяются две разновидности граната. В обр. 15 наблюдается гранат, наиболее обогащенный M-HREE и Hf. Значения коэффициентов распределения D_{HREE} (Opx/Grt) здесь близки к равновесным (0.01–0.03; Harley, Kelly, 2007). В обр. 63 присутствует гранат, относительно обеденный этими примесями. Значения коэффициентов D_{HREE} (0.03–0.09) здесь заметно превышают равновесные. Различия могут быть связаны с тем, первая разновидность граната образовалась раньше, а вторая – позже кристаллизации циркона из расплава, возникшего при пиковых условиях метаморфизма (Tucker et al., 2018). Предполагается, что Grt и Opx в обр. 15 являются относительно ранними и входят в состав предпиковой ассоциации. Их рост происходил в среде, насыщенной M-HREE и Hf, что привело к равновесному распределению элементов между минералами. Grt и Opx в обр. 63 являются более поздними, они росли в среде недосыщенной M-HREE и Hf, что препятствовало достижению равновесия.

Построенные P – T траектории отражают два эпизода метаморфической эволюции гранулитов оазиса Бангера: (1) изобарический нагрев и (2) охлаждение пород в условиях близких к изобарическим. С учетом результатов U-Pb геохронологии циркона и монацита, полученных предшественниками, можно сопоставить эти эпизоды с двумя поздне-мезопротерозойскими тектоно-термальными событиями. Первое имело место в интервале 1220–1180 млн лет, с ним исследователи связывают метаморфизм гранулитовой фации (Tucker et al., 2018). Второе – в интервале 1200–1170 млн лет, в это время произошло внедрение интрузий габброидов и чарнокитовых гранитов (Sheraton et al., 1992; Tucker et al., 2017). Оба события соотносятся с 2-м этапом эволюции складчатого пояса Олбани-Фрейзер, юго-западной оконечностью которого считается оазис Бангера (Clark et al., 2000). Этот этап протекал в условиях растяжения земной коры, о чем свидетельствует ассоциация высоко-градиентного метаморфизма с интрузиями чарнокитоидов как отражение высокого теплового потока и частичного плавления нижних горизонтов утоненной коры под воздействием андерплейтинга (Morrissey et al., 2017). Дополнительным свидетельством рассматриваемой геодинамической обста-

новки в пределах оазиса является широкое развитие пластических деформаций синхронных с пиковой стадией метаморфизма (D_1) и проявленных в виде преобладающей сланцеватости и полосчатости в гранулитах и мигматитах (S_1), а также структур будинажа гранитовых жил и прослоев метабазитов (Stüwe, Powell, 1989; Sheraton et al., 1995). Именно со стадией растяжения связана проградная ветвь P – T траектории, демонстрирующая изобарический нагрев пород средних горизонтов земной коры (20–23 км) в условиях высокого теплового потока вплоть до условий УНТ метаморфизма. Смена деформаций растяжения (D_1) деформациями сжатия (D_2 – D_3 по: Sheraton et al., 1995) стала причиной складчатости метаморфической толщи; исследователи соотносят эти деформации с постпиковой стадией (Stüwe, Powell, 1989). Можно предположить, что ретроградная ветвь P – T траектории отражает позднеорогенное событие, приведшее к утолщению земной коры. Подобный сценарий находит подтверждение в рамках модели тектонической эволюции аккреционных орогенов (Collins, 2002).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие 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 К-Na полевому шпату с повышенным содержанием анортитового минала и Са-Na полевому шпату с повышенным содержанием ортоклазового минала; законо-

мерные сростания ильменита и ульвошпинели, являющиеся продуктами распада высокотемпературного твердого раствора.

2. Еще одним индикатором УНТ метаморфизма служат 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, 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.

Перспективными направлениями дальнейших исследований метаморфического комплекса оазиса Бангера автор считает датирование минералов и пород с помощью современных методов, изучение архейского метаморфизма и корреляцию полученных данных с результатами исследований метаморфических пород других районов

Восточной Антарктиды и сопредельных территорий Австралии и Индии.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. **Абдрахманов, И.А.** Физико-химическое моделирование условий формирования мафического гранулитов (оазис Бангера, Восточная Антарктида) // Вестник геонаук. – 2021. – № 2 (314). – С. 14–18.

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

2. **Абдрахманов, И.А.** Ассоциация Fe–Mg–Al–Ti–Zn оксидов в гранулитах оазиса Бангера, Восточная Антарктида: свидетельства метаморфизма сверхвысоких температур / **И.А. Абдрахманов**, Ю.Л. Гульбин, И.М. Гембицкая // Записки Российского минералогического общества. – 2021. – Т. 150. – № 4. – С. 38–76.

3. Гульбин, Ю.Л. Ориентированные микровключения оксидов системы Al–Fe–Mg–Ti в кварце из метapelитовых гранулитов оазиса Бангера, Восточная Антарктида / Ю.Л. Гульбин, **И.А. Абдрахманов**, И.М. Гембицкая, Е.А. Васильев // Записки Российского минералогического общества. – 2022. – Т. 151. – № 4. – С. 1–17.

4. **Abdrakhmanov, I.A.** Mineralogical constraints on the pressure–temperature evolution of granulites in the Bunge Hills, East Antarctica / **I.A. Abdrakhmanov**, Yu.L. Gulbin, S.G. Skublov, O.L. Galankina // Minerals. – 2024. – V. 14. – № 5. – P. 1–29.

Свидетельство на объект интеллектуальной собственности:

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021613641 РФ. Программа по определению давления формирования породы, по заданному химическому составу минералов, на основе гранат-шпинелевого барометра. Заявка № 2021611974: заявл. 19.02.2021; опубл. 11.03.2021 / **И.А. Абдрахманов**, И.И. Белоглазов; заявитель / правообладатель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет». – 9 с. ил. – Текст: непосредственный.

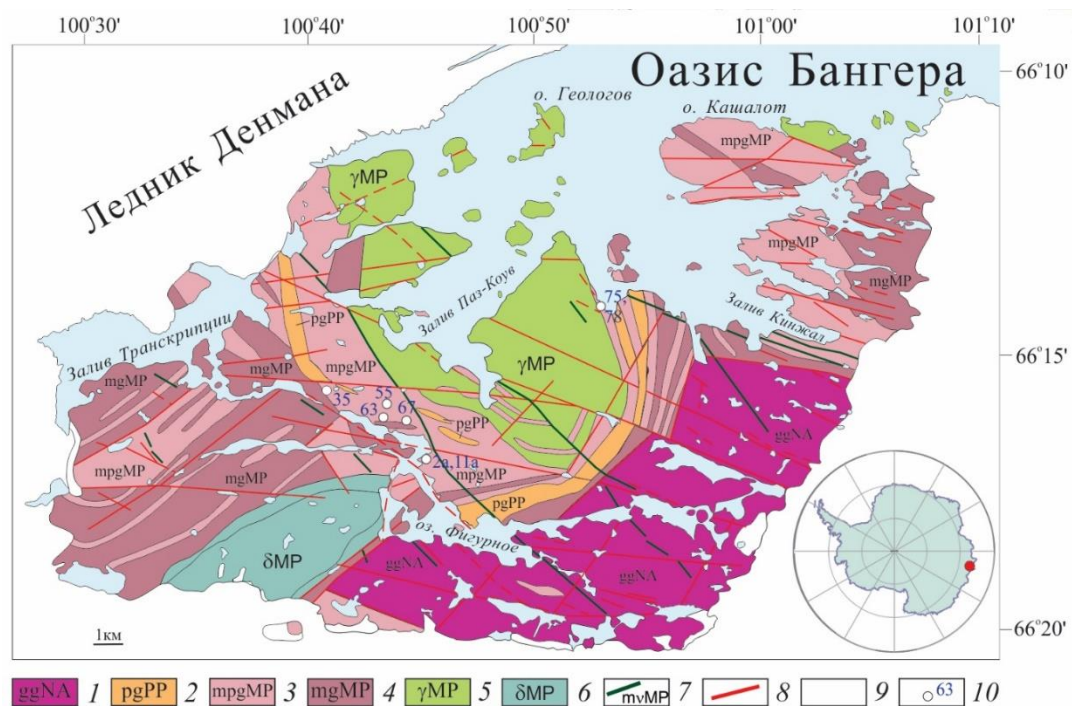


Рисунок 1 – Схематическая геологическая карта оазиса Бангера. По Равичу и др. (1965) и Лейченкоу и др. (2022 ф) с упрощениями. 1–4 – метаморфический комплекс: неoarхейские тоналит-гранитовые ортогнейсы (1), палеопротерозойские тоналит-диоритовые ортогнейсы (2), мезопротерозойские метапелитовые гранулиты: гранат-силлиманит-кордиеритовые и гранат-биотитовые парагнейсы, с гранатовыми кварцитами и мигматитами (3), мезопротерозойские мафические гранулиты: амфибол-биотит-пироксеновые гнейсы, кристаллические сланцы и мигматиты (4); 5–7 – позднемезопротерозойские интрузивные образования: кварцевые габбро и монцогаббро, сиениты и сиенито-диориты (5), кварцевые монцодиориты, кварцевые монцониты и граниты (6), дайки долеритов (7); 8 – тектонические нарушения; 9 – ледниковый покров; 10 – места отбора представительных образцов

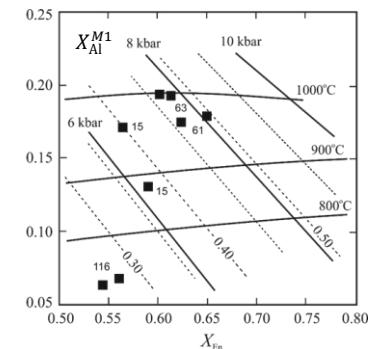


Рисунок 2 – Диаграмма $X_{Al}^{M1}-X_{En}$ (Tateish et al., 2004), построенная на основе экспериментальных данных для системы FMAS в предположении о изобарической ориентации изоплет X_{Mg}^{Grt} (Hensen, Harley, 1990). Числа возле точек состава соответствуют номерам образцов

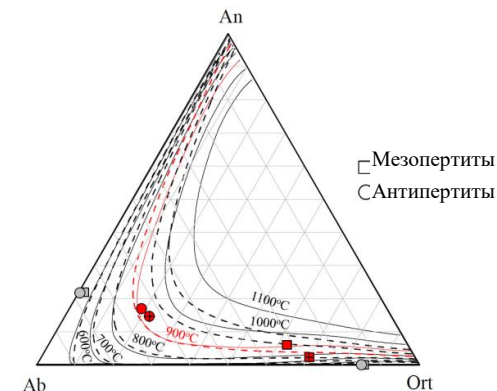


Рисунок 3 – Тройная диаграмма с точками составов полевых шпатов из обр. 63 (серое – составы продуктов распада твердых растворов полевых шпатов, красное – реинтегрированные составы полевых шпатов, определенные методом (Hokada, 2001), красное с крестом – измеренные методом площадного сканирования) и кривыми сольвуса рассчитанными для 600–1100 °C при 6 кбар с помощью программы WinFeldth (Yavuz, Yavuz, 2022) с использованием моделей (Fuhrman, Lindsey, 1988; сплошные линии) и (Elkins, Grove, 1990; пунктирные линии)

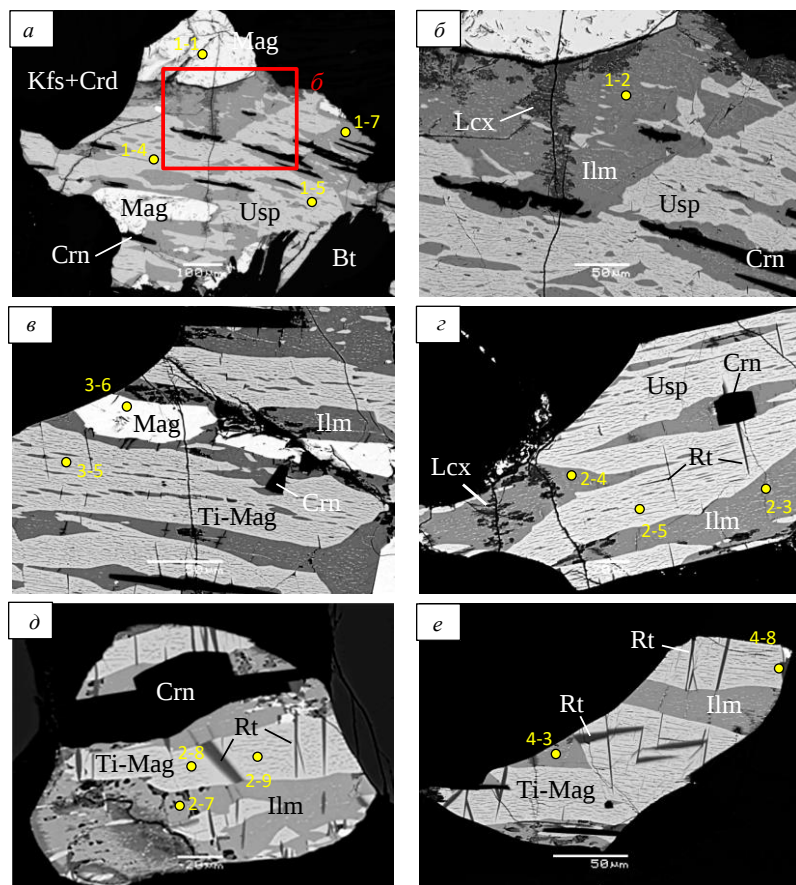


Рисунок 4 – Срастания ильменита с титансодержащим магнетитом и ульвошпинелью. Обр. 63. Изображения в обратно отраженных электронах. *a* – ильменит с вростками ульвошпинели и ламелями корунда; *б* – увеличенный фрагмент изображения *a*; *в* – ильменит с вростками титансодержащего магнетита и ламелями корунда; *г* – ильменит с вростками ульвошпинели и титансодержащего магнетита, внутри которых располагаются ламели рутила

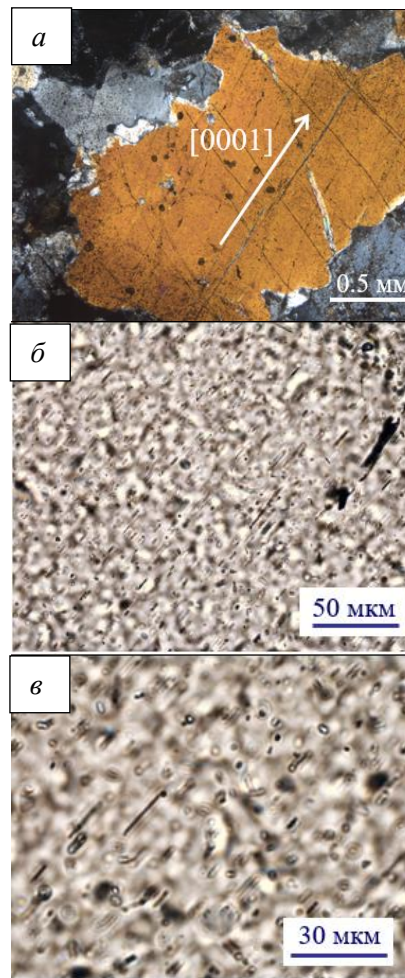


Рисунок 5 – Ориентированные игловидные включения в кварце (обр. 75). *a* – зерно кварца под анализатором; *б*, *в* – изображения в проходящем свете

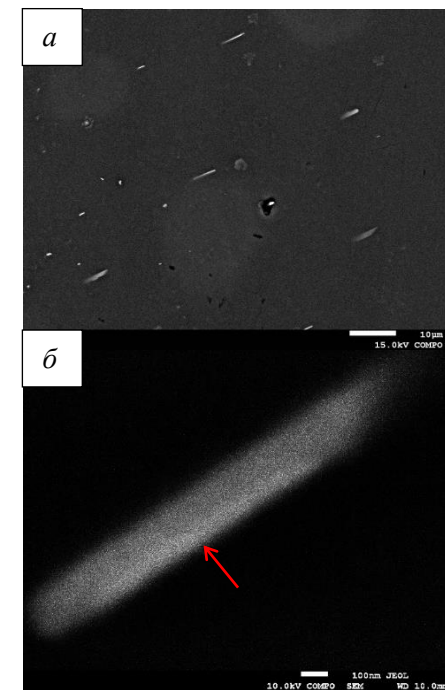


Рисунок 6 – Игловидные микровключения рутила и герцинита в кварце (обр. 75). *a* – видимая плотность включений с масштабной линейкой 10 мкм; *б* – отдельное включение при большом увеличении. Красной стрелкой показана область неоднородности в составе включений (более светлые ламели). Изображения в обратно отраженных электронах

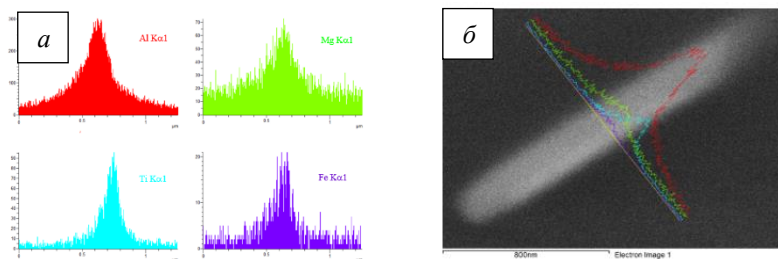


Рисунок 7 – Микрозондовые профили Al, Mg, Ti и Fe через включения в кварце (а). Гладкая форма профилей является артефактом, возникающим из-за того, что электронный зонд, диаметр которого превышает размер включения, захватывает кварцевую матрицу. Изображение в отраженных электронах, режим высокого контраста COMPO (б)

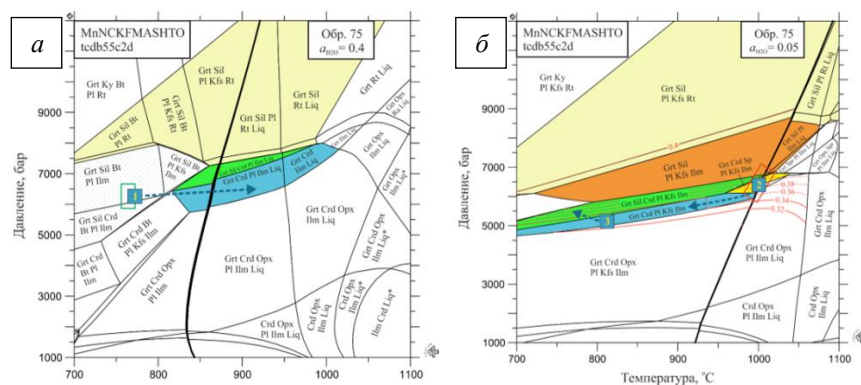


Рисунок 9 – Изохимические фазовые P - T диаграммы для гранат-кордиеритовых гранулитов (обр. 75). а – при активности воды 0.4; б – при активности воды 0.05. Здесь и далее все минеральные парагенезисы содержат кварц и магнетит, за исключением отмеченных звездочкой, которые не содержат кварца. Условные обозначения – см. рисунок 8

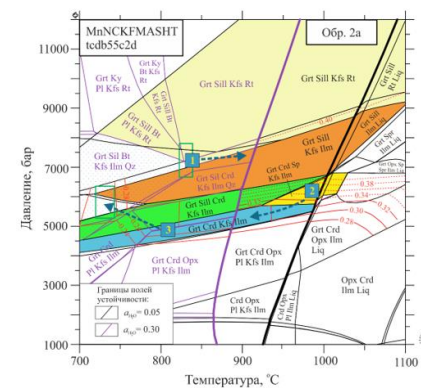


Рисунок 8 – Изохимическая P - T диаграмма для обр. 2а. Тонкие черные и фиолетовые линии ограничивают поля устойчивости минеральных парагенезисов для различных значений активности воды. Жирные линии соответствуют солидусу. Красные линии с цифрами обозначают изоплеты X_{Mg} в гранате. Liq – расплав. Цветные прямоугольники оконтуривают P - T условия, полученные по данным минеральной термобарометрии. Синими стрелками показаны предполагаемые участки P - T траекторий для проградной (1) и ретроградной (2, ранняя, 3, поздняя) стадий метаморфизма

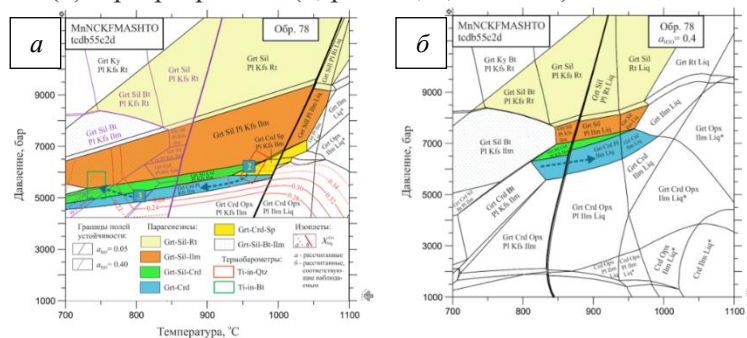


Рисунок 10 – Изохимические фазовые P - T диаграммы для гранат-кордиеритовых гранулитов (обр. 78). а – при активности воды 0.4; б – при активности воды 0.05. Условные обозначения – см. рисунок 8

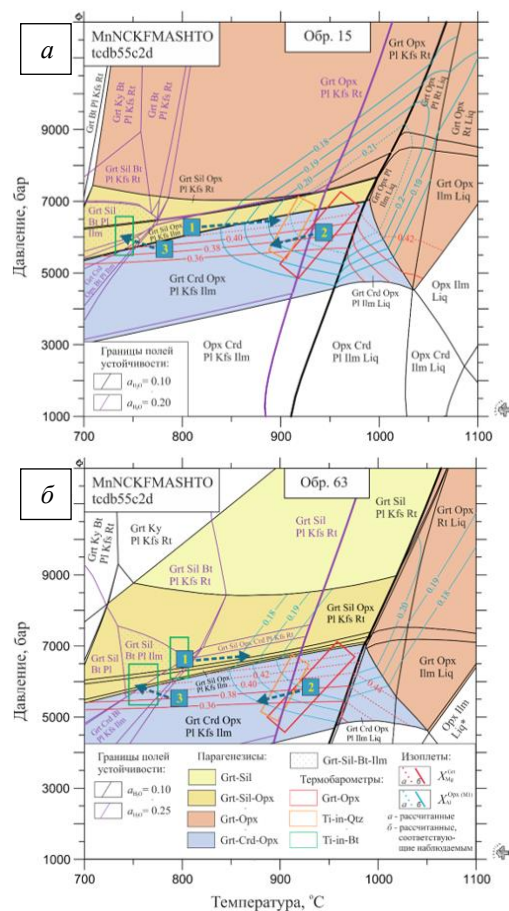


Рисунок 11 – Изохимические фазовые P – T диаграммы, рассчитанные для гранат-ортопироксен-кордиеритовых гранулитов. a – образец 15; b – образец 63. Условные обозначения – см. рисунок 8. Синие линии с цифрами обозначают изоплеты $X_{\text{Opx}}^{\text{M1}}$

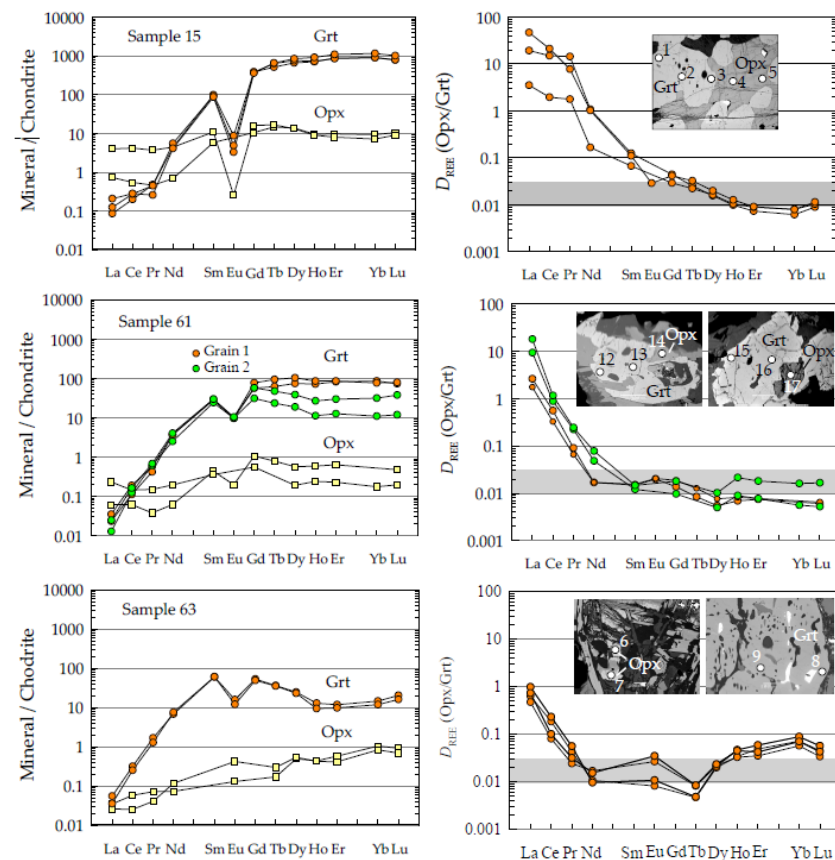


Рисунок 12 – Нормализованные на хондрит (McDonough, Sun 1995) REE спектры граната и ортопироксена из образцов 15, 61 и 63 (слева) и соответствующие им профили распределения редкоземельных элементов между минералами (справа). Серым выделена область равновесных значений D_{HREE} (Opx/Grt) (Harley, Kelly (2007). На врезках показаны микрофотографии аншлифов (изображения в режиме отраженных электронов) с точками анализа