

*На правах рукописи*

**Юрченко Анастасия Владимировна**



**РЕКОНСТРУКЦИЯ УСЛОВИЙ  
ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКОГО МЕТАМОРФИЗМА  
ПОРОД ОРЕХОВО-ПАВЛОГРАДСКОЙ ЗОНЫ  
УКРАИНСКОГО ЩИТА ПО ГРАНАТСОДЕРЖАЩИМ  
МИНЕРАЛЬНЫМ ПАРАГЕНЕЗИСАМ**

*Специальность 1.6.3 – Петрология, вулканология*

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

Санкт-Петербург – 2022

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт геологии и геохронологии докембрия РАН».

**Научный руководитель:**

доктор геолого-минералогических наук

*Балтыбаев Шаукет Каимович*

**Официальные оппоненты:**

*Сироткин Александр Николаевич*

доктор геолого-минералогических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана им. ак. И.С. Грамберга», заведующий сектором;

*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, старший научный сотрудник;

Ведущая организация – Институт геологии – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук», г. Петрозаводск.

Защита диссертации состоится 13 мая 2022 года в 14:00 на заседании диссертационного совета ГУ 2021.8 Горного университета по адресу: 199106 г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, ауд. 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 11 марта 2022 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



ГУЛЬБИН  
Юрий Леонидович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** При разработке тектонических моделей сложность представляет определение времени метаморфизма и увязка *PT*-параметров образования пород с общей шкалой геологических событий. Эти задачи нужно решать с использованием минералов, прямо свидетельствующих о времени и физико-химических условиях геологических процессов. Информативным минералом является гранат – наиболее изученный многокомпонентный твердый раствор, состав которого определяется термодинамическими и физико-химическими параметрами среды (напр., Spear, 1991). Он стабилен в огромном диапазоне *PT*-условий и составов пород, используется в Sm-Nd геохронометрии, благодаря высокому Sm/Nd отношению в нем.

Составы граната активно используются для определения *PT*-режимов образования метаморфических минеральных парагенезисов (Hollister, 1966; Spear, Selverstone, 1983; Lasaga, Jiang, 1995; Tirone, Ganguly, 2010; O'Brien, 1999; Cooke et al., 2000; Escuder-Viruete et al., 2000; Spear, Daniel, 2001; Гульбин, 2014; Лиханов и др., 2016; Туркина, Сухоруков, 2017 и др.), что в свою очередь позволяет решать широкий круг петрологических и геодинамических задач.

**Степень разработанности темы исследования.** В настоящее время существуют два альтернативных представления о строении и эволюции коры Украинского щита в докембрии. По мнению ряда исследователей (Щербак и др., 1984; Артеменко, 1995; Щербак, Пономаренко, 2000 и ссылки в ней), архейские образования слагали единый древний кратон, испытавший внутрикратонные тектонические преобразования как в архее, так и в протерозое. Другие исследователи (Каляев, 1989; Bogdanova et al., 2001, 2006; Glevassky, Glevasska, 2002; Азаров, 2005; Щербаков, 2005; Claesson et al., 2006; Гинтов, 2017) предполагают, что современное строение щита определили плейт-тектонические процессы на границе архея и протерозоя, создав коллаж архейских и протерозойских структур в результате амальгамации отдельных тектонических блоков. В последние годы появился ряд работ, касающихся строения и тектонической эволюции Украинского щита как сегмента Сарматии в составе Восточно-Европейского кратона (Щипанский и др., 2007;

Минц и др., 2014; Lobach-Zhuchenko et al., 2014; Савко и др., 2017; Claesson et al., 2018; Самсонов и др., 2020; и др.).

Однако, работ, связанных с изучением строения и эволюции протерозойских шовных зон, практически не было. В связи с этим в данной работе основной акцент сделан на реставрацию условий метаморфизма и развития одной из таких зон – Орехово-Павлоградской (ОПЗ). Проведенные исследования направлены главным образом на изучение палеопротерозойского этапа метаморфизма пород ОПЗ, содержащих в своем составе парагенезисы с гранатом. Знание условий метаморфизма пород этой зоны является необходимым звеном в разработке тектонической модели развития восточной части Украинского щита.

**Цель работы:** реконструкция термодинамических параметров метаморфизма пород Орехово-Павлоградской зоны, оценка времени, стадийности метаморфических событий на основе изучения гранатсодержащих парагенезисов.

**Задачи работы:**

1. Установление геологической и структурной позиции метаморфических пород ОПЗ (Васильковский участок).
2. Определение условий и стадийности метаморфизма пород ОПЗ с применением петролого-минералогических и геохимических методов.
3. Оценка времени регионального метаморфизма с использованием разных изотопных методов по комплексу минералов, кристаллизация или перекристаллизация которых связана с процессом метаморфизма (гранат, монацит, циркон).
4. Реконструкция природы протолита гранат-биотитовых гнейсов.

**Научная новизна.**

1. Установлен полный *PT*-тренд с выделением начальной, пиковой и постпиковой стадий палеопротерозойского регионального метаморфизма пород северной части Орехово-Павлоградской зоны.
2. *PT*-условия палеопротерозойского метаморфизма реконструированы по комплексу петрологических и геохронологических методов, и определено время метаморфического события двумя независимыми методами: Sm-Nd по гранату и U-Pb по монациту. Показано соответствие

теоретических моделей формирования метаморфических парагенезисов глиноземистых пород эмпирическим наблюдениям.

3. Установлены и охарактеризованы ранее неизвестные ориентированные гётитовые минеральные включения в метаморфических гранатах.

4. Обосновано развитие гранат-биотитовых гнейсов по тоналитам в протерозойских зонах сдвиговых деформаций.

**Теоретическая и практическая значимость работы.**

Полученные данные могут быть использованы при составлении геологических карт и легенд к ним, а также при геодинамических реконструкциях эволюции Орехово-Павлоградской зоны и Украинского щита. Методический подход в исследовании метаморфических пород может быть использован в учебном процессе при подготовке специалистов-петрологов.

**Методология и методы исследования.** В основе работы лежат материалы, полученные автором в результате полевых и камеральных работ 2008-2012 гг. – коллекция состоит из более 50 образцов, 100 шлифов и 50 микронзондовых пластинок. Аналитический материал включает 45 химических анализов пород на главные, редкие и редкоземельные элементы (РЗЭ), более 2000 локальных химических анализов минералов, 40 определений содержания РЗЭ в минералах. Определение возраста основано на изотопном анализе Sm-Nd системы в различных минералах из пяти проб, а также U-Pb системы циркона из двух проб и U-Pb системы монацита из одной пробы.

Состав пород анализировался методом XRF (ВСЕГЕИ, г. Санкт-Петербург), а содержание редких и редкоземельных элементов – методом ICP-MS (ВСЕГЕИ). Состав минералов определялся на электронном микроскопе JSM-6510LA с ЭДС JED-2200 (ИГГД РАН, г. Санкт-Петербург).

Возраст циркона получен локальным U-Pb методом датирования (SHRIMP-II, ЦИИ ВСЕГЕИ), а U-Pb возраст монацита – методом изотопного разбавления на мультиколлекторном масс-спектрометре MAT-261 (ИГГД РАН). Анализ изотопного состава Sm и Nd производился на мультиколлекторном масс-спектрометре TRITON (ИГГД РАН).

Включения в гранате изучались с помощью рамановской спектроскопии (Горный университет, г. Санкт-Петербург). Внутреннее строение циркона исследовалось на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-7001F с ЭДС INCA в ЦКП Горного университета. Содержания редкоземельных и редких элементов в минералах определялись на ионном зонде Cameca IMS-4F в ЯФ ФТИАН (г. Ярославль).

Для *PT*-оценок метаморфизма и расчета полей устойчивости минералов использованы программы THERIAK-DOMINO (deCapitani, Brown, 1987; с обновлениями С. deCapitani, 1995-2017 гг.), winTWQ v. 2.34 (Berman, 1991, 2007) THERMOCALC v. 3.33 (Holland, Powell, 1998), PERPLEX (Connolly, 2009-2015).

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Гранат-биотитовые гнейсы образовались в результате палеопротерозойской структурно-метаморфической переработки архейских тоналитов и локализованы в маломощных сдвиговых зонах. Появление граната в новообразованных парагенезисах обусловлено уменьшением отношения  $H_2O/CO_2$  во флюиде и пониженным содержанием  $K_2O$  в породе.
2. Палеопротерозойский этап метаморфизма характеризуется стадийностью, отраженной в химической зональности минералов. Реконструкция параметров метаморфизма палеопротерозойского этапа указывает на *PT*-тренд «по часовой стрелке» с кульминацией метаморфизма, достигающей гранулитовой фации.
3. Гранат глиноземистых гнейсов характеризуется зональным распределением ориентированных минеральных включений, возникших при синтаксическом срастании граната и оксидов железа, впоследствии преобразованных в гётит. Синтаксический рост происходил на прогрессивной ветви метаморфизма до достижения условий гранулитовой фации при фугитивности кислорода  $10^{-20}$ – $10^{-16}$ .

**Степень достоверность результатов исследования** определяется применением аналитических данных, полученных современными прецизионными методами; компьютерных методов расчета, использованием апробированных современных, взаимосогласованных термодинамических баз для минералов и твердых растворов; взаимной верификацией теоретических

расчетных данных и природных наблюдений.

**Апробация результатов.** Результаты исследования докладывались на международной научной конференции “Гранулитовые и эклогитовые комплексы в истории Земли” (г. Петрозаводск, 2011); международной научной конференции “EGU General Assembly” (Австрия, г. Вена, 2012); XXIII молодежной научной школе-конференции (г. Петрозаводск, 2012); III международной научно-практической конференции памяти А.П. Карпинского (г. Санкт-Петербург, 2013); международной конференции “Granulites & Granulites” (Индия, г. Хайдерабад, 2013); российской конференции по проблемам геологии и геодинамики докембрия “Этапы формирования и развития протерозойской земной коры: стратиграфия, метаморфизм, магматизм, геодинамика” (г. Санкт-Петербург, 2019); на международном геологическом студенческом саммите (г. Санкт-Петербург, 2021).

**Личный вклад автора** состоит в участии на всех этапах проведенного исследования. При непосредственном участии автора были получены и проанализированы изотопные данные по породам и отдельным минералам. Лично автором выполнено петрографическое описание пород, обработка и интерпретация микрозондовых исследований минералов, изучение ориентированных минеральных включений в метаморфическом гранате, расчет *PT*-параметров кристаллизации метаморфических минеральных парагенезисов и применение методов петрологического моделирования для метаморфического процесса. Автором также дана интерпретация результатов геохимического изучения метаосадочных пород Васильковского участка ОПЗ.

**Публикации.** Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 14 печатных работах, в том числе в 3 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в 1 статье – в издании, входящем в международные базы данных и системы цитирования Scopus, Web of Science.

**Структура работы.** Диссертация состоит из введения, семи

глав с выводами по каждой из них, заключения, списка сокращений и условных обозначений, библиографического списка и трех приложений. Диссертация изложена на 196 страницах машинописного текста, включает 64 рисунка, 20 таблиц. Список литературы включает 192 источника.

**Благодарности.** Автор благодарит своего научного руководителя Ш. К. Балтыбаева за консультации и содействие в работе. Автор приносит искреннюю признательность коллегам: за консультации и обсуждение диссертации С.Б. Лобач-Жученко, В.П. Чекулаеву, Н.А. Арестовой и В.В. Балаганскому, за конструктивные замечания и поддержку на разных этапах подготовки работы А.Б. Кузнецову, С.Г. Скублову, П.Я. Азимову и Д.В. Доливо-Добровольскому, И.И. Лиханову, К.А. Савко, за консультации по проблемам кристаллографии А.Г. Штукенбергу, за помощь в аналитических исследованиях О.Л. Галанкиной, Е.С. Богомолу, Н.А. Ризвановой, В.М. Саватенкову, М.В. Морозову и М.М. Мачевариани. Особая благодарность коллегам из ИГМР им Н.П. Семененко НАН Украины А.М. Пономаренко, Л.М. Степанюку, Г.В. Артеменко, В.В. Сукачу за помощь в проведении полевых работ и предоставленный материал. Автор также благодарит свою семью за поддержку в самые сложные минуты поисков и сомнений.

#### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы, цели и задач работы, охарактеризованы фактический материал, методы исследования, практическая значимость и научная новизна.

**В первой главе** дана краткая геологическая характеристика восточной части Украинского щита, в которой расположена ОПЗ, рассмотрены тектонические модели ее формирования и метаморфизм.

**Во второй главе** приведены данные о геологическом строении северной части ОПЗ и Васильковского участка – объекта диссертационного исследования.

**В третьей главе** охарактеризованы методы исследования, использованные в работе.

**В четвертой главе** рассмотрены условия и механизмы образования гранатсодержащих парагенезисов в гнейсах



тоналитового состава.

**Пятая глава** посвящена изучению минеральных парагенезисов глиноземистых гнейсов и реконструкции их *PT*-эволюции.

**В шестой главе** рассматриваются ориентированные включения гётита в гранате и их значение для реконструкции окислительно-восстановительных условий метаморфизма.

**В седьмой главе** дана изотопно-геохимическая характеристика пород и минералов, а также обосновано палеопротерозойское время образования гранатсодержащих парагенезисов.

**В заключении** обобщены результаты исследования и сформулированы главные выводы.

#### **Краткая характеристика объекта исследования**

Орехово-Павлоградская зона (ОПЗ) расположена между архейскими Среднеприднепровским и Приазовским блоками, в восточной части Украинского щита (рисунок 1а). Зона имеет субмеридиональное простирание и ограничена с запада и востока разломами (Чекунов, 1966; Азаров, 2005; Николаев, 2008). ОПЗ имеет в плане «коленчатое» строение, простирается на 200 км и прослеживается за пределами щита в Воронежском кристаллическом массиве (Ненахов и др., 2007; Николаев, 2008; Омельченко, 2010). В строении ОПЗ участвуют архейские и палеопротерозойские осадочные и магматические породы с неравномерно проявленным метаморфизмом (Голенчук, 1978; Белевцев, 1982; Азаров, 2005). На севере ОПЗ метаморфизм достигает условий гранулитовой фации. Встречаются высокобарные кианитсодержащие метапелиты (Щербаков, 2005).

Северная часть ОПЗ сложена глубоко метаморфизованными породами (рисунок 1б) (Некряч, 1980; Бибикова, 1990; Артеменко и др., 2001; Лобач-Жученко и др., 2009, 2010; Lobach-Zhuchenko et al., 2014), которые были детально изучены на Васильковском участке – эталонном для характеристики метаморфизма гранулитовой фации.

В геологическом строении Васильковского участка (рисунок 1в) принимают участие два комплекса пород: (1) метаморфизованные архейские магматические породы фундамента и (2) перекрывающий метаосадочный комплекс палеопротерозойского возраста. Породы фундамента представлены разлинзованными метатоналитами,

прорванными дайками основных пород, и основными кристаллосланцами. Метаосадочный комплекс сложен кварцитами с прослоями гранат-биотитовых гнейсов и высокоглиноземистых пород.

Переработка пород включала несколько этапов деформаций и метаморфизма. Поздние палеопротерозойские деформации (~ 2 млрд лет: Щербак, 2005; Лобач-Жученко и др., 2010), связанные с сжатием СВ-ЮЗ направления, привели к формированию складок вплоть до изоклинальных. С рассланцеванием архейских гнейсов тоналитового состава связано обильное появление Grt с образованием гранат-биотитовых гнейсов. Grt также встречается в толще палеопротерозойского метаосадочного разреза.

Для оценки времени образования гранатовых парагенезисов выполнено Sm-Nd изотопное датирование. Для Grt из гнейса метаосадочной толщи получен возраст  $2002 \pm 7$  млн лет и из метатоналита –  $2014 \pm 11$  млн лет. Близкое время метаморфического события определено U-Pb методом по Mnz:  $2075 \pm 6$  млн лет. Близкие значения возраста получены по метаморфическим каймам и новообразованным зернам Zrn из гранатсодержащих кристаллосланцев и амфиболитов (SHRIMP-II:  $2079 \pm 25$  и  $2071 \pm 13$  млн лет, Лобач-Жученко и др., 2010) и метатоналита ( $2105 \pm 40$  млн лет, Lobach-Zhuchenko et al., 2014).

Таким образом, все гранатсодержащие парагенезисы образовались в палеопротерозойское время, следовательно, установленные по ним *PT*-условия характеризуют палеопротерозойский этап метаморфизма.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

**1. Гранат-биотитовые гнейсы образовались в результате палеопротерозойской структурно-метаморфической переработки архейских тоналитов и локализованы в маломощных сдвиговых зонах. Появление граната в новообразованных парагенезисах обусловлено уменьшением отношения  $H_2O/CO_2$  во флюиде и пониженным содержанием  $K_2O$  в породе.**

Для установления природы гранат-биотитовых гнейсов и возможных механизмов их формирования проведено сравнительное

изучение вещественного состава метатоналита и Grt-Bt гнейса. Полевых наблюдения показали, что Grt-Bt гнейсы локализованы в зонах деформаций метатоналитов мощностью от нескольких сантиметров до первых метров.

Метатоналиты представляют собой среднезернистые, лейкократовые, с хорошо выраженной сланцеватостью породы. Они состоят из Bt (10–15%), Qtz (~33%), Pl (40–50%), иногда с антипертитами, небольшого количества Kfs (до 6%). Встречаются редкие зерна Grt и Sprx, Mag, Zrn и Ap.

Grt-Bt гнейсы образуют рассланцованные полосы (от первых см до м) внутри пластин метатоналитов и сложены Grt (до 10%), Bt (5–10%), Qtz (~30%), Pl (~30%) и Kfs (~18%). Акцессорные минералы: Mag, Zrn и Ap.

Grt-Bt гнейсы и метатоналит имеют сходный химический состав. Метатоналит соответствует породам ТТГ (тоналит-трондьемит-гранодиоритовой) серии и характеризуется типичным для них распределением РЗЭ: обогащением ЛРЗЭ и значительным фракционированием ( $(La/Yb)_n^{срел} = 95$ ). Grt-Bt гнейсы при некоторых вариациях химического состава «перекрывают» составы метатоналита по главным компонентам и повторяют спектры распределения РЗЭ и малых элементов. Эти особенности говорят об изохимическом характере преобразования метатоналита в гранатсодержащий гнейс. При преобразовании заметно изменяются составы пороодообразующих минералов: в Grt из Grt-Bt гнейса увеличиваются содержания Prp и Alm, а Sps и Grs уменьшаются. Наблюдается уменьшение содержаний тяжелых РЗЭ и Y в Grt от метатоналита к Grt-Bt гнейсу (Лобач-Жученко и др., 2009, 2015).

Bt характеризуется высоким содержанием  $TiO_2$  (4–6 мас. %), за исключением более поздней генерации (3–4 мас. %  $TiO_2$ ). Наблюдается тренд увеличения  $TiO_2$ ,  $Al^{Tot}$  и уменьшения железистости при усилении рассланцевания. Как и в Grt, в Bt уменьшается количество РЗЭ, появляется отрицательная Ce аномалия. Bt во включениях в центре зерен Grt более магнезиальный ( $X_{Mg} > 50\%$ ), чем в матриксе породы ( $X_{Mg} < 50\%$ ).

В зонах рассланцевания изменяются составы полевых шпатов: содержание An в Pl в исходном метатоналите составляет 29–31% и

уменьшается до 23–26% в Grt-Bt гнейсе. Pl в центре зерна Grt имеет более основной состав, чем в матриксе породы (27–33% An). Or в наиболее сохранившемся метатоналите содержит 5% Ab и 4–5% Cls, а в Grt-Bt гнейсе – 5–10% Ab и 0–3% Cls.

Выделяются два метаморфических парагенезиса. Парагенезис I образуют реликтовые Pl, Bt и центральные части зерен Grt. Парагенезис II включает новообразованный Grt (края зерен Grt<sub>1</sub>) и минералы матрикса: Pl, Bt, Kfs, Qtz.

Различия в составе минералов находят свое отражение при определении *PT*-параметров метаморфизма. *PT*-условия образования оценены с помощью Grt-Bt термометров (Kleemann, Reinhardt, 1994; Holdaway, 2000) и Grt-Bt-Pl-(Qtz) барометра (Wu et al., 2004).

Для парагенезиса I метатоналита температура составляет 635–665°C и давление – 8.2–9.1 кбар. Для парагенезиса II температура 680–780°C и давление – 8.1–9.1 кбар.

Для парагенезиса I Grt-Bt гнейса получены температура (580–630°C) и давление (6.1–7.6 кбар). Для парагенезиса II: температура 680–780°C и давление 6.3–8.4 кбар.

Нужно отметить увеличение температуры от парагенезиса I к парагенезису II и высокие температуры образования гранатсодержащих парагенезисов в обеих породах. Кроме того, что гранатсодержащий парагенезис в Grt-Bt гнейсе образовался при более низком давлении, чем в метатоналите, хотя Grt – это минерал, поле устойчивости которого расширяется с ростом давления.

Анализ минералообразования с помощью программы Perplex при вариациях содержаний петрогенных элементов показал, что наиболее значимым для появления гранатового парагенезиса является изменение количества K<sub>2</sub>O в системе (рисунок 2).

При насыщении K<sub>2</sub>O и увеличении доли воды во флюиде, Grt не появляется в области *PT*-интервала, предполагаемого по результатам минеральной термобарометрии (рисунок 2а). Вместо Grt в породе становится устойчивым Crx и увеличивается область Bt. Отметим, что единичные зерна Crx встречаются в некоторых безгранатовых образцах метатоналита, что говорит о возможности такого минералообразования.

При высокой доле воды и более высоком содержании  $K_2O$  (рисунок 2б) Grt появляется и устойчив при  $P \geq 6.8$  кбар и  $T = 600\text{--}850^\circ\text{C}$ . Исчезновение Vt происходит при  $T \sim 740^\circ\text{C}$ .

При низком содержании воды и с таким же содержанием  $K_2O$ , как в исходном метатоналите, Grt появляется в широкой области температур и давлений (рисунок 2в). Таким образом, поле устойчивости Grt-Vt парагенезиса достаточно узкое, а поле устойчивости Grt, наоборот, более обширное и занимает большую часть рассматриваемого  $PT$ -диапазона.

С повышением доли воды при том же содержании  $K_2O$  гранат появляется при  $P \geq 3$  кбар и  $T \geq 560^\circ\text{C}$ , а поле устойчивости Grt становится максимальным при достижении  $T 720\text{--}740^\circ\text{C}$ . Полное исчезновение Vt происходит при  $T \sim 760^\circ\text{C}$  (рисунок 2г).

Результаты моделирования показали, что вероятной причиной появления Grt в метатоналите является уменьшение мольной доли воды в  $H_2O\text{--}CO_2$  флюиде. Сокращение устойчивости Grt наблюдается при росте  $K_2O$  в породе. Но с учетом того, что химические составы сравниваемых пород близки, появление Grt-Vt парагенезиса вызвано скорее изменением состава флюида, а не изменением содержания  $K_2O$  в системе.

Можно предположить вероятную реакцию образования Grt-Vt гнейсов по субстрату (Юрченко, Балтыбаев, 2021), представленному метатоналитом:  $Vt_1 + Pl_1 + Qtz \rightarrow Grt + Pl_2 + Vt_2 + Kfs + H_2O$

**2. Палеопротерозойский этап метаморфизма характеризуется стадийностью, отраженной в химической зональности минералов. Реконструкция параметров метаморфизма палеопротерозойского этапа указывает на  $PT$ -тренд «по часовой стрелке» с кульминацией метаморфизма, достигающей гранулитовой фации.**

Характеристики палеопротерозойского  $PT$ -режима метаморфизма получены по умеренно- и высокоглиноземистым парагнейсам, которые являются петрологически наиболее информативными (Юрченко, 2011).

Породы содержат Grt (15–35%), Vt (5–30%), Sil (0–15%), Pl (10–25%), Kfs (15–25%), Qtz (20–40%), Crd (0–15%), реже встречаются парагнейсы без высокоглиноземистых минералов. Количество Kfs

вместе с Qtz увеличивается при мигматизации, с одновременной концентрацией Crd, Bt и Sil в меланосоме (рисунок 3). Иногда Sil приурочен к зонам рассланцевания. Акцессорные минералы представлены Zrn, Ap, Mag, Mnz, Ru, Ilm, Py.

Зерна Grt по строению, составу и размеру можно разделить на два типа: 1) крупные диаметром больше 2 см с ядром, обогащенным Ca (до 14-16% Grs), и уменьшением Grs к краю до 3-7%, со слабым ростом содержаний Prp и Alm к внешней зоне; 2) практически гомогенные зерна, соответствующие краевым частям зерен Grt 1-го типа.

Bt можно подразделить на три типа. 1-й – в ядрах Grt, более магнезиальный ( $X_{Mg} > 40\%$ ), чем 2-й тип в матриксе (с  $X_{Mg} \sim 40\%$ ). Содержание  $TiO_2$  в этих двух типах одинаковое – 3–5 мас.%. Низкотитанистый Bt (3-й) – более поздний, развит по трещинам в Grt и в матриксе породы.

Состав Pl варьирует 25–52 % An и коррелируется с составами пород. Во включениях в гранате Pl заметно более основной ( $An_{30-52}$ ), чем в матриксе породы ( $An_{25-40}$ ).

Crd есть только в высокомагнезиальных высокоглиноземистых парагнейсах и образует как агрегатные скопления в матриксе породы, так и каймы вокруг позднего Grt<sub>3</sub>. Также встречаются Qtz-Crd симплектиты на контакте с Grt. Кордиерит ( $X_{Mg} = 80-86\%$ ) пинитизирован и содержит включения Sil и Bt.

Sil проявлен в виде крупных призматических кристаллов, а также в виде включений в Crd и Kfs или мелких иголок в Qtz.

Выделяются три метаморфических парагенезиса, соответствующих трем стадиям палеопротерозойского метаморфизма. Ранний (стадия 1) сохранился фрагментарно в виде высококальциевого Grt<sub>1</sub> и включений в нем Bt, Pl, Als, Ru, Qtz. Также к раннему парагенезису был отнесен St во включении в кварце ( $Grt_1+Bt_1+Pl_1+Qtz+Als+Ru+St$ ). Высокотемпературный парагенезис (стадия 2 – пиковая) представлен Grt<sub>2</sub> (краевые составы порфиробластов и самостоятельные мелкие зерна) и минералами матрикса ( $Grt_2+Kfs+Pl_2+Bt_2+Qtz+Sil+Ru$ ). Парагенезис стадии 3 (постпиковая) отражает дальнейшее снижение температуры и давления ( $Grt_3+Crd+Sil+Bt_3+Pl_3+Qtz+Ilm$ ).

Для оценки термодинамического режима метаморфизма парагнейсов были использованы методы классической термобарометрии и пакеты программ THERIAK-DOMINO и THERMOCALC (Балтыбаев и др., 2017; Юрченко и др., 2019).

На основе реакции Fe-Mg обмена между Grt-Crd, Grt-Bt, выявлен регрессивный тренд метаморфизма. Этот тренд проявлен снижением температуры и давления от условий гранулитовой фации повышенных давлений ( $T = 730\text{--}820^\circ\text{C}$ ,  $P$  до 8 кбар) до условий амфиболитовой фации умеренных давлений ( $T = 590\text{--}660^\circ\text{C}$ ,  $P = 4.1\text{--}6.4$  кбар). Эти данные совпадают со значениями, рассчитанными по содержанию Ti в палеопротерозойских цирконах, но чуть ниже температур, полученных по дупироксеновой ассоциации из основных пород, ассоциирующих с парагнейсами (рисунок 4а).

Моделирование минеральных парагенезисов с помощью THERIAK-DOMINO для составов высокомагнезиального и высокожелезистого парагнейса при разных активностях воды, а также пересечение изоплет минералов в  $PT$ -координатах позволили установить параметры метаморфизма на **ранней (1) стадии** ( $T \sim 580\text{--}625^\circ\text{C}$  и  $P$  не ниже 7–8 кбар), **высокотемпературной пиковой (2) стадии** ( $T > 800^\circ\text{C}$ ,  $P = 7\text{--}9$  кбар), **регрессивной (3) стадии** ( $T = 600\text{--}675^\circ\text{C}$ ,  $P = 4\text{--}5.5$  кбар). Все расчеты соответствуют реальным петрографическим наблюдениям и подтверждены расчетами минеральных реакций в THERMOCALC (рисунок 4а-д).

Моделирование минералообразования с фракционированием 30% граната (что соответствует доле богатого Ca ядра Grt) объясняет некоторые особенности гранатовых парагенезисов: при фракционной кристаллизации система истощается компонентами Grt и рост его останавливается. Но при высоких температурах ( $T \geq 780^\circ\text{C}$ ), благодаря разложению других минералов и высвобождению компонентов, образуется новый гранат Prp-Alm состава, описанный выше как Grt<sub>2</sub> (рисунок 4д).

Оценки режима метаморфизма с использованием разных термодинамических баз данных минералов оказались близки. Это дополнительный критерий того, что  $PT$ -параметры и тренд метаморфизма соответствуют реальности.

**3. Гранат глиноземистых парагнейсов характеризуется зональным распределением ориентированных минеральных включений, возникших при синтаксическом срастании граната и оксидов железа, впоследствии преобразованных в гётит. Синтаксический рост происходил на прогрессивной ветви метаморфизма вплоть до достижения условий гранулитовой фации при фугитивности кислорода  $10^{-20}$ – $10^{-16}$ .**

В литературе приводятся исследования ориентированных включений титаносодержащих фаз в гранате из различных типов пород, образованные в широком диапазоне *PT*-условий. Такие включения (в мире около 20 находок) описаны в эклогитах (Zhang, Liou, 1999; Ye et al., 2000; Liati et al., 2002; Zhang et al., 2005; Hwang et al., 2007), в гранатовых перидотитах (van Roermund et al., 2000; Song et al., 2004), ксенолитах из кимберлитов (Griffin et al., 1971; Hills, Haggerty, 1989), гнейсах (Vrana, 1989; Whitney, 1992; O'Brien, 1999; West et al., 2005; Guinel, Norton, 2006; Kawasaki et al., 2011; Ague, Eckert, 2012). Образование таких включений чаще всего связывают с экстремальными условиями метаморфизма – сверхвысокими давлениями или температурами.

На сегодняшний день предложено 9 механизмов, объясняющих появление ориентированных включений в гранате (Proyer et al., 2013). Среди них четыре основных: 1 – унаследование и консервирование ранее существовавших ориентированных включений (Force et al., 1996, Sidman et al., 2003), 2 – одновременный рост граната и рутила (Wang et al., 1999), граната и графита (Burton, 1986), 3 – растворение/рост минеральных фаз в гранате при меняющихся параметрах (Griffin et al., 1971; Hills, Haggerty, 1989), 4 – разрушение зерен граната с последующим залечиванием трещин и малоразмерных каналов (Hwang et al., 2001, 2007).

Нами обнаружены закономерно ориентированные включения в гранатах умеренноглиноземистого парагнейса (обр. UR34-1) и кварцита, но их состав отличается от описанных в литературе.

Парагнейс содержит Grt (20–25 об. %), Bt (3–5 об. %), Kfs (~20 об. %), Pl (до 5–10 об. %), Qtz (до 40 об. %) и Sil (до 10 об. %), акцессорные минералы – Ap, Ilm, Zrn и Ru. Присутствуют два типа Grt – Grt<sub>1</sub> и Grt<sub>2</sub>. Преобладает Grt<sub>1</sub> (1–2 мм), который содержит



ориентированные игольчатые включения, распределенные в зерне за исключением самых краевых зон и небольшой области в центре (рисунок 5а).

Grt<sub>2</sub> встречается в виде единичных зерен (0.3–0.5 мм) и не содержит никаких минеральных включений. Он приурочен к лейкократовой части породы (лейкосоме), образовавшейся при мигматизации гнейсов и отличается от Grt<sub>1</sub> по составу.

Grt<sub>1</sub> зональный (центр Prp<sub>24-25</sub>Alm<sub>64-66</sub>Sps<sub>0-1</sub>Grs<sub>9-11</sub> → край Prp<sub>27</sub>Alm<sub>68-71</sub>Sps<sub>0-1</sub>Grs<sub>4-5</sub>). Установлено, что краевые части зерен Grt<sub>1</sub> образовались в условиях гранулитовой фации (стадия 2), в то время как обогащенное Grs ядро соответствует парагенезису стадии 1. Химическая зональность по главным элементам коррелирует с распределением PЗЭ внутри Grt<sub>1</sub> (Балтыбаев и др., 2017). Так, богатые Grs ядра зерен Grt обогащены также тяжелыми PЗЭ и Y, тогда как к краям их содержания уменьшаются.

Grt<sub>2</sub> (Prp<sub>27</sub>Alm<sub>69</sub>Sps<sub>0</sub>Grs<sub>4</sub>) не зональный, его состав соответствует составу краевых частей Grt<sub>1</sub>. Для Grt<sub>1</sub> и Grt<sub>2</sub> характерно значительное количество трещин, заполненных преимущественно гидроокислами железа.

Ширина игольчатых включений в Grt не превышает 3-5 мкм при длине от первых десятков до сотен мкм. Выявлена устойчивая «ромбовидная» ориентировка игольчатых кристаллов с острым углом ~70°. Такой угол (согласно расчету 70.5°) возможен, если включения ориентированы вдоль ребер ромбододекаэдра <111>. Ростовые ступени на {110} ориентированы вдоль <111>, а перпендикуляры к ним вдоль {211}. В таком случае, при росте Grt возникает входящий угол, где зарождение новой фазы может быть облегчено (данные А.Г. Штукенберга, СПбГУ). На электронном микроскопе в режиме композиционного контраста обнаруживаются у включений концентрическая зональность.

Рамановской спектроскопией для игольчатых включений выявлены полосы рассеяния, соответствующие гётиту α-FeOOH (рисунок 5б) (Юрченко и др., 2012).

Ориентированные включения в Grt можно связать с образованием первичного Mag или Hem, т.к. гётит – это низкотемпературный минерал, сосуществование которого с Grt

возможно лишь при очень высоких давлениях (более 30–40 кбар; Vaneyeva, Bendeliani, 1973; Voigt, Will, 1981).

Реакции равновесия:  $4\text{Alm}+3\text{O}_2 = 6\text{Hem}+8\text{Qtz}+\text{Sil}$  и  $2\text{Alm}+\text{O}_2 = 2\text{Mag}+4\text{Qtz}+2\text{Sil}$  позволили определить диапазоны фугитивности кислорода при совместном росте Grt и Hem ( $10^{-20-16}$ ) или Mag ( $10^{-20-17}$ ) (рисунок 6).

Таким образом, возникновение ориентированных включений возможно при синтаксическом росте Grt и Mag/Hem при фугитивности кислорода  $10^{-20}-10^{-16}$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в результате проведенного комплексного исследования пород северной части Орехово-Павлоградской зоны с помощью современных методов и программ установлены термодинамические параметры метаморфизма, время и стадийность метаморфических событий на основе изучения гранатсодержащих парагенезисов.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы и рекомендации:

Изучение показало, что архейские тоналиты фундамента и протерозойский осадочный комплекс испытали структурно-метаморфическую переработку 2.10–2.07 млрд лет назад. Палеопротерозойский этап деформаций и метаморфизма был многостадийным, а *PT*-условия менялись от амфиболитовой до гранулитовой фации.

Образование Grt-Vt гнейсов по тоналитам архейского фундамента происходило в зонах локальных деформаций, ключевую роль в образовании гранатсодержащих парагенезисов сыграло снижение активности  $\text{H}_2\text{O}$ , что способствовало кристаллизации граната при комплементарном разложении биотита.

*PT*-тренд метаморфизма палеопротерозойского метаосадочного комплекса характеризует стадийность процессов, где начальная стадия метаморфизма отвечала условиям умеренного давления ( $P \sim 8.5$  кбар) и ( $T \sim 600^\circ\text{C}$ ) с последующей слабой декомпрессией и увеличением температуры до условий гранулитовой фации ( $T \sim 830^\circ\text{C}$ ). На завершающей стадии метаморфизма происходило

сопряженное снижение температуры и давления. Эволюция *PT*-параметров метаморфизма идет по «часовой стрелке».

Ориентированные включения в гранате возникли на догранулитовом отрезке прогрессивного тренда при давлениях, не превышающих 8–9 кбар при фугитивности кислорода  $10^{-20}$ – $10^{-16}$ . Формы, характер распределения и состав ориентированных включений указывают на существование условий, благоприятных для образования синтаксических срастаний граната и оксидов железа.

Установленные петрологические, геохимические и изотопно-геохронологические особенности пород, а также *PT*-тренд условий метаморфизма на основе использования современных лабораторно-аналитических данных и компьютерных программ анализа и моделирования для северной части ОПЗ значительно расширяет наши представления о тектонической эволюции изученной структуры, что в дальнейшем должно быть учтено при составлении региональных схем корреляции, разномасштабных геологических карт и легенд к ним, а также при геодинамических реконструкциях эволюции ОПЗ и других структур Украинского щита как составной части Самартии.

Методический подход, примененный при изучении ОПЗ, может быть использован для изучения аналогичных ей шовных зон в докембрийских структурах России и послужить надежной основой выделения тектонических этапов их эволюции, и, как следствие, минерагенических эпох, продуктивных на высоколиквидные полезные ископаемые.

#### **СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

1. Лобач-Жученко, С.Б. Изотопный U-Pb возраст основных пород Васильковского района Орехово-Павлоградской коллизионной зоны / С.Б. Лобач-Жученко, В.В. Балаганский, Н.А. Арестова, **А.В. Юрченко** [и др.] // Региональная геология и металлогения. – 2010. – № 43. – С. 5-17.
2. Лобач-Жученко, С.Б. Состав и возраст цирконов Орехово-Павлоградской сдвиговой зоны (Украинский щит): вклад в реконструкцию истории геологического развития / С.Б. Лобач-Жученко,

С.Г. Скублов, Ш.К. Балтыбаев, **А.В. Юрченко** [и др] // Геохимия. – 2015. – № 5. – С. 395-417.

3. Балтыбаев, Ш.К. Условия метаморфизма гранатсодержащих глиноземистых гнейсов Орехово-Павлоградской зоны Украинского щита / Ш.К. Балтыбаев, **А.В. Юрченко**, С.Б. Лобач-Жученко [и др] // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58, № 11. – С. 1684-1702.

*Публикация в издании, входящем в международные базы данных и системы цитирования Scopus, Web of Science:*

4. Lobach-Zhuchenko, S.B. The Orekhov-Pavlograd Zone, Ukrainian Shield: Milestones of its evolutionary history and constraints for tectonic models / S.B. Lobach-Zhuchenko, V.V. Balagansky, Sh.K. Baltybaev, E.V. Bibikova, V.P. Chekulaev, **A.V. Yurchenko**, [et al.] // Precambrian Research. – 2014. – V. 252. – P. 71-87.

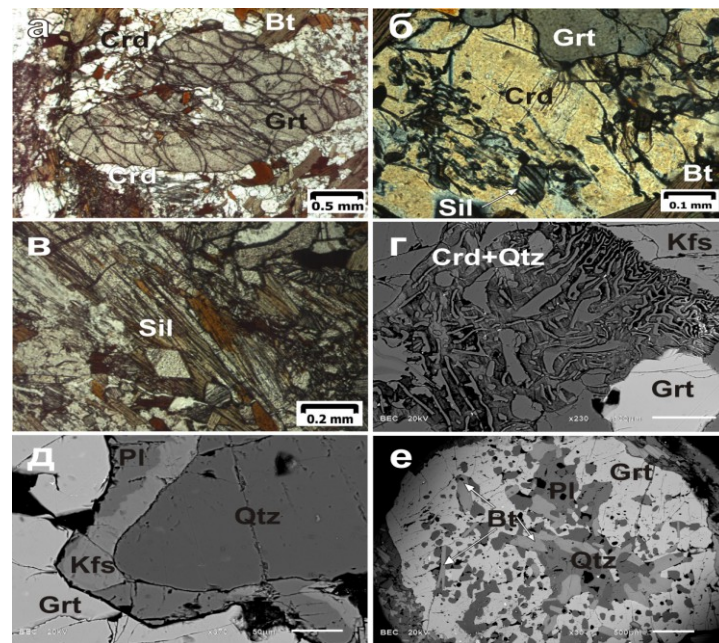
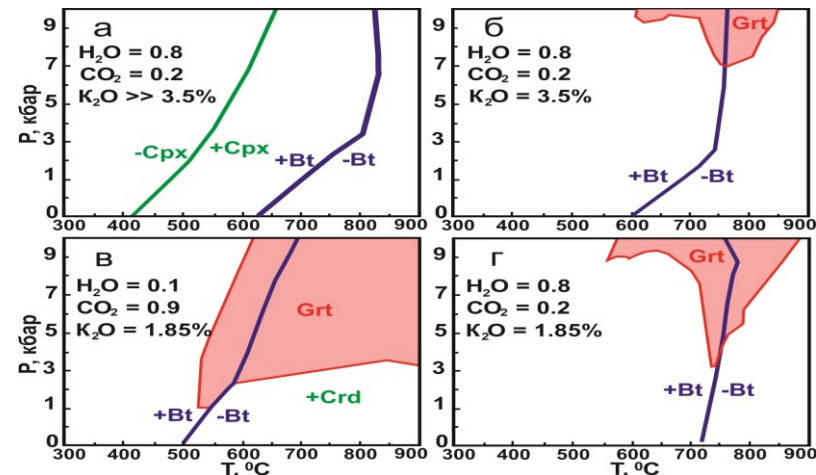
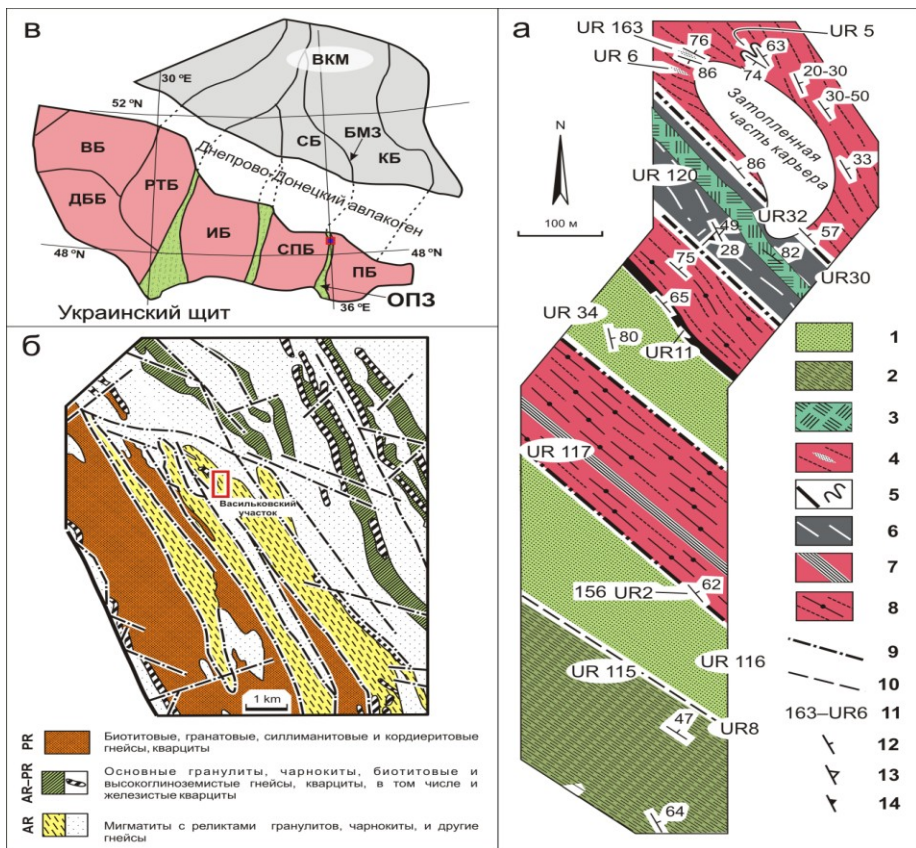
*Публикации в прочих изданиях:*

5. Лобач-Жученко, С.Б. Биотит-гранатовые гнейсы – результат структурно-метаморфической переработки древних тоналитов: состав минералов, характеристика и возраст процесса / С.Б. Лобач-Жученко, Ю.С. Егорова, **А.В. Юрченко**, В.В. Балаганский [и др] // Минералогічний журнал (Украина). – 2009. – № 1. – С. 3-11.

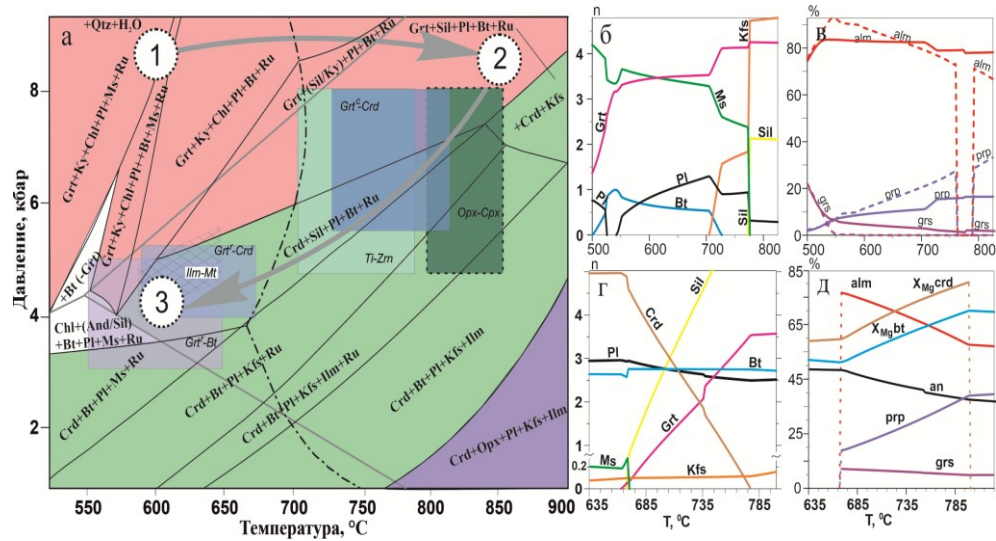
6. **Юрченко, А.В.** Ориентированные включения гётита в метаморфическом гранате глиноземистых гнейсов Орехово-Павлоградской зоны (Украинский щит, район с. Васильковка) / **А.В. Юрченко**, Ш.К. Балтыбаев, М.В. Морозов [и др] // Доклады Академии наук. – 2012. – Т. 446, № 6. – С. 668-671.

7. **Юрченко, А.В.** Палеопротерозойский этап метаморфизма пород Орехово– Павлоградской зоны Украинского щита на основе изучения гранатсодержащих парагенезисов / **А.В. Юрченко**, Ш.К. Балтыбаев., С.Б. Лобач–Жученко [и др] // Этапы формирования и развития протерозойской земной коры: стратиграфия, метаморфизм, магматизм, геодинамика. – СПб: «Свое издательство». – 2019. – С. 244-245.

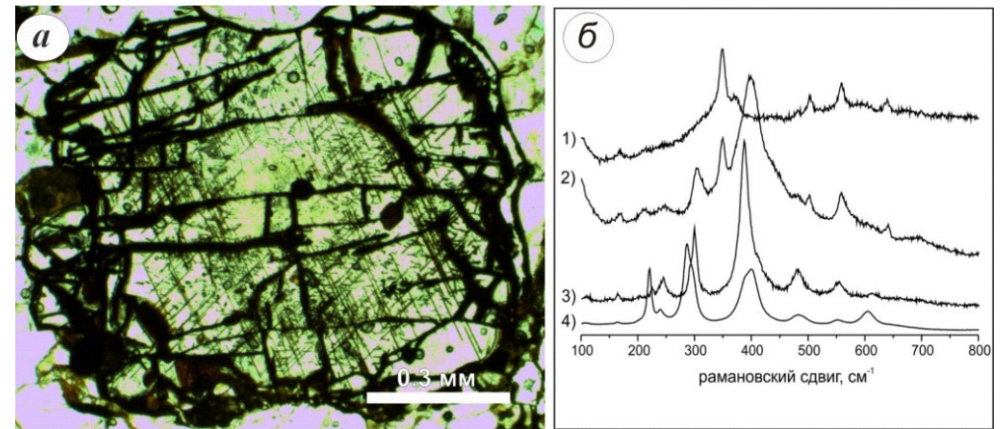
8. **Юрченко, А.В.** Причины возникновения высокотемпературных гранатсодержащих метаморфических парагенезисов в гнейсах тоналитового состава / **А.В. Юрченко**, Ш.К. Балтыбаев // Сборник тезисов докладов конференции Геологический международный студенческий саммит. – Издательство: ООО “Издательство ВВМ” (Санкт-Петербург). – 2021. – С. 55-59.



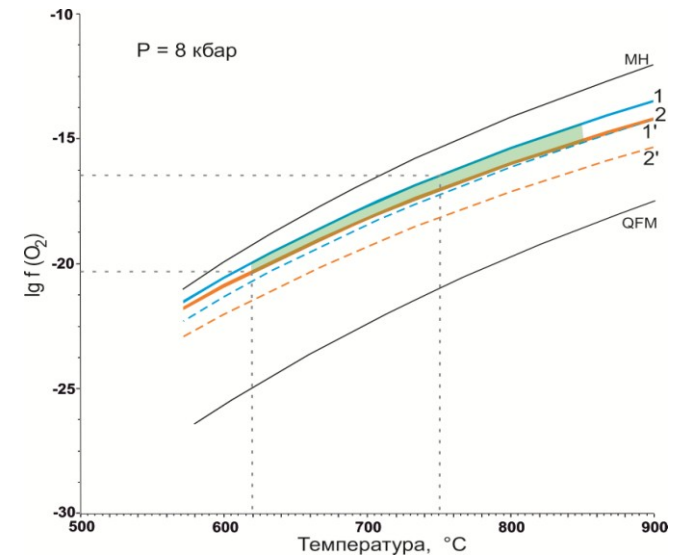




**Рисунок 4** – *PT*-тренд и поля устойчивости минеральных парагенезисов на основе расчётов в программе THERMOCALC (а). Кружками обозначены координаты ранней (1), пиковой (2) и постпиковой (3) стадий метаморфизма, прямоугольниками – результаты геотермометрии: Оpx-Сpx (Powell, 1978), Ti-Zrn (Watson et al., 2006), Grt-Bt и Grt-Crd (Bhattacharya, 1993; Kleemann, Reinhardt, 1994; Holdaway, 2000; Kaneko, Miyano, 2004), Ilm-Mag (Lindsley, Spencer, 1982). Давление по Grt-Crd-Als-Qtz (Perchuk et al., 1984; Aranovich, Podlesskii, 1989), для Оpx-Сpx парагенезиса (Юрченко, 2010; Lobach-Zhuchenko et al., 2014). Справа (б-д) – изменение содержания минералов в парагенезисах по данным моделирования составов для прогрессивного (с  $T = 500^{\circ}\text{C}$  до  $T = 825^{\circ}\text{C}$  при  $P = 8$  кбар) (б) и регрессивного (от  $T = 825^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 8$  кбар до  $T = 635^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 4.7$  кбар) (г) трендов метаморфизма; в, д – изменение химического состава минералов на прогрессивной и регрессивной ветвях метаморфизма, соответственно. Пунктиром (в) – изменение состава Grt при фракционировании его высоко-Са ядра.



**Рисунок 5** – Ориентированные включения игольчатых фаз в Grt. а – включения отсутствуют в ядре и краевой части зерна Grt; б – Рамановские спектры: 1 – граната, 2 – включения (комбинация спектров гётита и граната), 3, 4 – гётита из эталонных образцов.



**Рисунок 6** – Расчет фугитивности  $\text{O}_2$  в программе winTWQ для обр. UR 34-1. Окислительно-восстановительные буферы: МН, QFM.  $\text{Lg } f\text{O}_2$  – логарифм фугитивности  $\text{O}_2$ . МН:  $4\text{Mag} + \text{O}_2 = 6\text{Hem}$ , QFM:  $3\text{Fa} + \text{O}_2 = 2\text{Mag} + 3\text{Qtz}$ . 1 –  $4\text{Alm} + 3\text{O}_2 = 6\text{Hem} + 8\text{Qtz} + \text{Sil}$ , 2 –  $2\text{Alm} + \text{O}_2 = 2\text{Mag} + 4\text{Qtz} + 2\text{Sil}$ ; 1', 2' – реакции 1 и 2 для чистого Alm соответственно.