
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени
М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Митяев Александр Сергеевич

**Флюидно-магматическое взаимодействие гранулитового комплекса и
кратона на примере комплекса Лимпопо и кратона Каапвааль, ЮАР**

Специальность 1.6.3. – петрология, вулканология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-
минералогических наук

Москва – 2023


Работа выполнена на кафедре петрологии и вулканологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и в лаборатории метаморфизма, магматизма и геодинамики литосферы в Институте экспериментальной минералогии РАН им. академика Д.С. Коржинского

- Научный руководитель** – **Сафонов Олег Геннадьевич**, доктор геолого-минералогических наук, профессор РАН
- Официальные оппоненты** – **Скублов Сергей Геннадьевич**, доктор геолого-минералогических наук, доцент, ФГБУН Институт геологии и геохронологии докембрия Российской академии наук, главный научный сотрудник
- Гирнис Андрей Владиславович**, доктор геолого-минералогических наук, ФГБУН Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, главный научный сотрудник
- Савко Константин Аркадьевич**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, ФГБУН «Воронежский государственный университет», заведующий кафедрой

Защита диссертации состоится «12» мая 2023 г. в 17-00 на заседании диссертационного совета МГУ.016.5 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: Ленинские горы, д. 1, Главное здание МГУ, аудитория № 415. E-mail: msu.04.02@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/016.5/2453/>

Автореферат разослан «7» апреля 2023г.

Ученый секретарь диссертационного совета МГУ.016.:  Белоконева Е.Л.
доктор химических наук

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность представленной работы. Формирование и эволюция континентальной коры в докембрии является одной из ключевых проблем современной геологии (Rudnick, Fountain 1995). Неотъемлемой составляющей докембрийской континентальной коры являются высокотемпературные породы гранулитовых комплексов (Rudnick, Fountain, 1995). На поверхности Земли они обнажаются в пределах древних щитов и срединных массивов в складчатых поясах, но наиболее интересными проявлениями гранулитов на поверхности являются докембрийские протяженные пояса, расположенные между кратонами - консолидированными блоками континентальной коры, залегающими на деплетированной и аномально холодной мантии. Одним из актуальных и перспективных направлений, затронутых в диссертационной работе, является исследование петролого-геохимических и геодинамических процессов в гранулитовых комплексах, сформированных (эксгумированных) на границах кратонов. Такие комплексы как правило характеризуются активным и разнообразным по составу гранитоидным магматизмом, проявляющимся многократно в течение интервалов времени различной продолжительности (см. обзоры в работе Halla et al., 2017). Образование гранитных магм часто связывают с формированием гранулитов в нижней и средней коре, а гранулиты интерпретируются как обедненные летучими и литофильными элементами реститы от частичного плавления разнообразных коровых субстратов в ходе прогрессивного метаморфизма (Taylor et al., 2014). Однако многочисленные полевые, геохронологические и геохимические данные демонстрируют, что значительные объемы гранитоидных магм внедряются в докембрийские гранулитовые комплексы не только на прогрессивной стадии, но и на пике и даже регрессивной стадии метаморфизма (Safonov et al., 2014). Для таких комплексов предложен термин «инъекционные комплексы» (Weinberg, Searle, 1998; Morfin et al., 2013, 2014). Гранитоидные магмы обычно несут огромный объем флюидов, которые, выделяясь при кристаллизации, меняют геохимические характеристики вмещающих пород и обуславливают образование новых минеральных ассоциаций в них. Соединения системы С-О-Н являются наиболее важными компонентами этих флюидов. В отличие от H_2O , наличие CO_2 не проявляется в минеральных ассоциациях гранитоидов. Тем не менее, присутствие CO_2 в гранитных магмах регистрируется по первичным включениям в минералах гранитоидов, содержащих CO_2 и/или дочерние карбонатные фазы (Frost et al., 2000; Santosh et al., 1991, 2005; Frezzotti et al., 1994; Safonov et al., 2014, 2020) и графит (Safonov et al., 2018). Сосуществование включений силикатных расплавов («наногранитоидов») и включений, содержащих CO_2 и/или карбонатные фазы и графит, в минералах мигматитов наглядно указывают на связь между гранитообразованием и наличием углекислых флюидов в областях высокотемпературного метаморфизма и анатексиса (напр., Cesare et al., 2015; Ferrero et al., 2016; Tacchetto et al., 2019; Bartoli, Cesare, 2020; Carvalho et al., 2020 и ссылки в этих работах). Экспериментальные данные предоставляют противоречивые результаты о роли углекислых флюидов в гранитообразовании. Тем не менее, наибольшая часть результатов экспериментов демонстрируют негативное влияние CO_2 на частичное плавление в условиях метаморфизма в коре (напр., Ebadi, Johannes, 1991; Clemens et al., 1997), поэтому возникает резонный вопрос, какова же роль углекислых флюидов в образовании гранитоидных магм и каковы условия их совместного сосуществования. В этом отношении важным вопросом является выявление источников углекислых флюидов в областях гранулитового метаморфизма и гранитообразования. Данные источники могут быть как внешними, т.е. не связанными с окружающими гранулитами, так и внутренними (карбонаты, графит). Исследования петрологических процессов на границах гранулитовых комплексов и кратонов предоставляют всестороннюю возможность для ответа на эти вопросы.

Модельным объектом для исследований в этом направлении является неоархейский-палеопротерозойский (2.7-2.01 млрд. лет) гранулитовый комплекс Лимпопо (ЮАР),

расположенный между кратонами Каапвааль и Зимбабве. В ходе метаморфической эволюции Южная Краевая Зона (ЮКЗ) комплекса Лимпопо испытала обширные процессы анатексиса (напр., van Reenen et al., 2011, 2019). Однако наиболее мощные проявления гранитоидного магматизма в этой зоне комплекса Лимпопо связаны с периодом эксгумации и регрессивного метаморфизма после 2720–2710 млн. лет (van Reenen et al., 2014; Taylor et al., 2014; Nicoli et al., 2015). CO₂ являлся ведущим компонентом флюидов, сопровождавших магмы гранитоидов, внедрявшихся в ЮКЗ на регрессивной стадии развития комплекса. Несмотря на хорошую изученность Р-Т эволюции пород этого комплекса, ряд важных вопросов, таких как роль гранитоидного магматизма в эволюции комплекса, флюидно-магматическое взаимодействие гранулитов и пород кратона остаются недооцененными в существующих моделях. Все эти вопросы чрезвычайно важны для создания общей модели, объясняющей как масштабное образование гранулитов в основании докембрийской коры, так и последующий их вывод на поверхность в ходе коллизии кратонных блоков.

Главной целью работы является петрологическое построение модели флюидно-магматического взаимодействия гранулитового комплекса и кратона и определение роли гранитоидных магм и углекислых флюидов в этом процессе на примере Южной Краевой Зоны комплекса Лимпопо и зеленокаменных комплексов кратона Каапвааль (ЮАР).

В рамках работы были поставлены следующие **конкретные задачи**:

Петрологическое исследование лейкократовых гранатсодержащих гранитоидов из Южной Краевой Зоны (ЮКЗ) гранулитового комплекса Лимпопо и карбонатсодержащих метаморфических пород из зеленокаменного пояса Гияни (кратон Каапвааль), определение их петрохимических и геохимических характеристик и условий образования.

Изучение карбонатсодержащих и силикатных включений в зернах граната из лейкократовых гранитоидов ЮКЗ, выявление их природы и условий захвата.

Определение изотопных характеристик углерода и кислорода карбонатов из карбонатсодержащих метаморфических пород зеленокаменного пояса Гияни и сопоставление их с опубликованными изотопными данными для углерода графита и флюидных включений в лейкократовых гранатсодержащих гранитоидах ЮКЗ, а также карбонатов и графита из метаморфических пород ЮКЗ.

Экспериментальное и термодинамическое моделирование преобразований и частичного плавления карбонатсодержащих пород, как возможных источников водно-углекислых флюидов и гранитодных расплавов, при давлениях 6 - 15 кбар и температурах 700 - 900°C, выявление тенденций в эволюции состава минеральных ассоциаций, расплавов и флюидов в ходе этих процессов.

Научная новизна работы.

1. Впервые обнаружены и детально исследованы полифазные карбонатсодержащие включения в гранатах непосредственно из гранитоидов докембрийского гранулитового комплекса (Южная Краевая Зона комплекса Лимпопо).

2. Впервые измерен изотопный состав углерода и кислорода карбонатных минералов из пород зеленокаменного пояса Гияни кратона Каапвааль и выявлены его аналогии с изотопным составом углерода из различных объектов в пределах гранулитового комплекса Лимпопо, что подтвердило модель активного флюидно-магматического взаимодействия гранулитового комплекса и кратона.

3. Впервые проведены систематические экспериментальные исследования метаморфических преобразований и частичного плавления карбонатсодержащих пород при Р-Т условиях высокотемпературного метаморфизма в средней и нижней коре.

Теоретическая и практическая значимость проведенных исследований. Результаты исследований, представленные в диссертации, имеют теоретическое значение для разработки моделей эволюции континентальной коры в докембрии. Выводы о взаимосвязи флюидного режима в гранулитовых комплексах и процессов деволатилизации низкометаморфизованных пород зеленокаменных поясов кратонов в ходе их погружения под гранулитовые надвиги могут использоваться в прогнозе распределения месторождений полезных ископаемых (например, гидротермального золота, источником которого часто являются породы зеленокаменных поясов) в докембрийских метаморфических комплексах. Результаты исследований, представленные в диссертации, могут использоваться в учебных курсах петрологии и геохимии магматических и метаморфических пород, минералогии, физико-химической петрологии, экспериментальной минералогии и петрологии, региональной и исторической геологии.

Защищаемые положения:

1. Карбонатно-силикатные полифазные включения в гранате из лейкократовых гранитоидов Южной Краевой Зоны (ЮКЗ) гранулитового комплекса Лимпопо (ЮАР) являются продуктами взаимодействия минерала-хозяина с водно-углекислым флюидом, захваченным при росте граната из гранитного расплава.
2. Ассоциирующиеся друг с другом карбонатно-силикатные и силикатные полиминеральные включения в гранате из лейкократовых гранитоидов Южной Краевой Зоны (ЮКЗ) гранулитового комплекса Лимпопо (ЮАР) свидетельствуют о том, что водно-углекислый флюид сосуществовал с гранитной магмой при ее внедрении в гранулитовый комплекс в период 2.69-2.64 млрд. лет.
3. Источником водно-углекислых флюидов в гранитной магме служили породы зеленокаменных поясов кратона Каапвааль, погруженные под ЮКЗ, на что указывает близкий изотопный состав углерода флюидных включений и графита из лейкократовых гранитоидов ЮКЗ и карбонатных минералов пород зеленокаменного пояса Гияни (кратон Каапвааль).
4. При частичном плавлении карбонат-биотитового гнейса из зеленокаменного пояса Гияни при давлениях 6–15 кбар и температурах 800–950°C образуется гранитный расплав совместно с водно-углекислым флюидом, что воспроизводит механизм сосуществования гранитной магмы и водно-углекислых флюидов в ЮКЗ комплекса Лимпопо.

Апробация работы. По теме диссертационной работы опубликовано 5 статей в российских и зарубежных журналах и тезисы 24 докладов в сборниках международных и российских конференций. Основные результаты работы докладывались на следующих научных конференциях и совещаниях: Всероссийская школа молодых ученых экспериментальная минералогия, петрология и геохимия (Черноголовка, 2018, 2019, 2020, 2021); Всероссийский ежегодный семинар по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии (Москва, 2020, 2022); Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2018», «Ломоносов-2019»; «Ломоносовские чтения» (Москва, 2020, 2021, 2022); Goldshmidt Conference (Барселона, 2019); Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения — 2022, Сыктывкар); XXIX Всероссийская молодежная конференция «Строение литосферы и геодинамика» (Иркутск, 2021); Международная школа по наукам о Земле имени профессора Л.Л. Перчука (ISES – 2022, Петропавловск-Камчатский); Metamorphic Studies Group 40th Anniversary Meeting (2021).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования, в анализе научной литературы по теме диссертации, участии в полевых работах и отборе образцов в гранулитовом комплексе Лимпопо и зеленокаменном комплексе Гияни (ЮАР) в 2018 году, проведении экспериментальных исследований на

установке «цилиндр-поршень» в ИЭМ РАН, получении и обработке аналитических данных для природных образцов и продуктов экспериментов, интерпретации результатов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 164 страницах, содержит 5 таблиц и 52 рисунка, состоит из введения, 7 глав, списка литературы, включающего 154 источников и приложения объемом в 8 страниц.

Благодарности. Диссертационная работа подготовлена на кафедре петрологии и вулканологии Геологического факультета МГУ и в Лаборатории магматизма, метаморфизма и геодинамики литосферы Института экспериментальной минералогии им. академика Д.С. Коржинского РАН (ИЭМ РАН). Неоценимую помощь и поддержку на всех этапах работы с диссертацией оказал научный руководитель д.г.-м.н., профессор РАН О.Г. Сафонов. Глубокую признательность автор выражает Д.А. Варламову (ИЭМ РАН) и к.г.-м.н. В.О. Япаскурту (кафедра петрологии и вулканологии Геологического факультета МГУ) за помощь в исследованиях природных образцов и продуктов экспериментов с помощью электронного микроскопа и микрозонда, к.г.-м.н. В.Д. Щербакову (кафедра петрологии и вулканологии Геологического факультета МГУ) за помощь в получении КР спектров включений в гранате, д.г.-м.н. В.Н. Реутскому и к.г.-м.н. О.П. Изох (ИГМ СО РАН) за помощь в проведении анализов на изотопный состав углерода и кислорода карбонатов, к.х.н. В.К. Карандашеву (ИПТМ РАН) за анализы пород на редкие элементы, к.г.-м.н. М.А. Голуновой (ИЭМ РАН) за материалы по флюидным включениям. Автор благодарен проф. Д. Д. ван Риннену и проф. К. А. Смиту (Университет Йоханнесбурга, ЮАР) за организацию и проведение полевых работ в ЮАР в 2018 году, а также за обсуждение результатов исследований, проф. М. Элбург и к.г.-м.н. Г.А. Белянину (Университет Йоханнесбурга, ЮАР) за анализы циркона из гранитоидов на возраст. Автор выражает особую благодарность технику Лаборатории магматизма, метаморфизма и геодинамики литосферы ИЭМ РАН В.М. Полукееву за помощь в подготовке и проведении экспериментов на установке «цилиндр-поршень» в ИЭМ РАН. Автор также благодарен заведующему кафедрой петрологии и вулканологии Геологического факультета МГУ д.г.-м.н. А.Л. Перчуку, академику Л.Я. Арановичу (ИГЕМ РАН) и заведующему лабораторией метаморфизма и метасоматизма ИГЕМ РАН д.г.-м.н. В.М. Козловскому за обсуждение результатов исследований в качестве соавторов и рецензентов статей по теме диссертации.

Исследования, представленные в диссертации, были поддержаны грантом РФФ № 18-17-00206 и грантом РФФИ № 20-35-90013 для аспирантов, а также выполнялись в рамках темы Госзадания ИЭМ РАН (FMUF-2022-0004).

Символы и обозначения минералов: Bt – биотит, Cal – кальцит, Chl – хлорит, Crx – клинопироксен, Dol – доломит, Dsp – диаспор, Grt – гранат, Ilm – ильменит, Kfs – калиевый полевой шпат, Ky – кианит, Mgs – магнезит, Орх – ортопироксен, Pl – плагиоклаз, Prl – пиррофиллит, Qz – кварц.

ГЛАВА 1. РОЛЬ CO₂ В ОБРАЗОВАНИИ ГРАНУЛИТОВ И СОПУТСТВУЮЩИХ ИМ ГРАНИТОИДНЫХ МАГМ

Формирование и эволюция континентальной коры в докембрии, является одной из ключевых проблем современной геологии (Rudnick, Fountain 1995; Gerya, 2014). Неотъемлемой составляющей докембрийской континентальной коры являются высокотемпературные породы гранулитовых комплексов (Rudnick, Fountain, 1995; Gerya, 2014). Такие комплексы, как правило, характеризуются активным и разнообразным по составу гранитоидным магматизмом. Многочисленные полевые, геохронологические и геохимические данные демонстрируют, что значительные объемы гранитоидных магм внедряются в докембрийские гранулитовые комплексы не только на прогрессивной стадии, но и на пике и даже на регрессивной стадии метаморфизма. Существование включений силикатных расплавов (“наногранитоидов”) и включений, содержащих CO₂ и/или карбонатные фазы и графит, в минералах мигматитов наглядно указывают на связь между гранитообразованием и наличием углекислых флюидов в областях высокотемпературного метаморфизма и анатексиса (напр., Cesare et al., 2015; Bartoli, Cesare, 2020; Nicoli, Ferrero, 2021). Экспериментальные данные предоставляют противоречивые результаты о роли углекислых флюидов в гранитообразовании (Wendlandt, 1981; Grant, 1986; Peterson, Newton, 1989, 1990). Тем не менее, наибольшая часть результатов экспериментов демонстрирует негативное влияние CO₂ на частичное плавление в условиях метаморфизма в средней и нижней коре (напр., Clemens et al., 1997). Поэтому возникает резонный вопрос, какова же роль углекислых флюидов в образовании гранитоидных магм и каковы условия их совместного сосуществования. В этом отношении важным вопросом также является выявление источников углекислых флюидов в областях гранулитового метаморфизма и гранитообразования, которые могут быть не связаны с окружающими гранулитами. Исследования петрологических процессов на границах гранулитовых комплексов и кратонов предоставляют хорошую возможность для ответа на эти вопросы.

ГЛАВА 2. ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования основаны на материалах, собранных в 2018 году в ходе полевых работ совместно с сотрудниками Геологического департамента Факультета Наук Университета Йоханнесбурга (ЮАР). В данной работе используются следующие образцы: (1) для изучения полифазных карбонатсодержащих включений - два образца (SA17-22 и SA17-23) лейкократовых гранатсодержащих гранитоидов из Южной Краевой Зоны гранулитового комплекса Лимпопо; (2) для изучения изотопных характеристик карбонатов - пять образцов (17-6, 17-5, 17-8, MAS-18, MAS-13) карбонатсодержащих метаморфических пород различного состава, отобранных из северной части зеленокаменного пояса Гияни; (3) для экспериментальных исследований процессов дегидратации/декарбонатизации и частичного плавления карбонатсодержащих пород как источников водно-углекислых флюидов использовались образцы MAS-18 (карбонат-биотитовый гнейс), 17-6 (карбонат-хлорит-амфиболовый сланец); (4) для дополнительных исследований P-T эволюции пород зеленокаменного пояса Гияни использованы образцы метапелитов этого комплекса: K5, SL22, KLR12, KLR22, SL41.

Петрографическое и минералогическое описания природных образцов проводились с помощью микроскопа NIKON ECLIPSE LV100N POL (в ИЭМ РАН), оснащенного фотокамерой и приставкой для анализа изображений. Валовый химический состав пород на главные элементы определялся методом рентгеноспектрального флуоресцентного анализа (XRF) на вакуумном спектрометре последовательного действия (с дисперсией по длине

волны) PW 2400 производства компании PANalytical в ИГЕМ РАН. Анализы образцов на редкие и рассеянные элементы проводились посредством масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS, XSeriesI) и атомно-эмиссионного метода с индуктивно связанной плазмой (ICP-AES, ICAP-61) в ИПТМ РАН. Микронзондовые исследования природных образцов и продуктов экспериментов проводились с помощью электронного сканирующего микроскопа CamScan MV2300 (VEGA TS 5130MM) с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350 (в ИЭМ РАН) и электронного микроскопа Jeol JSM6480LV, оборудованным энергодисперсионным микроанализатором Link INCA Energy 350 (МГУ). Качественная идентификация минеральных и газовых фаз в полифазных включениях в гранате осуществлялась с помощью рамановской спектроскопии с использованием спектрометра JY Horiba XPloRa Jobin, оснащенного поляризационным микроскопом Olympus BX41, на кафедре петрологии и вулканологии (МГУ). Термометрическое изучение флюидных включений в кварце из лейкократовых гранитоидов проводилось с использованием термокамеры LINKAM THMSG 600 в ИЭМ РАН. Термодинамические расчеты проводились с использованием хорошо зарекомендовавшего себя программных комплексов TWQ_2.32 (Berman, 1990), позволяющего рассчитывать возможные реакции в системах и оценивать их взаимосогласованность и степень равновесности фаз, а также PERPLE_X (Connolly, 2005), основанной на методе минимизации энергии Гиббса для известного валового химического состава породы или ее равновесного участка. Анализ изотопного состава углерода и кислорода карбонатов проводился в ЦКП МИИ СО РАН на базе ИГМ СО РАН (Новосибирск) на масс-спектрометре “Finnigan” MAT-253 в режиме постоянного тока гелия. Экспериментальные исследования проводились на установке «цилиндр-поршень» ЦП-40 (ИЭМ РАН) с использованием ячеек диаметром 1/2 и 3/4 дюйма, изготовленных из NaCl или талька, с вставками из керамики MgO и пирекс-стекла (для опытов выше температуры плавления соли).

ГЛАВА 3. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ГРАНУЛИТОВОГО КОМПЛЕКСА ЛИМПОПО И КРАТОНА КААПВААЛЬ

Гранулитовый комплекс Лимпопо, расположенный на границе Южной Африки, Ботсваны и Зимбабве, является классическим примером неоархейской складчатой области, образовавшейся на границе двух кратонов – Зимбабве на севере и Каапвааль на юге (напр., van Reenen et al., 2011, 2019). На основе структурных и литологических характеристик пород комплекс Лимпопо подразделяется на Северную Краевую зону (СКЗ), Центральную зону (ЦЗ) и Южную Краевую Зону (ЮКЗ). Южная Краевая Зона (ЮКЗ) (рис. 1), объекты в пределах которой рассматриваются в данной работе, сопряжена на юге с северным блоком кратона Каапвааль (блок Питерсбург) вдоль полого падающей региональной зоны сдвиговых пластических деформаций Хоут-Ривер. Эта протяженная зона, образовавшаяся в период времени между 2720 и 2690 млн. лет, направляла надвиг гранулитов ЮКЗ на гранит-зеленокаменные области кратона (напр., van Reenen et al., 2011, 2019) (рис. 1). Породы ЮКЗ, метаморфизованные в условиях гранулитовой фации, составляют висячее крыло зоны Хоут-Ривер, тогда как низкометаморфизованные (зеленосланцевая и амфиболитовая фации) породы кратона Каапвааль служат ее подошвой. В пределах ЮКЗ выделяют две крупные ассоциации пород (напр., van Reenen et al., 2011, 2019): (1) сильнодеформированные мигматизированные тоналит-грондьемитовые гнейсы Бавиансклуф и (2) ультрамафические и мафические гранулиты, метапелиты и породы полосчатых железистых формаций формации Банделиеркоп.

Метаморфическая эволюция ЮКЗ после пика метаморфизма в интервале времени 2720–2690 млн лет связана с эксгумацией гранулитов и надвигом горячего гранулитового

аллохтона на кратон Каапвааль вдоль зоны Хоут-Ривер (Smit et al., 2001; van Reenen et al., 2011, 2019). Исследования *P-T* параметров метаморфической эволюции пород зеленокаменных поясов кратона Каапвааль (в том числе и наши, более подробно представленные в тексте кандидатской диссертации), геофизические данные (De Beer, Stettler, 1992) и результаты моделирования эксгумации гранулитовых комплексов, в применении к комплексу Лимпопо, которое инициируется и сопровождается гравитационным перераспределением пород в архейской коре (Perchuk, Gerya, 2011), указывают на то, что отдельные блоки зеленокаменных поясов погружались на различные глубины в ходе надвига на них гранулитов комплекса Лимпопо. В ходе метаморфизма породы зеленокаменных поясов дегидратировались и, возможно, подвергались плавлению, служа источниками флюидов и магм, впоследствии проникавших в вышележащую ЮКЗ гранулитового комплекса Лимпопо. Эксперименты по частичному плавлению пород зеленокаменных поясов (в том числе проведенные нами – Митяев и др., 2022), таких как двуслюдяные сланцы, содержащие гранат, ставролит, силикаты алюминия, демонстрируют, что температуры, необходимые для образования магм, превосходят 750°C.

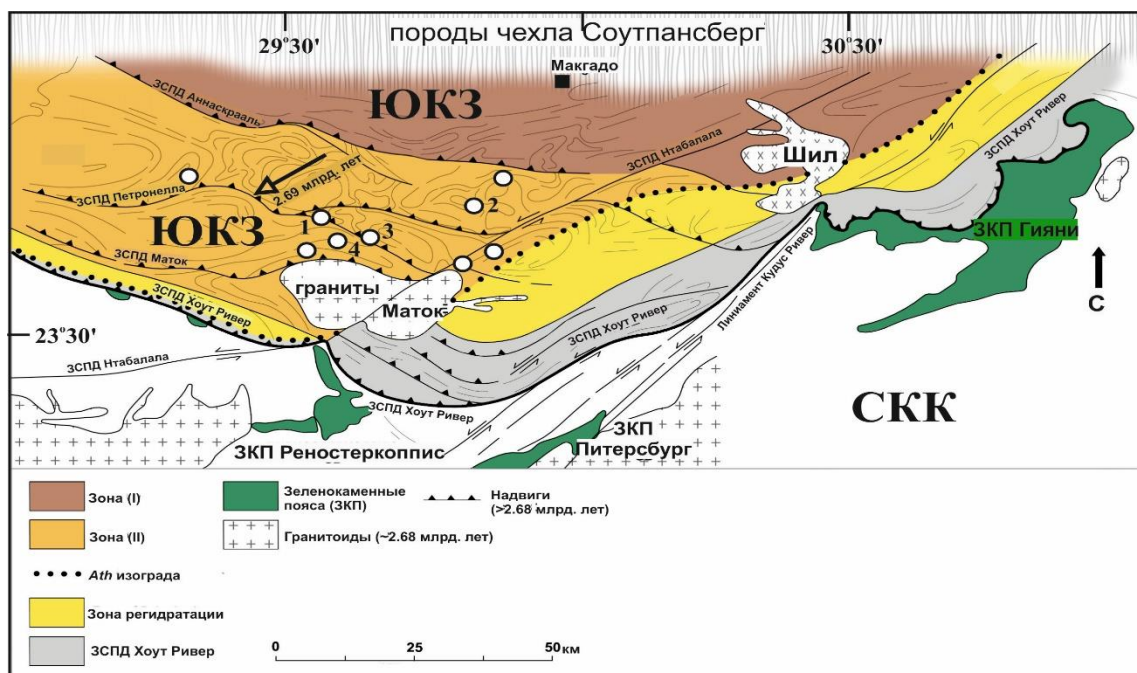


Рис. 1. Схематическая карта Южной Краевой Зоны (ЮКЗ) комплекса Лимпопо, показывающая главные структурно-литологические элементы, метаморфические зоны и интрузивные образования. Белые точки на карте обозначают местоположение наиболее крупных массивов гранатосодержащих лейкократовых гранитоидов, среди которых упомянуты в тексте: 1 – Петронелла, 2 – Бандерлиеркоп, 3 – Клиппут, 4 – Коппискрааль. Зона (I) – метаморфическая зона, в которой сохранились петрологические свидетельства *P-T* трендов декомпрессии-остывания, Зона (II) – метаморфическая зона, в которой сохранились петрологические свидетельства как *P-T* трендов декомпрессии-остывания, так и последующего субизобарического остывания. Стрелка с надписью 2.69 млрд. лет указывает направление надвига ЮКЗ на кратон Каапвааль. ЗСПД – зоны сдвиговых пластических деформаций (shear-zones), ЗКП – зеленокаменные пояса, СКК – северный блок кратона Каапвааль.

ГЛАВА 4. РОЛЬ УГЛЕКИСЛЫХ ФЛЮИДОВ В ФОРМИРОВАНИИ ГРАНИТОИДОВ ЮКЗ КОМПЛЕКСА ЛИМПОПО

В ходе метаморфической эволюции ЮКЗ испытала обширные процессы анатексиса (напр., van Reenen et al., 2014, 2019). Тем не менее, наиболее мощные проявления гранитоидного магматизма в этой зоне комплекса Лимпопо связаны с периодом эксгумации и регрессивного метаморфизма после 2720–2710 млн. лет (Du Toit et al., 1983; van Reenen et al., 2014; Taylor et al., 2014; Nicoli et al., 2015; Safonov et al., 2018). Полевые наблюдения указывают на то, что лейкократовые гранитоиды внедрялись в уже деформированные гранулиты ЮКЗ, а значит не были связаны с их анатексисом самих гранулитов. CO_2 являлся ведущим компонентом флюидов, сопровождавших магмы лейкократовых гранитоидов, внедрявшихся в ЮКЗ на регрессивной стадии развития комплекса. Углекислые включения заметно преобладают в минералах гранитоидов (Safonov et al., 2014, 2018, 2020) (рис. 2). Они обычно представлены псевдотричными разностями, расположенными вдоль залеченных трещин в кварце и гранате. Однако встречаются также плотные ($1.0\text{--}1.1\text{ г/см}^3$) изолированные первичные включения (Safonov et al., 2014, 2018, 2020). Еще одним свидетельством ведущей роли CO_2 во флюидах, сопровождавших внедрение лейкократовых гранитоидов в ЮКЗ, является наличие в породах некоторых массивов графита (Safonov et al., 2018; рис. 3). Он тесно ассоциирует с первичными минералами гранитоидов - гранатом, плагиоклазом, калиевым полевым шпатом, силлиманитом и рутилом.

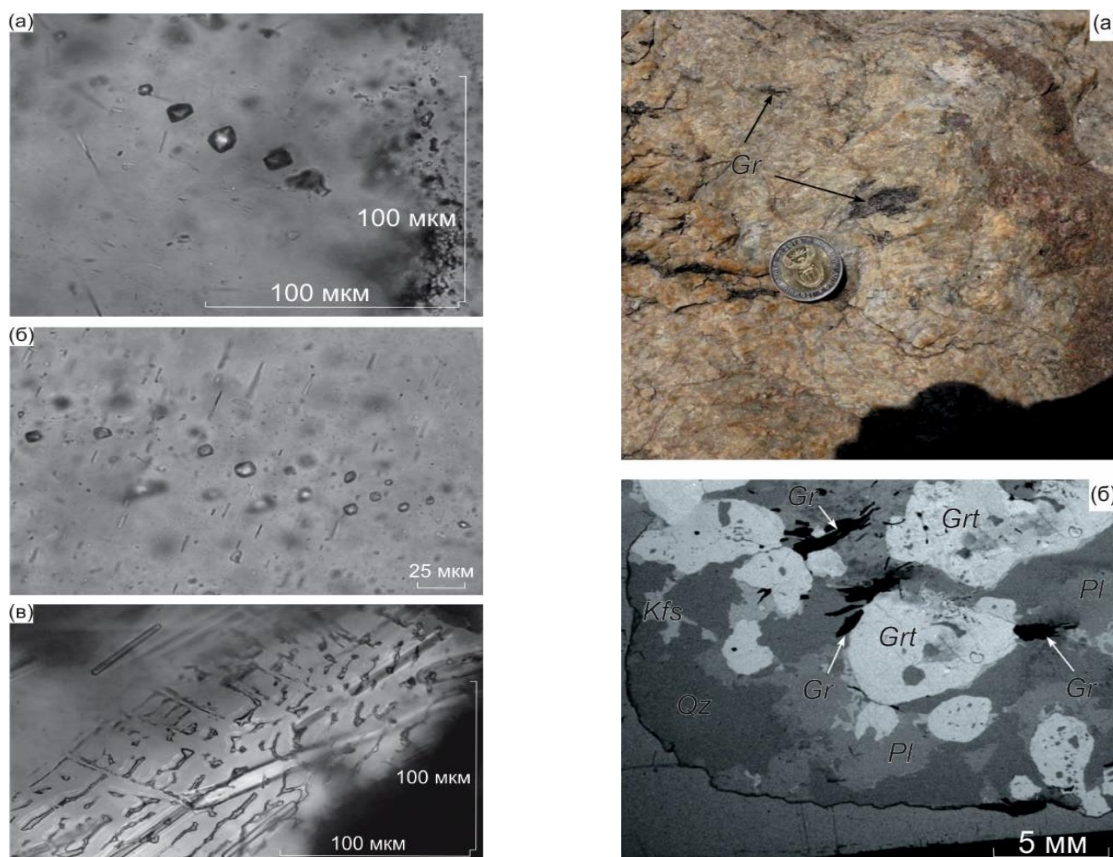


Рис. 2. Включения CO_2 из гранитоидов карьера Банделиеркоп (Safonov et al., 2018). (а) – изолированная группа первичных включений в кварце. (б) – цепочка псевдотричных включений вдоль трещины в кварце. (в) – клиновидные псевдотричные включения в гранате.

Рис. 3. Графит в лейкократовых гранитоидах. (а) – крупные выделения графита в кварц-полевошпатовой матрице гранита из карьера Банделиеркоп (Safonov et al., 2018) вблизи ассимилированного блока метапелита. (б) – ассоциация графита с гранатом в трондjemите.

Приведенные выше примеры подтверждают, что CO_2 являлся ключевым компонентом флюидов, сопровождавших образование гранитоидов. В данной работе представлены дополнительные свидетельства этому – результаты изучения карбонатсодержащих полифазных включений в гранатах из лейкократовых гранитоидов, внедренных в метапелиты гранулитовой фации ЮКЗ (Safonov et al., 2020).

Изучение карбонатсодержащих включений проводилось на примере небольшого массива **гранатсодержащих лейкократовых гранитоидов** (далее массив Клиппут) расположен на территории одноименной фермы. Выход гранитоидов представляет собой холм овальной формы длиной около 200-250 м и шириной 100 м. Обрамлением тела гранитоидов являются метепелиты формации Банделиеркоп. Детально изученные образцы гранатсодержащих гранитоидов (SA17-22 и SA17-23) имеют близкую минеральную ассоциацию, незначительно отличаясь в объемных соотношениях минералов. Гранитоиды являются лейкократовыми породами, преимущественно состоящими из плагиоклаза (50-70 об. %) и кварца (25-50 об. %). Согласно нормативному составу (Le Maitre et al., 2002), гранитоиды соответствуют трондьемитам, однако располагаются вблизи поля гранитов. Калиевый полевой шпат присутствует в виде антипертитовых вростков в центральных частях зерен плагиоклаза и образует каймы по границам зерен плагиоклаза и кварца (рис. 4а). Гранат является главным Fe-Mg минералом в гранитоидах, хотя его содержание не превосходит 5 об. % (рис. 4а). Зерна граната обычно содержат изометричные и субизометричные включения кварца, циркона и ильменита, тогда как плагиоклаз во включениях редок. Ядра зерен граната также содержат как полифазные карбонатсодержание, так и «гранитные» включения. В породе присутствуют различные морфологические типы биотита (рис. 4а-г). Биотит присутствует в основной массе породы в виде отдельных листочков, тесно ассоциированных с калиевым полевым шпатом (рис. 4б-г). Другой тип – это биотит, образующий каймы вокруг граната на контакте с калиевым полевым шпатом в матриксе, что позволяет предположить, что биотит развивался не в результате реакций граната с остаточной жидкостью богатой калием, а при взаимодействии калиевого полевого шпата с гранатом в присутствии водно-углекислого флюида в субсолидусе. Также, биотит присутствует в полифазных «гранитных» включениях вместе с ассоциацией $\text{Pl}+\text{Qz}+\text{Kfs}$.

В минералах гранитоидов Клиппут присутствуют как углекислые, так и водно-солевые включения (Safonov et al., 2020). CO_2 является преобладающим компонентом флюидных включений. Гранитоиды массива Клиппут не содержат ассоциаций Mg-Fe минералов, пригодных для расчета P-T условий их высокотемпературной стадии эволюции. Однако реинтегрированные составы плагиоклаза с антипертитами и щелочных полевых шпатов с пертитами указывают на температуру кристаллизации 800-900°C.

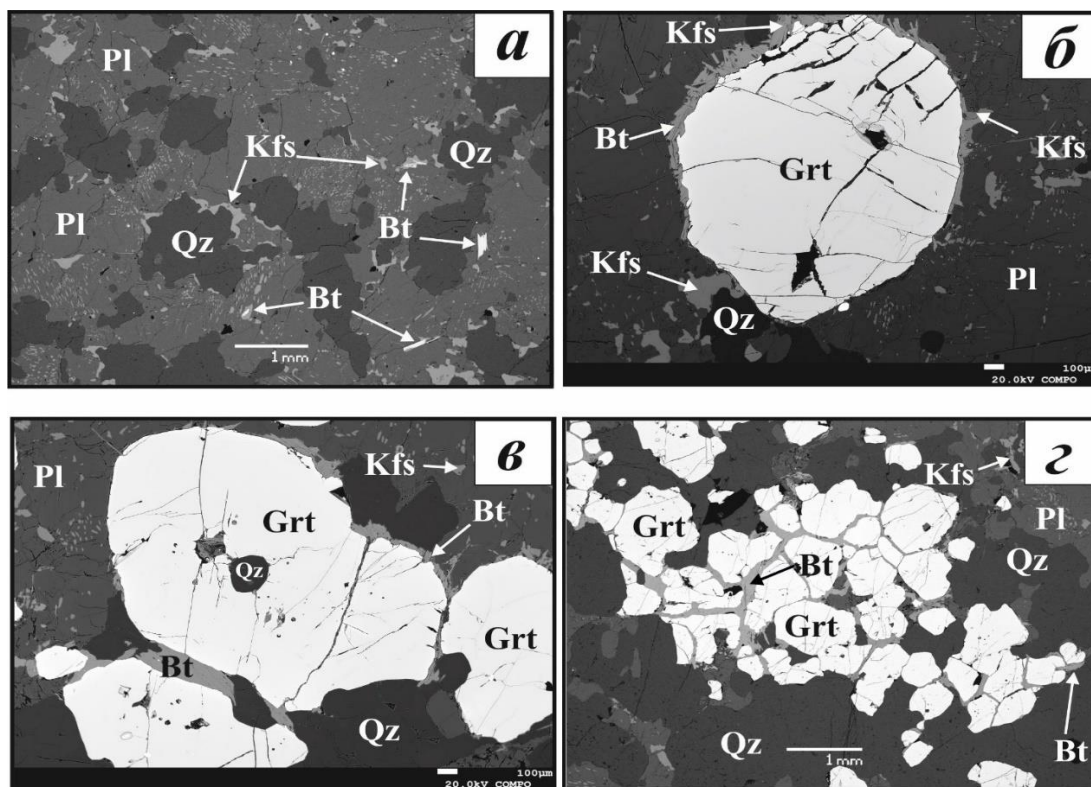


Рис. 4. Петрографические особенности гранитоидов массива Клиппут. (а) Типичная структура гранитоидов; плагиоклазы с обильными антипертитовыми включениями; калиевый полевой шпат, образующий зерна неправильной формы на контактах между плагиоклазом и кварцем; редкие чешуйки биотита, связанные с калиевым полевым шпатом. (б) крупное зерно граната без включений; вокруг зерна граната образуются каймы биотита. (в) группа зерен граната с включениями кварца и многочисленными полифазными силикатными и карбонатсодержащими включениями; зерна граната сцементированы биотитом. (г) Кластер зерен граната, сцементированных биотитом.

Карбонатсодержащие полифазные включения расположены в центральных частях зерен граната в виде многочисленных скоплений округлой формы. Большинство изученных включений полностью заполнены минеральными фазами. Среди них широко распространены карбонаты, которые занимают 40-80 % объема включения (в зависимости от среза). Преобладающим карбонатом является магнезит-сидерит, который образует идиоморфные кристаллы (рис. 5в-д). Магнезиальность $X_{Mg} = Mg/(Mg+Fe+Mn)$ карбонатов в исследуемых включениях варьирует от 0.74 – 0.77 до 0.35 – 0.40, в редких случаях снижаясь до 0.25. Изображения в отраженных электронах некоторых крупных включений показывают четкую Fe-Mg зональность в зернах карбоната (рис. 5в-д). Ядра зональных кристаллов карбоната всегда более богаты Mg, а разница между магнезиальностью центральных и краевых частей может достигать 45-46 мол. %. Содержание Ca в этих карбонатах не превышает 1 мол. %. Однако кальцит (~96 мол. % $CaCO_3$) и Ca-Mg-Fe (~39 мол. % $CaCO_3$) карбонат в ассоциации с Mg-Fe карбонатом были также обнаружены в нескольких включениях (рис. 5е, ж). Главной водосодержащей алюмосиликатной фазой карбонатсодержащих включений является пирофиллит (рис. 5в-ж). Присутствие пирофиллита во включениях было также подтверждено посредством рамановской спектроскопии. Эта фаза образует листочки и их агрегаты между карбонатными фазами, что свидетельствует о кристаллизации пирофиллита после карбонатов. Помимо включений с отчетливыми кристаллическими минеральными фазами, встречаются включения, которые заполнены криптокристаллическим материалом, состоящим, вероятно, из смеси пирофиллита и карбонатов.

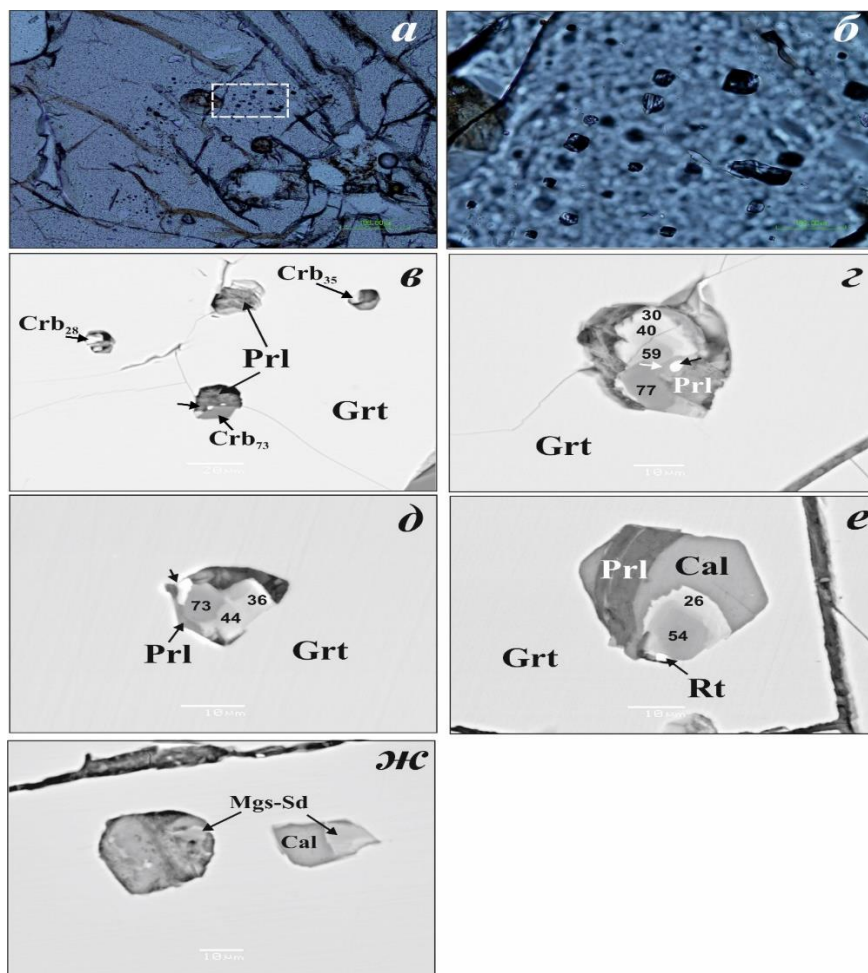


Рис. 5. Карбонатсодержащие полифазные включения в гранате. (а, б) Изображение полифазных карбонатсодержащих включений под оптическим микроскопе при разных увеличениях. (в-ж) Изображения в отраженных электронах полифазных карбонатсодержащих включений. (в) Группа полифазных включений, состоящих из карбонатных фаз и пирофиллита. Черной стрелкой показана Zn-шпинель внутри одного из включений. Номер рядом с обозначением карбоната указывает его магнезиальность. (г). Слегка измененные трещинами включения, состоящие из зональных зерен магнезит-сидеритового карбоната и пирофиллита. Включение содержит Zn-Cu-Fe сульфид (черная стрелка), который окружен Ca-Mg-Fe карбонатом (белая стрелка). (д) Мелкое включение с формой «отрицательного» кристалла, состоящее из зональных карбонатов, пирофиллита и скрытокристаллической фазы, содержащей Al, Ti, Zn, Si, Fe, Mg (вероятно, смесь рутила, Zn-шпинели и пирофиллита). (е) Включение изометричной формы, состоящее из кальцита, рутила, пирофиллита и зональных зерен магнезит-сидерита (цифры отображают магнезиальность). (ж) Два включения: одно состоит исключительно из карбонатов (кальцит и магнезит-сидеритовый карбонат), второе состоит из магнезит-сидеритового карбоната и криптокристаллической смеси пирофиллита и карбонатного вещества.

С помощью рамановской спектроскопии были проанализированы 16 нескрытых карбонатсодержащих включений. В проанализированных включениях выявлены дуплеты, соответствующие CO_2 (~ 1285 и $\sim 1388 \text{ см}^{-1}$) (Frezzotti et al., 2012; Lamadrid et al., 2014). Помимо пиков CO_2 , в рамановских спектрах включений присутствует пик $\sim 2917 \text{ см}^{-1}$ (напр., Frezzotti et al., 2012), соответствующий CH_4 (рис. 6). Широкие полосы в интервале $2700\text{-}3600 \text{ см}^{-1}$ (Frezzotti et al., 2012) указывают на наличие жидкой H_2O (рис. 6), а в области около 1600 см^{-1} могут соответствовать сильно разупорядоченному низкотемпературному углеродистому веществу (напр., Beysac et al., 2002).

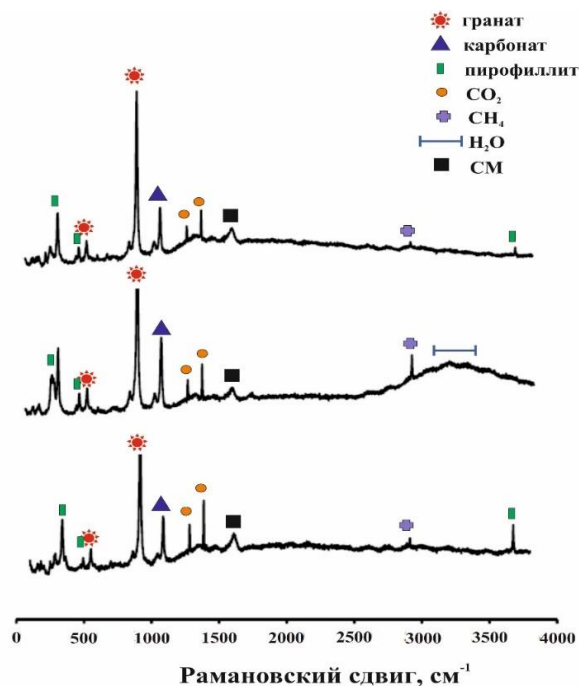


Рис. 6. Рамановские спектры трех нескрытых полифазных включений в гранате, показывающие основные кристаллические фазы (карбонат, пирофиллит), флюидные компоненты (CO₂, CH₄, H₂O) и неупорядоченное углеродистое вещество (СМ).

Составы вскрытых участков карбонатсодержащих включений были измерены с помощью микрондовых анализов по площади. Для измерения использовались хорошо вскрытые и наиболее крупные (20-40 мкм) включения изометричной формы. Измеренные составы находятся вблизи конноды, соединяющей составы карбонатов (Crb) и граната (Grt) в треугольнике (Mg + Fe + Mn + Ca)-Al-Si (рис. 6). Однако коннода смещена от линии, соединяющей составы карбонатов с составом пирофиллита (Prl), отражая избыток Al во включениях. Лишь один анализ из измеренных площадей включений лежит вблизи состава граната (рис. 7): он был выполнен на включении, содержащем в себе осколок граната, который, вероятно, попал во включение при полировке. Все другие измеренные области включений показывают составы, заметно смещенные от состава граната (Grt) к «карбонатному» углу (Crb).

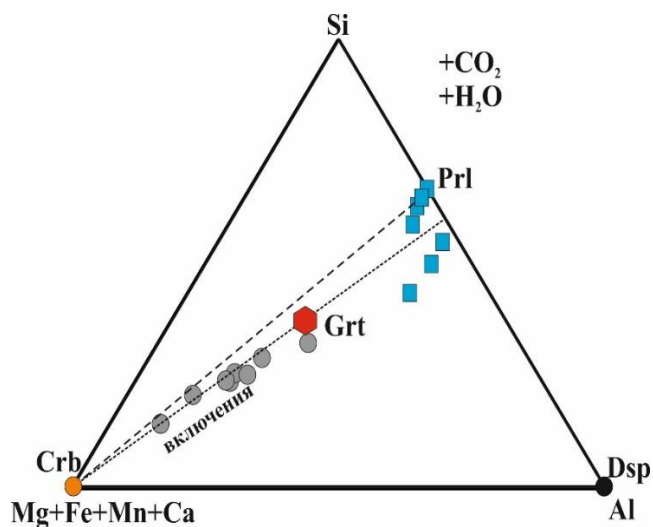


Рис. 7. Соотношение катионов при анализе по площади составов вскрытых включений (серые кружки) в сравнении с составом граната (красный шестиугольник), карбонатов (оранжевый кружок) и пирофиллита (синие квадраты).

В ядрах граната совместно с карбонатсодержащими включениями сосуществуют **полифазные силикатные включения**. Главными минеральными фазами этих включений являются биотит, кварц и плагиоклаз. В некоторых включениях присутствуют калиевый полевой шпат и силикат алюминия (рис. 8а). Текстурные особенности и минеральный состав данных силикатных включений аналогичны характеристикам «наногранитных» расплавных включений, известных в минералах мигматитов (напр., Cesare et al., 2015; Bartoli, Cesare, 2020; Nicoli, Ferrero, 2021).

Помимо силикатных включений, заполненных отличимыми минеральными фазами, гранаты содержат редкие включения, заполненные криптокристаллическим материалом с одиночными чешуйками биотита (рис. 8в). Эти включения имеют форму отрицательного кристалла, характерную для расплавных включений. Концентрические трещины вокруг включений (рис. 8в) указывают на сжатие материала внутри включений при их затвердевании. Для материала включений характерны относительно высокие содержания SiO_2 , и, таким образом, этот тип включений также можно классифицировать как включения силикатного расплава.

Силикатные полифазные включения тесно ассоциируются с карбонатсодержащими полифазными включениями в одном зерне граната (рис. 8в), что свидетельствует об их одновременном захвате.

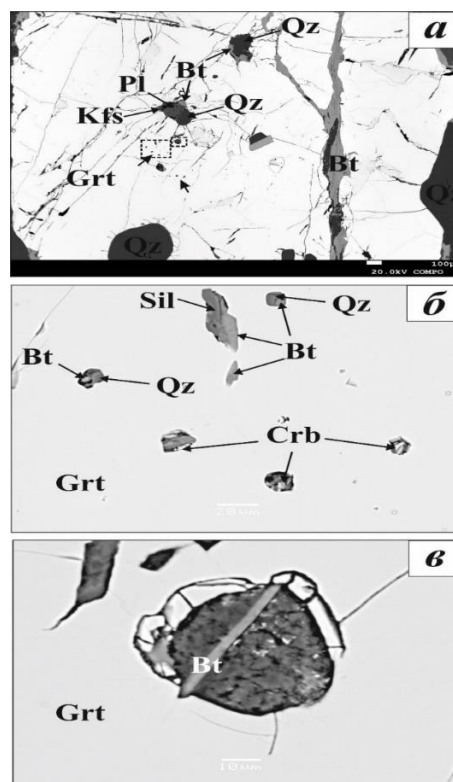
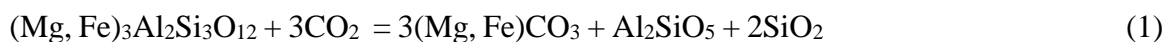


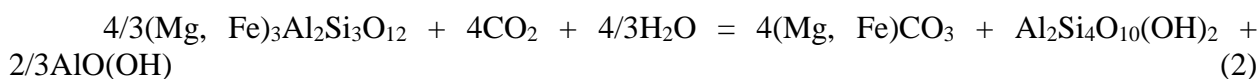
Рис. 8. Силикатные полифазные включения в гранате. (а) Крупные полиминеральные «гранитные» (Bt + Qz + Pl ± Kfs ± Sil) включения неправильной формы, окруженные многочисленными трещинами. (б) Мелкие полифазные силикатные включения, сосуществующие с карбонатсодержащими включениями; некоторые включения обладают формой «отрицательного» кристалла. (в) Силикатное включение, заполненное криптокристаллическим материалом и иголкой биотита; включение окружено концентрическими трещинами.

Природа карбонатсодержащих включений. Среди карбонатсодержащие включений в гранатах из гранитоидов массива Клиппут выделяются две группы: (1) преобладающие включения, состоящие из магнезит-сидерита и пирофиллита, и (2) менее распространенные включения с участием Са-содержащих карбонатов в дополнение к Fe-Mg карбонатам и пирофиллиту. С целью смоделировать фазовую ассоциацию включений, было построено T-X_{CO2} псевдосечение (PERPLE_X) для системы гранат-H₂O-CO₂ в интервале температур 700 - 300°C (рис. 9).

T-X_{CO2} псевдосечение (рис. 8) демонстрирует, что гранат стабилен с флюидом H₂O-CO₂ до температуры примерно 600°C (при X_{CO2} ~ 0.5). Ниже этой температуры гранат разлагается с образованием ассоциации Са-содержащего Fe-Mg карбоната (49.8 об. %), кианита (24.8 об. %) и кварца (25.4 об. %):



При температурах ниже 400°C образуется ассоциация карбоната (45.8 об. %) с пирофиллитом (49.6 об. %) и диаспором (4.7 об. %) согласно реакции:



Эта ассоциация с указанным выше объемным соотношением фаз существует в широком диапазоне состава флюида. Хотя следов диаспора во включениях обнаружено не было, рисунок б показывает, что все измеренные по площади составы включений смещены от коннды Crb-Prl в сторону более высокого содержания Al. Это изменение состава обусловлено избытком Al в скрытокристаллических агрегатах, присутствующих во включениях.

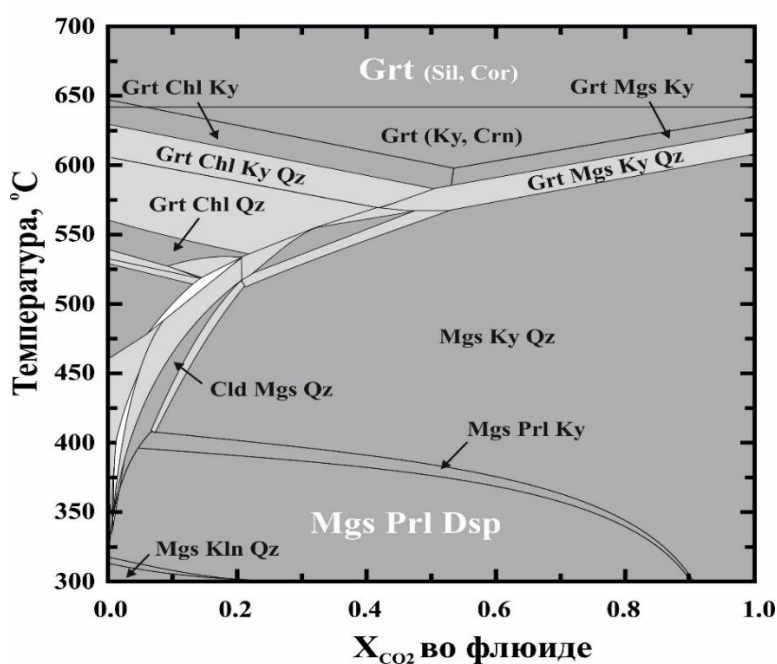
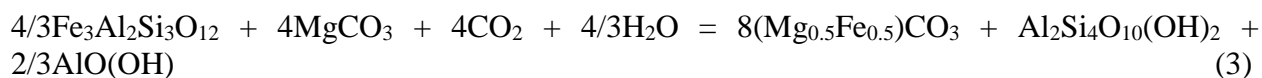


Рис. 9. T-X_{CO2} псевдосечение при 6.5 кбар, иллюстрирующее фазовую ассоциацию, образующуюся при взаимодействии граната-хозяина с захваченным флюидом H₂O-CO₂. Белым шрифтом выделена ассоциация, соответствующая ассоциации включений (Mgs, Prl, Dsp).

Таким образом, реакция (2) и псевдосечение (рис. 9) адекватно воспроизводят главную минеральную ассоциацию внутри включений. Кварц и высокотемпературные глиноземистые фазы, корунд и кианит или их реликты, не обнаружены во включениях. Эта особенность отличает данные включения от включений, описанных Т. Таккетто с соавторами (Tocchetto et al., 2018), которые обнаружили корунд и кварц в карбонатсодержащих включениях. Это говорит о том, что минеральная ассоциация во включениях из гранитоидов массива Клиппут осаждалась при температуре ниже 400°C без каких-либо более высокотемпературных реакций с гранатом-хозяином. Богатый Са карбонат не предсказывается псевдосечением при том содержании СаО, которое было измерено в гранате. Поэтому богатые Са карбонаты, присутствующие в некоторых включениях, осаждались непосредственно из вещества, захваченного во включениях, а не в результате реакций с гранатом или распада твердого раствора карбоната при охлаждении. Значения X_{Mg} карбонатов всегда выше 0.40. Это намного выше, чем 0.29, что ожидается, если бы ассоциация карбонат + пиррофиллит (\pm диаспор) образовалась путем реакции граната-хозяина с CO_2 . Несмотря на различные пропорции карбонатов и пиррофиллита во вскрытых включениях, все полученные составы значительно сдвинуты от граната (Grt) к карбонатной вершине (Crb). Это говорит о том, что включения изначально содержали карбонатную составляющую до реакций включений с гранатом-хозяином. Высокое отношение $Mg/(Mg+Fe+Mn)$ указывает на то, что она была представлена $MgCO_3$. Это подтверждается зональностью дочерних кристаллов карбоната (рис. 5в-г), что позволяет предположить, что богатый Mg карбонат первым выпадал во включениях, а богатые Fe разности кристаллизовались позже. Обогащение карбоната Fe и образование пиррофиллита (ниже 400°C) являются результатами реакции флюида и граната, которую можно представить, например, как



где $MgCO_3$, CO_2 и H_2O являются компонентами исходного флюида, захваченного гранатом.

ГЛАВА 5. ИЗОТОПНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАРБОНАТОВ ПОРОД ЗЕЛЕНОКАМЕННЫХ ПОЯСОВ КАК ИНДИКАТОР ВОЗМОЖНОГО ИСТОЧНИКА ФЛЮИДОВ В ГРАНУЛИТОВОМ КОМПЛЕКСЕ ЛИМПОПО

Приведенное в предыдущей главе рассуждение о природе карбонатсодержащих включений подразумевает внешний источник CO_2 . Одним из потенциальных источников водно-углекислых флюидов, сопутствующих гранитоидному магматизму в ЮКЗ, могли являться карбонатсодержащие породы зеленокаменных поясов кратона Каапвааль, которые погружались под горячие гранулиты (Perchuk et al., 2000; van Reenen et al., 2019). В связи с этим было исследовано пять образцов карбонатсодержащих пород различного состава из северной части зеленокаменного пояса Гияни, прилегающего к ЮКЗ комплекса Лимпопо.

Измеренные значения $\delta^{13}C$ и $\delta^{18}O$ приведены в таблице 1. Значения $\delta^{13}C$ находятся в пределах интервала $\delta^{13}C_{PDB} = -0.5 - -9 \text{ ‰}$, характерных для карбонатов пород архейских зеленокаменных поясов. На рисунке 9 полученные значения $\delta^{13}C$ для карбонатов пород зеленокаменного пояса Гияни сопоставлены с данными по изотопному составу углерода в различных породах ЮКЗ гранулитового комплекса Лимпопо, контактирующей с этим зеленокаменным поясом. Значения $\delta^{13}C$ для доломит-анкерита из метаультрабазита 17-6 (таблица 1) близко к значениям $\delta^{13}C = -5.5 - -6.0 \text{ ‰}$ для магнезита из ультраосновных гранулитов ЮКЗ (van Schalkwyk, van Reenen, 1992) (рис. 9). Однако вряд ли такое совпадение означает наследование карбонатов в гранулитах из ультраосновных пород

зеленокаменных поясов. Магнетит в гранулитах не является минералом пика метаморфизма, а возникал лишь на регрессивной стадии при температурах порядка 620-670°C и давлениях 6 кбар в следствие воздействия водно-углекислых флюидов (van Schalkwyk, van Reenen, 1992). По нашему мнению, совпадение значений $\delta^{13}\text{C}$ указывает, что источником этих флюидов могли быть породы зеленокаменных поясов, погруженные под гранулиты ЮКЗ.

Таблица 1. Значения $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ для карбонатов из пород зеленокаменного пояса Гияни, ЮАР

Образец	Порода	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$
17-6	метаультрабазит	-5.1	14.3
17-8	метабазит	-7.7	12.9
17-5	метабазит	-7.1	13.0
MAS-13	карбонат-биотитовый гнейс	-2.1	17.1
MAS-18	карбонат-биотитовый гнейс	-2.2	17.5

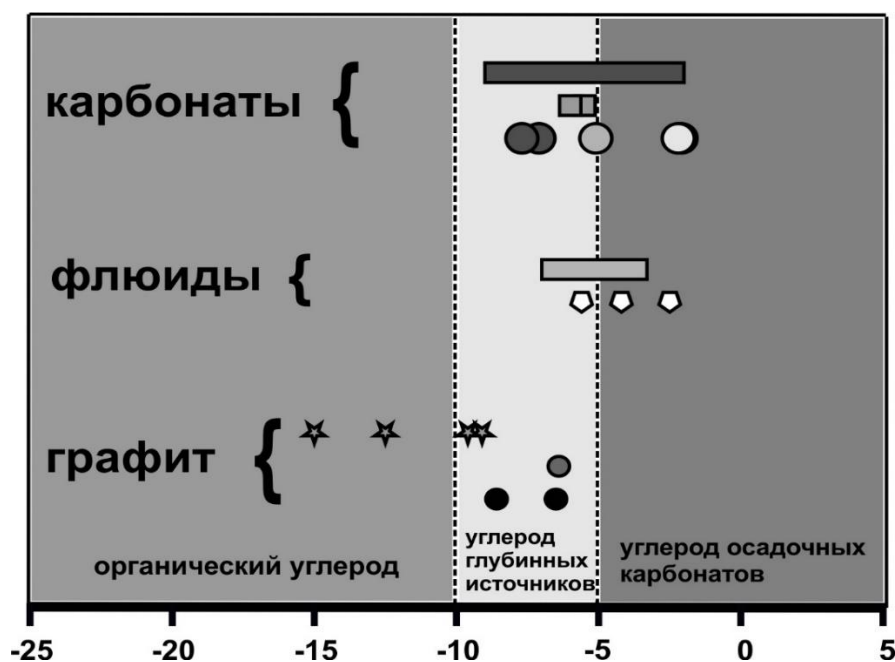


Рис. 10. Изотопный состав углерода карбонатов из изученных пород зеленокаменного пояса Гияни: карбонат-биотитовые гнейсы MAS-13 и MAS-18 (большие белые круги), метаультрабазит 17-6 (большой светло-серый круг), метабазитов 17-5 и 17-8 (большие темно-серые круги). Для сравнения приведены опубликованные данные по $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ графита из метапелитов формации Бандерлиеркоп (Vennemann, Smith, 1992) (звездочки), графита из гранатсодержащей трондjemитовой жилы (Vennemann, Smith, 1992) (маленький серый круг), карбонатов из метаультрабазитовых гранулитов формации Бандерлиеркоп (van Schalkwyk, van Reenen, 1992) (серые квадраты). Темно-серый прямоугольник показывает диапазон $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ гидротермальных карбонатов из зеленокаменных поясов (Sarangi et al., 2012), светло-серый прямоугольник показывает диапазон $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ флюидных включений в кварце и карбонатах гидротермальных жил в зеленокаменных поясах (Sarangi et al., 2012), белые многоугольники - $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ флюидных включений, а маленькие черные круги - $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ графита из лейкократовых гранатсодержащих гранитоидов ЮКЗ комплекса Лимпопо (Safonov et al., 2018).

О.Г. Сафонов с соавторами (Safonov et al., 2018) определили вариации $\delta^{13}\text{C} = -5.6 - -2.5$ ‰ для углерода флюидных включений в минералах и графита из гранатсодержащих лейкократовых гранитоидов ЮКЗ (рис. 9). Верхнее значение этого интервала близко к $\delta^{13}\text{C}$ для карбонатов из карбонат-биотитовых гнейсов MAS-13 и MAS-18 (таблица 1; рис. 9). Нижнее значение же схоже с изотопным составом углерода карбонатов из метаультрабазита 17-6 (таблица 1; рис. 9). Это указывает на то, что флюиды, высвобождавшиеся при метаморфизме ультраосновных пород зеленокаменных поясов, также участвовали в образовании гранитоидных магм, вероятно, в подошве гранулитового комплекса в ходе его взаимодействия с кратоном. Таким образом, полученные изотопные данные подтверждают вывод, сделанный прежде нами на основе изучения карбонатсодержащих включений в гранатах лейкократовых гранитоидов ЮКЗ (Safonov et al., 2020).

ГЛАВА 6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕГИДРАТАЦИИ/ДЕКАРБОНАТИЗАЦИИ И ЧАСТИЧНОГО ПЛАВЛЕНИЯ КАРБОНАТСОДЕРЖАЩИХ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПОРОД ИЗ ЗЕЛЕНОКАМЕННЫХ ПОЯСОВ

Экспериментальное и термодинамическое моделирование процессов дегидратации/декарбонатизации карбонат-хлорит-амфиболового сланца. Вывод о природе карбонатсодержащих включений подразумевает, что флюид, насыщенный MgCO_3 , который кристаллизовался в виде полифазных включений в гранате, должен происходить от источника, обогащенного MgO и CO_2 . Эта композиционная особенность может быть реализована в карбонатсодержащих (магнезит и/или доломитсодержащих) ультраосновных породах. Метаультрабазиты являются важной частью зеленокаменных поясов, расположенных вдоль зоны сдвиговых деформаций Хоут-Ривер, по которой гранулиты ЮКЗ надвинуты на кратон Каапвааль. Для моделирования образования флюида путем дегидратации и декарбонатизации ультраосновного сланца, было рассчитано P-T псевдосечение. Ассоциация ультраосновного сланца, а именно хлорит (~25 об. %) + сосуществующие Mg-Fe и Ca-амфиболы (~64 об. %) + Mg-Fe-Ca карбонат (~9 об. %) + ильменит (~1.5 об. %) (рис. 11а) и незначительное содержание талька, была воспроизведена при температурах ниже 550-570°C в диапазоне давлений 4 - 8 кбар (рис. 10б). Водный флюид начинает образовываться в результате разложения хлорита и амфиболов только при температуре выше 650-670°C (рис. 11б). CO_2 во флюиде появляется за счет разложения карбоната только при температуре выше 750-800°C (рис. 11б).

Чтобы продемонстрировать растворимость различных компонентов в водном флюиде, образовавшегося в результате дегидратации минералов ультраосновного сланца, была использована программа HCh и связанная с ним база термодинамических данных (Shvarov, 2008, 2015). Расчет показывает, что общее содержание Mg-содержащих частиц, включая Mg^{2+} , MgOH^+ , MgCO_3 and MgHCO_3^+ , сильно доминирует над Fe, Ca и Al-содержащими компонентами в равновесии с ассоциациями карбонатсодержащего ультраосновного сланца при температурах 650-670°C. Их концентрация во флюиде увеличивается с давлением и достигает $8 \cdot 10^{-3}$ моль/кг H_2O при 10 кбар (рис. 12). Общая концентрация Mg-частиц во флюиде падает с ростом температуры (рис. 12).

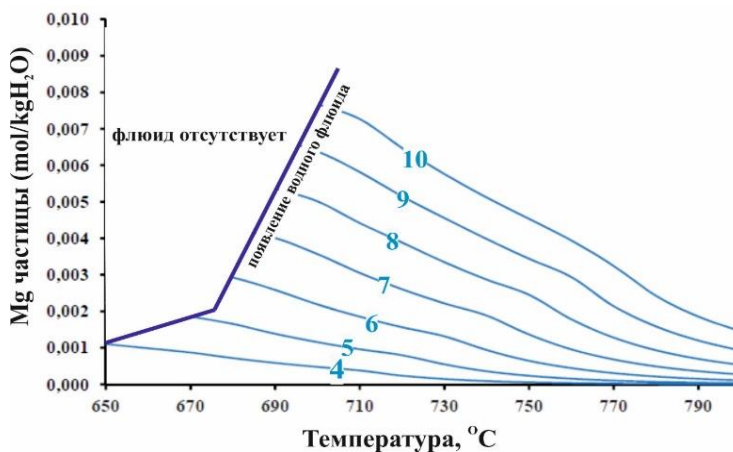
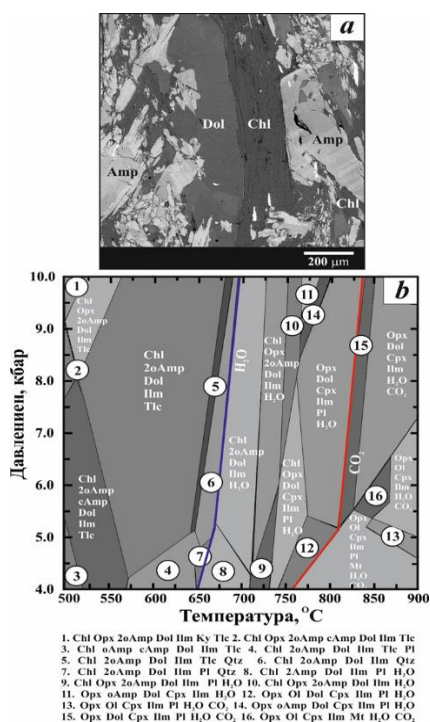


Рис. 11. Ультраосновной хлорит-амфибол-карбонатный сланец из зеленокаменного пояса Гияни как потенциальный источник карбонатсодержащих водно-углекислых флюидов. (а) изображение в отраженных электронах минеральной ассоциации сланца; отчетливо видна неоднородность кристаллов амфибола. (б) P-T псевдосечение, рассчитанное для валового состава ультраосновного сланца (состав см. в тексте). Синяя линия – появление водного флюида. Красная – появление водно-углекислого флюида.

Рис. 12. Общая концентрация (моль на кг H₂O) Mg-содержащих частиц (Mg²⁺, MgOH⁺, MgCO₃ and MgHCO₃⁺) во флюиде, сосуществующем с ассоциациями хлорит-амфибол-карбонатного сланца из зеленокаменного пояса Гияни при соотношении H₂O/CO₂ = 1/1.

Эксперименты с карбонатсодержащим метаультрабазитом, отобранного из зеленокаменного пояса Гияни, проводились при температурах 600, 700 и 800 °C, давлении 7 кбар и длительности экспериментов 7 - 9 суток на установке цилиндр-поршень (ЦП-40) в ИЭМ РАН. При 600 °C заметных изменений в образце не выявлено. При 700 °C в зернах доломит-анкеритового карбоната появляются многочисленные поры, свидетельствующие об его разложении и, вероятно, реакции с водным флюидом, образованном при дегидратации хлорита. Содержание магниальной составляющей карбоната заметно снижается с 0.43 до 0.35, но растет отношение Ca/(Ca+Mg+Fe) до 0.57, указывая тем самым на активное перераспределение магниального карбонатного компонента во флюид. На контактах зерен карбоната с хлоритом и амфиболом появляется ортопироксен. При 800 °C происходит практически полное разложение карбонатных фаз, а на контактах реликтов зерен этих фаз с амфиболом и хлоритом образуются каймы орто- и клинопироксена. Состав реликтового карбоната становится близким к кальциту ($X_{Ca} = 0.80-0.90$).

Экспериментальное и термодинамическое моделирование частичного плавления карбонат-биотитового гнейса. С целью изучения сопряженных процессов дегидратации/декарбонатизации и плавления проведены эксперименты с карбонат-биотитовым гнейсом из зеленокаменного пояса Гияни при давлениях 6, 10 и 15 кбар в температурном интервале 800–950 °C и моделирование фазовых отношений в этой породе посредством метода псевдосечений. Эксперименты и моделирование выявили субвертикальный положительный dP/dT наклон солидуса породы. В сравнении с рассчитанными температурами солидуса эксперименты показали более высокие

температуры начала плавления (~800°C при 6 кбар и ~850°C при 10 и 15 кбар). В продуктах опытов при давлениях 6 и 10 кбар и температурах >850°C выявлены ассоциации клинопироксена, ортопироксена и ильменита, а при давлении 15 кбар ортопироксен и ильменит отсутствуют, но стабильны кальциевый гранат и рутил (рис. 13). Первые порции расплава вблизи солидуса при 6 и 10 кбар представляют собой бедные SiO₂ (44–50 мас. %) расплавы, формирование которых обусловлено участием карбонатных фаз в реакциях плавления. С повышением температуры расплавы приобретают гранитный состав, который близок к составу расплавов, образующихся при плавлении ассоциации плагиоклаз + биотит + кварц без участия карбонатов. С расплавами сосуществует (водно-)углекислый флюид, содержащий Ca–Mg–Fe карбонатные компоненты (рис. 13). Полученные в экспериментах фазовые ассоциации и составы гранитных расплавов согласуются с результатами моделирования. Сравнение результатов экспериментов с литературными данными по частичному плавлению ассоциации плагиоклаз + биотит + кварц без участия карбонатов (Vielzeuf, Montel, 1994; Montel, Vielzeuf, 1997; Patiño Douce, Beard, 1995, 1996; Patiño Douce, 1996) позволяет сделать предварительный вывод о том, что Ca–Mg–Fe карбонаты способствуют понижению температуры плавления. Эксперименты продемонстрировали возможность образования гранитных магм совместно с (водно-)углекислыми флюидами в карбонатсодержащем источнике в условиях высокотемпературного метаморфизма в средней и нижней коре. Присутствие клинопироксена или двупироксеновых ассоциации в гранитоидах может рассматриваться как минералогический индикатор этого процесса.

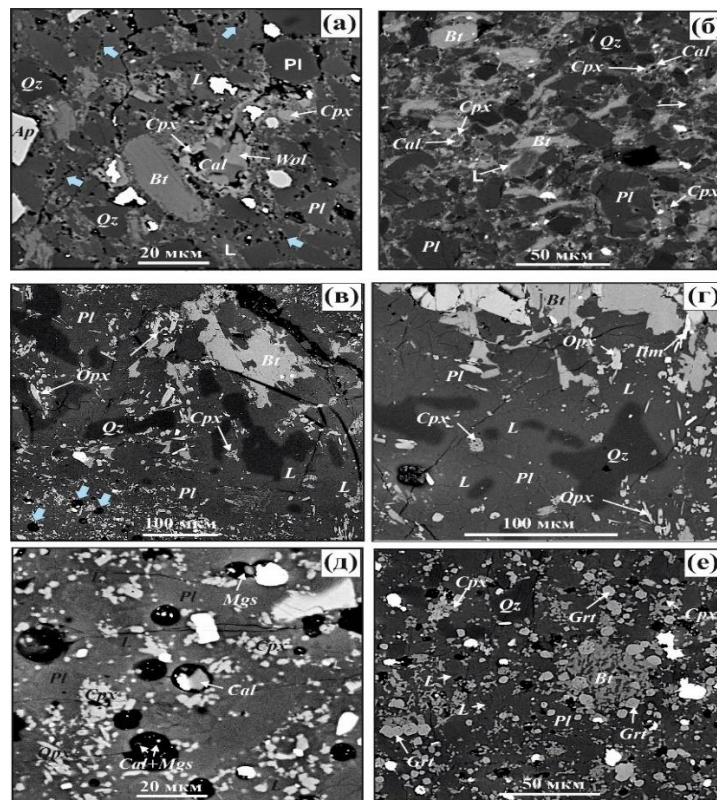


Рис. 13. Фазовые ассоциации в продуктах опытов. (а) Тонкие каймы силикатных фаз (клинопироксен и волластонит) вокруг реликтовых зерен карбоната в продуктах опыта при 6 кбар и 800°C; листочки биотита также окружены каймами, фазовый состав которых трудно определить; участки стекла на границах зерен трассируются мелкими цепочками пор от пузырей флюида (голубые стрелки). (б) Каймы клинопироксена вокруг реликтовых зерен карбоната и биотита в продуктах опыта при 10 кбар и 850°C; закаленный расплав (L) образует тонкие каймы вдоль границ зерен. (в) Ассоциация Cpx + Orx + Ilm + Pl, сосуществующая с расплавом (L) в продуктах опыта при 6 кбар и 900°C; в стекле присутствуют поры от пузырей флюида (голубые стрелки). (г) Ассоциация Cpx + Orx + Ilm + Pl в обширных зонах плавления в продуктах опыта при 10 кбар и 900°C. (д) Закалочные карбонатные фазы в порах от пузырей флюида в стекле из продуктов опыта при 10 кбар и 900°C. (е) Ассоциация Grt + Cpx + Pl в продуктах опыта при 15 кбар и 900°C; пленки закаленного расплава, развитые по границам зерен, часто ассоциируются с округлыми порами от пузырей флюида

ГЛАВА 7. КАРБОНАТСОДЕРЖАЩИЕ МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ ПОРОДЫ КАК ИСТОЧНИКИ СОСУЩЕСТВУЮЩИХ ВОДНО-УГЛЕКИСЛЫХ ФЛЮИДОВ И ГРАНИТОИДНЫХ МАГМ

Проведенные эксперименты наглядно показали, что при плавлении карбонатсодержащего субстрата образуются силикатные расплавы, равновесные с водно-углекислыми флюидами, насыщенными карбонатными компонентами. Эти компоненты высаживаются из флюида в виде дочерних фаз при остывании.

Хотя проведенные эксперименты не воспроизводят составы гранатсодержащих лейкократовых гранитоидов ЮКЗ (для этого необходимы эксперименты с участием более глиноземистых карбонатсодержащих пород), они имеют непосредственное значение для интерпретации процессов гранитоидного магматизма в ЮКЗ комплекса Лимпопо. Они могут быть альтернативной моделью взаимоотношений пироксенсодержащих гранитоидов в ЮКЗ комплекса Лимпопо (Rajesh et al., 2019). В свете проведенных экспериментов этой моделью является плавление метаграувакковых субстратов, по-разному обогащенных Са-Mg-Fe-карбонатами. Следуя этой модели, увеличение доли карбонатной составляющей в субстрате способствует трансформации Орх-содержащих ассоциаций в Сrx-содержащие и увеличению их «мафичности». Такие взаимоотношения действительно характеризуют переходы от Орх-содержащих гранитоидов (72–74 мас. % SiO₂) через дупироксеновые (63–68 мас. % SiO₂) в Сrx-содержащие (~59 мас. % SiO₂) (Rajesh et al., 2019). Эксперименты показали возможность образования таких обедненных SiO₂ расплавов при плавлении биотитового гнейса, содержащего карбонаты.

ВЫВОДЫ

1. Карбонатсодержащие полифазные включения в гранатах из высокотемпературных (800-900°C) лейкократовых гранитоидов массива Клиппут в Южной Краевой Зоне гранулитового комплекса Лимпопо (ЮАР) представляют собой реликты водно-углекислых флюидов, которые сосуществовали с гранитными расплавами в процессе их образования и внедрения в гранулиты ЮКЗ. Нынешний минеральный и химический состав полифазных включений является продуктом взаимодействия этих флюидов с гранатом-хозяином. Несмотря на сильные преобразования во время охлаждения, включения свидетельствуют о изначальном насыщении флюидов Mg-и Са-карбонатными компонентами.
2. Этот факт служит доказательством образования флюидов из богатого MgO и СаO карбонатсодержащего источника. Потенциальными кандидатами являются карбонатсодержащие ультраосновные сланцы из зеленокаменных поясов кратона Каапвааль, которые контактируют с ЮКЗ гранулитового комплекса Лимпопо. Термодинамические и экспериментальные исследования (на примере карбонат-хлорит-амфиболового сланца) показали, что флюиды могли генерироваться при температурах выше 650°C путем дегидратации и декарбонатизации ультраосновных сланцев во время их погружения под гранулиты ЮКЗ, а затем проникать в зоны корового анатексиса, связанного с подъемом гранулитов.
3. На основе сравнения изотопных характеристик углерода карбонатов из карбонатсодержащих метаморфических пород зеленокаменного пояса Гияни с изотопными характеристиками углерода магнезита, возникавшего в ультраосновных гранулитах в ходе взаимодействия комплекса Лимпопо с кратоном, углерода графита и флюидных включений в лейкократовых гранатсодержащих гранитоидах, переносивших флюиды, а также изотопного состава углерода графита из метапелитов ЮКЗ, сделан вывод о том, что

источник углерода находился за пределами ЮКЗ и представлял собой гетерогенный карбонатсодержащий субстрат. Им могли служить карбонатсодержащие вулканогенно-осадочные толщи зеленокаменных поясов кратона Каапвааль, испытавшие проградный метаморфизм при взаимодействии с гранулитами ЮКЗ.

4. Дополнительными источниками флюидов и, возможно, гранитоидных магм, могли служить карбонат-биотитовые гнейсы, содержащие примерно 10-15 об. % карбонатов. Эксперименты продемонстрировали возможность образования гранитных магм совместно с (водно-)углекислыми флюидами в карбонатсодержащем источнике в условиях высокотемпературного метаморфизма в средней и нижней коре. Присутствие клинопироксена или двупироксеновых ассоциации в гранитоидах может рассматриваться как минералогический индикатор этого процесса.

5. Данные, представленные в этой работе, иллюстрируют флюидно-магматическое взаимодействие докембрийского гранулитового комплекса с кратоном вдоль их контакта.

По теме диссертации опубликованы следующие статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных АК МГУ:

1. Митяев А. С., Сафонов О.Г., Варламов Д.А., ван Ринен Д.Д. (2022) Частичное плавление карбонат-биотитового гнейса в условиях континентальной коры: экспериментальное и термодинамическое моделирование. *Петрология*. Т. 30, № 3, с. 281-308. DOI: 10.31857/S0869590322030062 (1.57 авт. л.). [*Импакт-фактор RINC 2.185*]. Доля участия 0.8.
2. Митяев А.С., Сафонов О.Г. Варламов Д.А., ван Ринен Д.Д., Сердюк А.А., Аранович Л.Я. (2022) Частичное плавление бесплаггиоклазового гранат-двуслюдяного метапелита как модель образования ультракалиевых кислых магм в условиях континентальной коры. Доклады РАН. Науки о Земле. Т. 507. №. 2. с. 95-103. DOI: 10.31857/S2686739722601703 (1.15 авт. л.). [*Импакт-фактор RINC 0.965*]. Доля участия 0.8.
3. Safonov O.G., Mityaev A.S., Yapaskurt V.O., Belyanin G.A., Elburg M., Rajesh H.M., Golunova M.A., Shcherbakov V.D., Butvina V.G., van Reenen D.D., Smit A.C. (2020) Carbonate-silicate inclusions in garnet as evidence for a carbonate-bearing source for fluids in leucocratic granitoids associated with granulites of the Southern Marginal Zone, Limpopo Complex, South Africa. *Gondwana Research*. V. 77, pp. 147-167. DOI: 10.1016/j.gr.2019.07.012 (1.87 авт. л.). [*Impact Factor JCR 6.151*]. Доля участия 0.5.
4. Митяев А. С., Сафонов О.Г., Реутский В.Н., Изох О.П., Варламов Д.А., Козловский, В.М., Аранович Л.Я. (2020) Изотопные характеристики карбонатов пород зеленокаменных поясов как индикатор возможного источника флюидов в гранулитовых комплексах докембрия: пример из зеленокаменного пояса Гияни и гранулитового комплекса Лимпопо (ЮАР). Доклады РАН. Науки о Земле. Т. 492, №. 1. с. 66-70. DOI: 10.31857/S2686739720050151 (0.86 авт. л.). [*Импакт-фактор RINC 0.965*]. Доля участия 0.8.
5. Сафонов О. Г., ван Риннен Д. Д., Япаскерт В. О., Варламов Д. А., Митяев А. С., Бутвина В. Г., Голунова М. А., Белянин Г. А., Смит К. А. (2018) Термальные и флюидные эффекты гранитоидных интрузий, воздействующие на гранулитовые комплексы: примеры из Южной Краевой Зоны комплекса Лимпопо (ЮАР). *Петрология*. Т. 25, № 3, с. 633-658. DOI: 10.1134/S0869590318060079 (1.76 авт. л.). [*Импакт-фактор RINC 2.185*]. Доля участия 0.3.

По теме диссертации опубликованы тезисы 24 докладов, основные из которых:

1. Митяев А.С., Сафонов О.Г., Варламов Д.А., Япаскурт В.О., ван Риннен Д.Д. (2019) Карбонатсодержащие породы зеленокаменных поясов кратона Каапвааль как источники водно-углекислых флюидов при гранитоидном магматизме Южной Краевой Зоны гранулитового комплекса Лимпопо, ЮАР. *Материалы X Всероссийской школы молодых ученых «экспериментальная минералогия, петрология и геохимия»*, г. Черноголовка, с. 92-93.
2. Митяев А.С., Сафонов О.Г., Варламов Д.А. (2022) Влияние карбонатов и водно-углекислых флюидов на процессы гранитообразования при высокотемпературном метаморфизме: природные, экспериментальные и термодинамические данные. *Материалы XII Международной школы по наукам о Земле имени профессора Л.Л. Перчука (ISES-2022), 7-19 сентября*. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, с. 63-63.
3. Митяев А.С., Сафонов О.Г., Варламов Д.А. (2022) Экспериментальное и термодинамическое изучение процессов дегидратации/декарбонатизации пород в условиях высокотемпературного метаморфизма. *Тезисы докладов Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии (ВЕСЭМПГ-2022)*, ГЕОХИ РАН Москва, том 1, с. 88-88.
4. Mityaev A.S., Safonov O.G., Varlamov D.A. (2021) Experimental study of generation of granite melt and aqueous-carbonic fluid in carbonate-bearing pelitic protholith at the mid-crustal conditions. *Metamorphic Studies Group 40th Anniversary Meeting Abstracts*. С. 28-28.
5. Митяев А.С., Сафонов О.Г., Варламов Д.А. (2021) Экспериментальное изучение метаморфических преобразований и частичного плавления карбонатсодержащего метапелита при 10 кбар. *Материалы XXIX всероссийской молодежной конференции «Строение литосферы и геодинамика»*, г. Иркутск, с. 179-181.
6. Митяев А.С., Сафонов О.Г., Япаскурт В.О., Щербаков В.Д., ван Риннен Д.Д., Смит К.А. (2018) Включения карбонатно-силикатных и гранитных расплавов в гранатах гранитоидов южной краевой зоны гранулитового комплекса Лимпопо, ЮАР. *Сборник материалов IX Всероссийской школы молодых ученых "Экспериментальная минералогия, петрология и геохимия"*, г. Черноголовка, с. 59-61.
7. Митяев А.С., Сафонов О.Г., Варламов Д.А. (2022) Экспериментальное изучение процессов дегидратации/декарбонатизации и частичного плавления карбонатсодержащих метаморфических пород в условиях континентальной коры. *Материалы Российской конференции с международным участием «Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения – 2022)»*, г. Сыктывкар, с. 89-90.