

На правах рукописи



НОВОСЕЛОВ Иван Дмитриевич

**ОБРАЗОВАНИЕ ГРАНАТОВ В РЕАКЦИЯХ ДЕКАРБОНАТИЗАЦИИ И ИХ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С CO₂-H₂O-ФЛЮИДАМИ ПРИ P,T-ПАРАМЕТРАХ
ЛИТОСФЕРНОЙ МАНТИИ**

Специальность 1.6.4.- «Минералогия, кристаллография. Геохимия,
геохимические методы поисков полезных ископаемых»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата геолого-минералогических наук

НОВОСИБИРСК – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН), г. Новосибирск

Научный руководитель: Пальянов Юрий Николаевич,
член-корреспондент РАН,
доктор геолого-минералогических наук,
заведующий лабораторией экспериментальной
минералогии и кристаллогенезиса ИГМ СО РАН;

Официальные оппоненты: **Шарыгин Игорь Сергеевич,**
кандидат геолого-минералогических наук,
заведующий лабораторией петрологии, геохимии и
рудогенеза Института земной коры СО РАН,
г. Иркутск;

Перчук Алексей Леонидович,
доктор геолого-минералогических наук,
заведующий кафедрой петрологии и вулканологии
Московского государственного университета имени
М.В. Ломоносова, г. Москва

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт экспериментальной минералогии имени академика Д.С. Коржинского РАН, г. Черноголовка

Защита состоится «18» октября 2024 года в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.1.050.02, созданного на базе ФГБУН ИГМ СО РАН, в конференц-зале.

Отзыв в одном экземпляре, оформленный в соответствии с требованиями Минобрнауки России, просим направлять по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр-т ак. Копылова, 3, Гаськовой О.Л. Тел./факс: +7 (383) 373-03-28; +7(383) 373-05-61 e-mail: gaskova@igm.nsc.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБУН ИГМ СО РАН https://www.igm.nsc.ru/images/diss/loadfiles_dzubenko/novoselov/dis-Novoselov.pdf.

Автореферат разослан «12» августа 2024 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета,

д.г.-м.н.



О.Л. Гаськова

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследований

Экспериментальное моделирование процессов фазообразования в зонах субдукции и в субконтинентальной литосфере при высоких P,T-параметрах является актуальным направлением в минералогии, петрологии и геохимии мантии Земли. По современным представлениям, реакции декарбонатизации являются важным источником флюида в мантии. При декарбонатизации помимо CO₂-флюида образуются различные силикаты (Newton, Sharp, 1975; Wyllie, 1979; Eggler, 1978; Wyllie et al., 1983; Luth, 1995; Koziol, Newton, 1998; Knoche et al., 1999; Pal'yanov et al., 2005), среди которых особую роль играют гранаты. Гранаты входят в состав как ультраосновных (лерцолиты, гарцбургиты), так и основных (эклогиты, пироксениты) пород, и при этом они демонстрируют крайне широкие вариации составов (Haggerty, 1995; McDonough, Rudnick, 1999; Похиленко и др., 2001; Шацкий и др., 2010), что представляет генетическую информацию для реконструкции процессов минералообразования в мантии (Wood et al., 2013), включая метасоматические воздействия и реакции алмазообразования. В качестве верхнемантийных метасоматических агентов часто рассматриваются углекислый и водно-углекислый флюиды, что обосновано находками флюидных включений, содержащих CO₂ и H₂O, в природных алмазах (Navon, 1991; Томиленко и др., 2001; Klein-BenDavid et al., 2007; Smith et al., 2015; Sobolev et al., 2019; Tomlinson et al., 2007; Weiss et al., 2022) и мантийных силикатах (Andersen, Neumann, 2001; Frezzotti, Touret, 2014; Буйкин и др., 2014; Elazar et al., 2021).

Несмотря на важную роль процессов карбонатизации-декарбонатизации в эволюции мантийных пород (Luth, 1993), до последнего времени исследование реакций декарбонатизации с образованием граната было проведено только для чистого магнетита (Knoche et al., 1999). При этом, в субдуцируемых осадках – основном транспортёре карбонатов в мантию, преобладают кальцит/арагонит (Plank, Manning, 2019). В значимых количествах в океанической коре могут присутствовать родохрозит (Frezzotti et al., 2011; Nakagawa et al., 2011), доломит (Robinson et al., 1977), сидерит и анкерит (Laverne, 1993). Экспериментальные данные по взаимодействию гранатов из эклогитов и перидотитов литосферной мантии, с CO₂-H₂O-флюидами практически отсутствуют. Таким образом, актуальными являются экспериментальные исследования, направленные на (1) моделирование процессов декарбонатизации с участием Ca-Mg-Fe-Mn карбонатов, сопряжённых с формированием гранатов переменных составов и на (2) изучение фазообразующих процессов при взаимодействии гранатов мантийных парагенезисов с CO₂-H₂O-флюидами.

Цель работы:

Экспериментальное определение параметров декарбонатизации, сопряжённых с формированием гранатов, а также изучение реакционных взаимодействий гранатов мантийных парагенезисов с углекислым и водно-углекислым флюидами при P,T-параметрах литосферной мантии Земли.

Основные задачи:

- Проведение анализа результатов предшествующих исследований, посвящённых вопросам стабильности в мантии минералов групп граната, кальцита и доломита, а также CO_2 -содержащих флюидов.
- Отработка методик экспериментальных исследований с CO_2 - и $\text{H}_2\text{O-CO}_2$ -флюидами при высоких P,T-параметрах, включающих применение внешнего буферирующего гематитового контейнера и платиновых ампул, футерованных графитом.
- Установление P,T-параметров реакций декарбонатизации, сопровождающихся образованием гранатов в интервале температур 850-1550 °C при давлениях 3,0, 6,3 и 7,5 ГПа.
- Экспериментальное определение основных закономерностей фазообразующих процессов (включая рост алмаза и графита) при взаимодействии гранатов мантийных парагенезисов с углекислым и водно-углекислым флюидами.
- Выявление индикаторных характеристик гранатов, подвергшихся мантийному метасоматозу с участием CO_2 - и $\text{H}_2\text{O-CO}_2$ -флюидов, и сопоставление полученных экспериментальных результатов с данными по природным объектам.

Предмет исследования – реакции декарбонатизации, сопровождающиеся формированием гранатов и процессы взаимодействия гранатов мантийных парагенезисов с $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ -флюидами.

Объект исследования – образцы, полученные в высокобарических высокотемпературных экспериментах.

Фактический материал

Проведено 50 длительных экспериментов при высоких P,T-параметрах, выполнено более 100 микрондовых и более 4500 энергодисперсионных анализов, получено более 100 КР-спектров. Изучение фазовых взаимоотношений выполнено методами оптической и электронной сканирующей микроскопии на сколах и полированных поверхностях образцов, сделано более 400 фотографий.

Защищаемые положения

1. При давлениях 3,0, 6,3 и 7,5 ГПа температуры реакций декарбонатизации, сопровождающихся формированием гранатов, возрастают от 875 до 1500 °C в ряду $\text{MnCO}_3 \rightarrow \text{FeCO}_3 \rightarrow \text{MgCO}_3 \rightarrow \text{CaCO}_3$. Минимальная температура карбонатизации модельных эклогитовых гранатов увеличивается от 1000 °C при давлении 3,0 ГПа, до 1150-1250 °C – при 6,3 ГПа, и до 1400 °C – при 7,5 ГПа.

2. Взаимодействие гранатов мантийных парагенезисов с углекислым флюидом при давлении 6,3 ГПа в интервале температур 950-1550 °C включает процессы растворения, перекристаллизации и карбонатизации граната. Индикаторными характеристиками гранатов, перекристаллизованных при участии CO_2 -флюида, являются включения карбонатов и CO_2 -флюида, а также появление зональных индивидов с каймами, обогащенными гроссуляровым компонентом при $T \leq 1250$ °C и обедненными им – при $T \geq 1350$ °C.

3. При взаимодействии гранатов мантийных парагенезисов с водно-углекислым флюидом ($\text{CO}_2 : \text{H}_2\text{O} = 3:2$ мол.) при давлении 6,3 ГПа в температурном диапазоне 950-1550 °С образуется ассоциация гранат±карбонат±кианит±коэсит и обогащенный Са карбонатно-силикатный расплав. Для гранатов характерна зональность с повышением содержания гроссулярового компонента в периферических зонах при $T = 950$ °С и его понижением – при $T \geq 1050$ °С, а также включения карбоната, кианита, коэсита, CO_2 -флюида и фазы $(\text{Al,Cr})_2\text{O}_3$.

4. В системах гранат- CO_2 -С и гранат- H_2O - CO_2 -С, моделирующих природные алмазообразующие среды, при 6,3 ГПа рост алмаза на затравку осуществляется при температурах ≥ 1250 °С и ≥ 1150 °С, соответственно, а метастабильный графит кристаллизуется в интервале температур 950-1550 °С. Стабильной формой роста кристаллов алмаза для обеих систем является октаэдр, а скорости его роста увеличиваются от 0,013 мкм/час до 0,800 мкм/час при возрастании температуры с 1150 °С до 1550 °С.

Научная новизна

1. Определены P,T-параметры реакций декарбонатизации родохрозита, магнезита, магнезиосидерита, смеси сидерита и магнезита в пропорции 1:1, анкерита, доломита, а также карбонатов ЕСI и ЕСII, моделирующих катионный состав гранатов из эклогитов группы I и II (Yaxley, Brey, 2004);

2. Впервые экспериментально установлены индикаторные характеристики гранатов, подвергшихся модельному метасоматическому воздействию CO_2 - и H_2O - CO_2 -флюидов при P,T-параметрах литосферной мантии;

3. Определены граничные условия кристаллизации алмаза и метастабильного графита в системах гранат- CO_2 -С и гранат- H_2O - CO_2 -С, а также скорости роста алмаза в зависимости от температуры.

Практическая значимость

Экспериментально установленные закономерности изменения состава гранатов могут быть применены как маркеры метасоматических изменений глубинных пород, а также использованы при построении моделей мантийного метасоматоза.

Апробация работы

Результаты работы представлены на международной конференции XIX international meeting on crystal chemistry, X-ray diffraction and spectroscopy of minerals, Апатиты, 2019, Всероссийском ежегодном семинаре по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии, Москва (ВЕСЭМПГ-2021 и 2022), XVIII Российском Совещании по экспериментальной минералогии, Иркутск, 2022 и на X Международной сибирской конференции молодых ученых по наукам о Земле, Новосибирск, 2022. Основные положения диссертации опубликованы в 6 статьях в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базе данных Web of Science: Геология и геофизика (2), Minerals (3) и Lithos (1).

Исследования выполнены по государственному заданию ИГМ СО РАН (проект № 122041400159-3). Отдельные этапы работы были поддержаны грантами

РФФИ (проект № 18-35-20016 мол_а_вед, исполнитель) и РФФИ (проект № 19-17-0075, исполнитель).

Соответствие результатов работы научным специальностям.

Результаты работы соответствуют пунктам 1, 3 и 15 паспорта научной специальности 1.6.4 «Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых».

Структура и объём работы

Работа состоит из введения, 7 глав и заключения. Диссертация изложена на 214 страницах и сопровождается 116 иллюстрациями и 33 таблицами. Список литературы включает 289 наименований.

Работа выполнена в лаборатории № 453 экспериментальной минералогии и кристаллогенезиса ИГМ СО РАН под руководством зав. лаб. член-корр. РАН д.г.-м.н. Юрия Николаевича Пальянова, которому автор выражает свою глубокую признательность.

Автор искренне благодарит д.г.-м.н. Ю.В. Баталеву, д.г.-м.н. А.Г. Сокола, к.г.-м.н. Ю.М. Борздова, к.г.-м.н. А.Н. Крука, д.г.-м.н. А.Ф. Хохрякова, н.с. Д.В. Нечаева, с.н.с. И.Н. Куприянова, Т.В. Молявину и весь коллектив лаборатории № 453 за всестороннюю помощь на всех этапах выполнения работы. За содействие в проведении аналитических работ автор благодарит к.г.-м.н. Е.Н. Нигматуллину, д.г.-м.н. В.Н. Реутского и М.В. Хлестова. Автор признателен академику РАН В.С. Шацкому, к.г.-м.н. П.А. Неволько, к.г.-м.н. Л.М. Житовой и Центральному Сибирскому геологическому музею за предоставление образцов.

Обозначения, принятые в работе:

Grt – гранат, Grt_{EC} – эклогитовый гранат, Grt_{LZ} – лерцолитовый гранат, Ptp – пироп, Alm – алмадин, Sps – спессартин, Grs – гроссуляр, Ksp – кноррингит, Uv – уваровит, Ky – кианит, Coe – коэзит, Carb – карбонат, Arg – арагонит, Cal – кальцит, Sd – сидерит, Mgs – магнезит, Rds – родохрозит, Dm – алмаз, Gr – графит, Melt – карбонатно-силикатный расплав, Fluid – CO₂-флюид с растворёнными компонентами.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРЕДШЕСТВУЮЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

По современным представлениям, верхняя мантия Земли сложена перидотитами и, в меньшей степени, эклогитами и пироксенитами (Nixon, 1987; Haggerty, 1995; Shirey et al., 2013). Во всех этих породах содержится до 50 % граната, который может быть стабильным до глубин в 670 км (Ringwood, Major, 1971; Irifune et al., 1996).

Стабильными фазами углерода в мантии могут быть графит или алмаз, карбиды (Frost, McCammon, 2008), углеводороды (Sobolev et al., 2019), CO₂-флюид и карбонаты (Luth, 1999; Brenker et al., 2007). Экспериментальные исследования демонстрируют достаточно широкие поля устойчивости карбонатов (Шацкий и др., 2015). Обосновано, что в процессах субдукции многие карбонаты стабильны до глубин более 600 км (Shirey et al., 2013). Изучение флюидных включений в алмазах (Giardini, Melton, 1975; Melton, Giardini, 1975; Томиленко и др., 2001; Weiss et al., 2022) показало, что распространёнными компонентами в них являются

CO₂ и H₂O. Они играют важную роль в процессах эволюции и преобразования пород литосферной мантии Земли, в том числе в алмазообразовании и мантийном метасоматозе (Navon, 1991; Schrauder and Navon, 1993; Томиленко и др., 2001; Andersen, Neumann, 2001; Буйкин и др., 2014; Frezzotti, Touret, 2014; Weiss et al., 2022).

В целом анализ предшествующих работ свидетельствует о распространённости и важности для мантийного минералообразования (включая кристаллизацию алмаза) процессов взаимодействия гранатосодержащих пород с водно-углекислыми флюидами и реакций декарбонатизации, сопровождающихся формированием гранатов.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА

Эксперименты проведены на беспрессовой многопуансонной аппаратуре высокого давления «разрезная сфера» (БАРС) (Malinovsky et al., 1989; Пальянов и др., 1990, 1997) при давлениях 3,0, 6,3 и 7,5 ГПа, температурах 850-1550 °С и длительностях от 15 минут до 100 часов. Платиновые ампулы с исследуемым веществом помещали в графитовый нагреватель и устанавливали в ячейке высокого давления размером 21,1×21,1×25,4 мм (3,0 и 6,3 ГПа) или 19×19×22 мм (7,5 ГПа). Детали калибровки Р,Т-параметров представлены в (Pal'yanov et al., 2002; Sokol et al., 2015). Измерение температуры проводили с помощью PtRh₆/PtRh₃₀-термопар, размещённых вблизи платиновых ампул.

При проведении ряда экспериментов было важно минимизировать взаимодействие железосодержащих фаз с платиной, а также обеспечить герметичность ампул, что достигнуто посредством использования платиновых ампул с внутренними графитовыми капсулами. Установлено, что в процессе длительных высокотемпературных экспериментов осуществляется инфильтрация карбонатно-силикатных расплавов и флюидов в стенки графитовых капсул, интенсивность которой находится в прямой зависимости от температуры и длительности, что необходимо учитывать в петрологических экспериментах.

Особое внимание было уделено методическим аспектам, направленным на поддержание стабильного состава флюида в экспериментах с CO₂-содержащими средами. Для этого применена методика, включающая использование гематитового буферизирующего контейнера, предотвращающего диффузию водорода в платиновые ампулы.

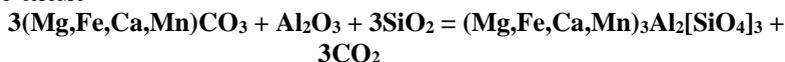
В качестве исходных веществ для экспериментов использованы природные карбонаты (в том числе смеси карбонатов ЕСI и ЕСII, моделирующие катионный состав гранатов модельных карбонатизированных эклогитов), синтетические SiO₂ и Al₂O₃ (чистота не менее 99,9 %) и природные гранаты из ксенолитов лерцолита и эклогита трубки Удачная, а также Ag₂C₂O₄ и H₂C₂O₄ в качестве источников CO₂- и H₂O-CO₂-флюидов.

Полученные в экспериментах образцы исследовали с применением методов оптической (в т.ч. DIC) микроскопии, электронной микроскопии и

энергодисперсионного анализа, рентгеноспектрального анализа, КР-спектроскопии, рентгенофазового анализа и масс-спектрометрии.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКЦИЙ ДЕКАРБОНАТИЗАЦИИ, СОПРОВОЖДАЮЩИХСЯ ФОРМИРОВАНИЕМ ГРАНАТОВ, ПРИ P,T-ПАРАМЕТРАХ ЛИТОСФЕРНОЙ МАНТИИ

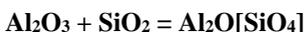
В данной главе представлены результаты экспериментального исследования реакций декарбонатизации, сопровождающихся формированием гранатов по схеме



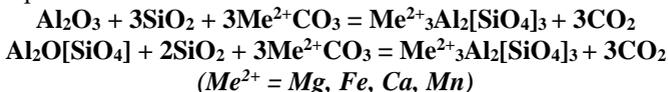
при $P = 3,0, 6,3$ и $7,5$ ГПа и $T = 850-1550$ °С. Эксперименты выполнены с использованием карбонатов 9 различных составов: родохрозита, магнезита, магнезиосидерита, смеси сидерита и магнезита в пропорции 1:1, доломита, анкерита, кальцита, а также карбонатов ЕСI и ЕСII, моделирующих катионный состав гранатов из модельных эклогитов I и II типа (Yaxley, Brey, 2004).

Ниже температур начала реакций декарбонатизации полученные образцы состояли из перекристаллизованных карбонатов и оксидов, а также содержали кианит. Выше линий декарбонатизации в образцах происходит образование граната, а также продолжается перекристаллизация карбонатов и оксидов. Корунд, кианит и гранат образуют зональные агрегаты с периферическими частями, сложными гранатом (рис. 1а). В образцах присутствуют флюидные полости размером до 100 мкм (рис. 1б) с кристаллами коэсита на стенках (рис. 1в).

В результате изучения фазового и химического составов полученных образцов проведена реконструкция процессов фазообразования при реакциях декарбонатизации, сопровождающихся образованием гранатов. Экспериментально установлено, что при температурах ниже начала реакций декарбонатизации происходит взаимодействие коэсита и корунда с образованием кианита:



При декарбонатизации в реакционном объеме происходит комплекс процессов: образование кианита, перекристаллизация исходных карбонатов, SiO_2 и Al_2O_3 , а также формирование гранатов за счет реакции кианита или корунда с коэситом и карбонатами:



Экспериментально установлено, что карбонаты Mg, Fe, Ca, Mn претерпевают декарбонатизацию в диапазонах температур 875-1100 °С (3,0 ГПа), 1075-1300 °С (6,3 ГПа) и 1200-1500 °С (7,5 ГПа) (рис. 2). Температуры декарбонатизации растут в ряду $\text{MnCO}_3 \rightarrow \text{FeCO}_3 \rightarrow \text{MgCO}_3 \rightarrow \text{CaCO}_3$. Относительно исходных карбонатов гранаты обогащены Fe и обеднены Ca. В

карбонатах, перекристаллизованных при высоких РТ-параметрах, напротив, содержание Са растет, а Fe снижается.

Составы гранатов, синтезированных в системах $(Mg,Fe,Ca,Mn)CO_3-Al_2O_3-SiO_2$ (ЕСI) и $(Mg,Fe,Ca,Mn)CO_3-Al_2O_3-SiO_2$ (ЕСII), на треугольных диаграммах формируют отчетливые РТ-тренды. С повышением Р,Т-параметров в гранатах увеличивается содержание Mg и уменьшаются содержания Са, Fe и Mn (рис. 3).

Таким образом, во всем изученном диапазоне давлений для образования альмандинового и спессартинового гранатов по реакциям декарбонатизации требуются наиболее низкие температуры, а для формирования гроссулярового и пиропового – наиболее высокие. Повышение в гранате содержания альмандинового компонента расширяет поле его стабильности в сосуществовании с CO_2 -флюидом в область более низких температур, а гроссулярового – напротив, сужает. Данный процесс сопровождается закономерным изменением состава карбонатов в ассоциации с гранатами (увеличение содержания кальция и уменьшение содержания железа).

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГРАНАТОВ МАНТИЙНЫХ ПАРАГЕНЕЗИСОВ С CO_2 -ФЛЮИДОМ ПРИ Р,Т-ПАРАМЕТРАХ ЛИТОСФЕРНОЙ МАНТИИ

В данной главе приведены результаты экспериментов по взаимодействию гранатов эклогитового и лерцолитового парагенезисов с углекислым флюидом при давлении 6,3 ГПа в интервале 950-1550 °С. Массовая доля CO_2 в экспериментах составляла 16,4-17,1 масс. %. При взаимодействии гранатов с CO_2 -флюидом установлены их частичное растворение, перекристаллизация и карбонатизация. Кристаллы гранатов зональны (рис. 4а,б). На границах между зонами присутствуют включения CO_2 , кианита, карбоната и коэсита (рис. 4в).

Образцы, полученные при взаимодействии гранатов с CO_2 -флюидом в диапазоне температур 950-1250 °С, представляют собой агрегаты частично перекристаллизованных гранатов, магниезального карбоната, кианита (или, в экспериментах с лерцолитовым гранатом – хромсодержащего кианита) и коэсита (рис. 5). В перекристаллизованных гранатах относительно исходного увеличивается содержание гроссулярового компонента и уменьшается – пиропового (рис. 6). При более высоких температурах (1350-1550 °С) получены агрегаты частично перекристаллизованного граната, в интерстициальном пространстве которых находится большое количество флюидных полостей (20-40 мкм) (рис. 5), доля гроссулярового минала в перекристаллизованных гранатах уменьшается (рис. 6).

Экспериментально установлены две схемы взаимодействия гранатов с CO_2 :

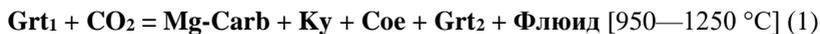


Схема (1) включает частичное растворение, карбонатизацию и перекристаллизацию гранатов в CO_2 -флюиде в интервале температур 950-1250 °С,

при этом формируются коэзит, кианит и карбонат. В результате взаимодействия по схеме (1) перекристаллизованный гранат обогащается гроссуляровым компонентом относительно исходного. В температурном диапазоне 1350-1550 °С взаимодействие гранатов с CO₂ реализуется по схеме (2), при этом содержание гроссулярового компонента в перекристаллизованном гранате снижается.

Установленные тренды изменения состава перекристаллизованных гранатов, можно рассматривать как индикаторные характеристики их взаимодействия с CO₂-флюидом. Данные тренды заключаются в увеличении содержания гроссулярового компонента в диапазоне температур 950-1250 °С и снижении в интервале 1350-1550 °С. Также в качестве таких характеристик можно назвать наличие включений, содержащих карбонаты, кианит, коэзит и CO₂.

ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГРАНАТОВ МАНТИЙНЫХ ПАРАГЕНЕЗИСОВ С H₂O-CO₂-ФЛЮИДОМ ПРИ P,T-ПАРАМЕТРАХ ЛИТОСФЕРНОЙ МАНТИИ

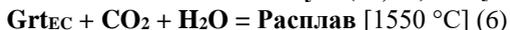
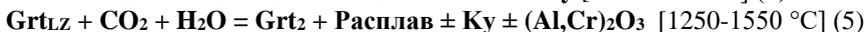
В данной главе изложены результаты серии экспериментов по взаимодействию гранатов эклогитового и лерцолитового парагенезисов с водно-углекислым флюидом при давлении 6.3 ГПа в интервале температур 950-1550 °С. Изначальное содержание CO₂ в экспериментах составляло 12,8-12,9 масс. %, воды – 3,5 масс. %.

Установлено, что взаимодействие гранатов с водно-углекислым флюидом приводит к его частичной карбонатизации, а также плавлению и перекристаллизации с образованием зональных кристаллов (рис. 6а). К границам зон приурочены включения CO₂, кианита, карбоната и коэзита (рис. 6б,в).

Фазовые взаимоотношения в полученных образцах иллюстрирует рисунок 8. При взаимодействии эклогитового граната с водно-углекислым флюидом при 950 °С доля пиропового компонента в перекристаллизованных гранатах снижается от 64.0 мол. % (в исходном) до 49.7 мол. %, при этом содержание алмандинового компонента возрастает с 22.2 до 32.9 мол. %, а гроссулярового - с 13.8 до 18.8 мол. % (рис. 9а). В температурном интервале 1050-1450 °С в перекристаллизованных гранатах доля пиропового компонента возрастает до 78.9 мол. %, тогда как доли алмандинового и гроссулярового уменьшаются до 18.7 и 2.3 мол. % соответственно (рис. 9а).

Тренды изменения составов перекристаллизованных гранатов в системах Grt_{LZ}-H₂O-CO₂ и Grt_{EC}-H₂O-CO₂ аналогичны. При температуре 950 °С в гранатах суммарное количество пиропового и кноррингитового компонентов уменьшается до 44.7 мол. % относительно 71.2 мол. % в исходном, а содержание гроссулярового минала увеличивается от 14.2 мол. % до 32.8 мол.% (рис. 9б). В интервале 1150-1550 °С содержание гроссулярового компонента в гранатах уменьшается до 3.3 мол. %, а доля магнезиального достигает 86.6 мол. % (рис. 9б).

Установлено, что взаимодействие гранат-CO₂-H₂O реализуется по четырём схемам в зависимости от температуры:



При взаимодействии по схеме (3) в диапазоне температур 950-1150 °С происходят образование кианита, коэсита, магниального карбоната и высококальциевого карбонатно-силикатного расплава, а также перекристаллизация граната. Взаимодействие гранат-Н₂О-СО₂ по схеме (4) в температурном интервале 1250-1450 °С приводит к перекристаллизации граната и формированию кианита и карбонатно-силикатного расплава. При этом в перекристаллизованном гранате уменьшается доля гроссулярового компонента, а расплав обогащается кальцием. Схема (5) описывает взаимодействие в системе лерцолитовый гранат-СО₂-Н₂О, сопровождающееся формированием карбонатно-силикатного расплава и высокоглинозёмистой хромсодержащей фазы (хромкианита и/или фазы (Al,Cr)₂O₃), а также полной перекристаллизацией граната со снижением в нём концентраций кальция при температурах 1250-1550 °С. Схема (6) отвечает полному плавлению в системе с эклогитовым гранатом при T = 1550 °С.

Экспериментально установлены индикаторные характеристики гранатов, перекристаллизованных в карбонатно-силикатном расплаве. Выявлены тренды изменения составов гранатов в зависимости от температуры, заключающиеся в повышении содержания гроссулярового компонента при температуре 950 °С и уменьшении его содержания в интервале температур 1050-1550 °С. Включения в перекристаллизованных гранатах представлены Mg-карбонатом, кианитом, коэситом, фазой (Al,Cr)₂O₃, закалённым карбонатно-силикатным расплавом и СО₂-флюидом.

ГЛАВА 6. КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ФАЗ ЭЛЕМЕНТАРНОГО УГЛЕРОДА В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ВЗАИМОДЕЙСТВИЮ ГРАНАТОВ С Н₂О-СО₂-ФЛЮИДОМ

Произведено детальное изучение морфологии затравочных кристаллов алмаза из экспериментов по взаимодействию гранат-СО₂-С и гранат-Н₂О-СО₂-С. **Взаимодействие гранат-СО₂-С.** Установлено, что образование наростов слоёв алмаза на затравочных кристаллах происходило только в диапазоне 1250-1550 °С (рис. 10), а при более низких температурах не отмечено ни роста, ни растворения. Нуклеация алмаза в исследованном P,T-интервале не зафиксирована, несмотря на значительную длительность (60-100 часов) экспериментов. Во всех экспериментах установлено образование кристаллов метастабильного графита на границе образцов с графитовыми капсулами и в интерстициях карбонатно-силикатных агрегатов. Следовательно, в диапазоне температур 950-1550 °С в изученной системе СО₂-флюид способен обеспечить растворение, транспорт и кристаллизацию фаз элементарного углерода.

Взаимодействие гранат-Н₂О-СО₂-С. Кристаллизация метастабильного графита зафиксирована во всём диапазоне температур (950-1550 °С). При 950 и 1050 °С,

несмотря на значительную длительность экспериментов (100 часов), на гранях затравочных кристаллов алмаза следы роста или растворения отсутствуют. В интервале 1150-1550 °С на затравочных кристаллах алмаза установлен рост (рис. 11б,в). Спонтанная нуклеация алмаза отмечена только на контакте графита с платиновой капсулой в диапазоне 1350-1550 °С. Кристаллы имеют октаэдрический габитус, часто с блочным строением граней и образуют сростки с метастабильным графитом (рис. 11а). Таким образом, карбонатно-силикатный расплав, образующийся в изученной системе в температурном интервале 950-1550 °С, способен к растворению, транспорту и кристаллизации фаз углерода.

Скорости роста алмаза при взаимодействии гранат-СО₂-С увеличиваются с повышением температуры от 0,015 мкм/час при 1250 °С до 0,8 мкм/час при 1550 °С, при взаимодействии гранат-Н₂О-СО₂-С – от 0,013 мкм/час при 1150 °С до 0,8 мкм/час при 1550 °С (рис. 12), и, таким образом, в среднем выше для взаимодействия гранат-Н₂О-СО₂-С.

Определены граничные условия роста алмаза при P,T-параметрах алмазообразования в литосферной мантии в системах, приближенных по химическому составу к природным. При взаимодействии гранат-СО₂-С средой кристаллизации фаз элементарного углерода является углекислый флюид с растворёнными компонентами, а при взаимодействии в системе гранат-Н₂О-СО₂-С – обогащённый летучими карбонатно-силикатный расплав. Установлено, что при взаимодействии гранат-СО₂-С при давлении 6.3 ГПа кристаллизация метастабильного графита из СО₂-флюида с растворёнными компонентами осуществляется во всем исследованном диапазоне температур (950-1550 °С), а рост алмаза на затравочных кристаллах — в диапазоне 1250-1550 °С. Установлено, что при взаимодействии гранат-Н₂О-СО₂-С при давлении 6.3 ГПа рост алмаза на затравочных кристаллах из карбонатно-силикатного расплава осуществляется в интервале 1150-1550 °С, а кристаллизация метастабильного графита - в диапазоне температур 950-1550 °С. При температурах 1350-1550 °С зафиксирована также спонтанная нуклеация алмаза на границе платиновых ампул с графитовыми капсулами. Устойчивой формой роста алмаза является октаэдр.

ГЛАВА 7. ОСОБЕННОСТИ МИНЕРАЛООБРАЗУЮЩИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РЕАКЦИЯХ ДЕКАРБОНАТИЗАЦИИ И ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ГРАНАТОВ С СО₂-Н₂О-ФЛЮИДАМИ

В заключительной главе обсуждаются основные закономерности, установленные в экспериментах, и проведено их сопоставление с результатами исследования природных объектов и существующими представлениями о фазообразовании в мантии Земли, включая кристаллизацию алмаза и метастабильного графита.

7.1. Особенности реакций декарбонатизации, сопряжённых с формированием гранатов, и их значение для мантийной петрологии.

Основными факторами, определяющими стабильность карбонатов и СО₂ в мантии Земли, наряду с процессами плавления и растворения карбонатов во

флюиде, являются параметры реакций карбонатизации-декарбонатизации. Декарбонатизация приводит к высвобождению углекислого флюида и его дальнейшей миграции, тогда как реакции карбонатизации, напротив, приводят к его иммобилизации в форме карбонатов. CO_2 является компонентом флюида, способным участвовать в процессах метасоматического преобразования мантийных пород (Кадик, Луканин, 1986; Pal'yanov et al., 2000; Frezzotti, Tourett, 2014).

С учётом геотерм, характерных для зон субдукции, можно предположить, что CO_2 -флюид, образующийся при декарбонатизации пород слэба, содержащих родохрозит, сидерит и магнезиосидерит, способны участвовать в метасоматической проработке перидотитов мантийного клина. При этом магнезиальные, кальциевые и магнезиально-кальциевые карбонаты способны вступать в реакции декарбонатизации при P,T-параметрах литосферной мантии Земли при температурах меньших, чем температуры плавления соответствующих карбонатов, так как кривые их декарбонатизации находятся в пределах мантийных геотерм в P,T-поле (рис. 2). Исходя из этого, можно предположить, что магнезиально-кальциевые карбонаты могут служить источником CO_2 -флюида в пределах литосферной мантии.

Проведено экспериментальное моделирование реакций декарбонатизации, сопряжённых с формированием гранатов, подобных гранатам карбонатизированных эклогитов I и II типов (Yaxley, Brey, 2004). Полученные результаты свидетельствуют о том, что минимальные температуры карбонатизации модельных эклогитовых гранатов составляют $1000\text{ }^\circ\text{C}$ на глубинах порядка 90 км, $1150\text{-}1250\text{ }^\circ\text{C}$ - на 200 км и $1400\text{ }^\circ\text{C}$ на глубинах около 225 км. Сопоставление данных по составам полученных гранатов с природными из эклогитов (Рис. 13) показывает значительное совпадение полей составов ЕСI, и частичное – ЕСII (Viljoen et al., 2005), при этом поля составов синтезированных гранатов также демонстрируют пересечение на $\sim 50\%$ с составами гранатов из ксенолитов эклогитов трубки Робертс Виктор (MacGregor, Carter, 1970).

7.2. Индикаторные характеристики гранатов, подвергшихся метасоматозу с участием CO_2 - и $\text{H}_2\text{O-CO}_2$ -флюидов.

Достаточно часто кристаллы природных гранатов имеют зональное строение, а характеристики отдельных зон могут быть использованы для реконструкции процессов эволюции вмещающих гранаты пород, включая метасоматоз, на протяжении миллионов и даже десятков миллионов лет (Wood et al., 2013).

В настоящем исследовании экспериментально показано, что индикаторными признаками гранатов, подвергшихся мантийному метасоматозу с участием CO_2 -флюида являются специфичная зональность, а также характерные включения Mg-карбоната и CO_2 . Характерной особенностью метасоматического воздействия водно-углекислого флюида на гранаты мантийных парагенезисов является их плавление с образованием карбонатно-силикатного расплава. В процессе плавления происходит смена агента метасоматоза с флюида на расплав,

обогащённый летучими. Признаки такого метасоматического воздействия – зональность перекристаллизованных гранатов, а также включения магнезиального карбоната, CO_2 и фазы $(\text{Al,Cr})_2\text{O}_3$. Зональность гранатов, подобная установленной в данной работе, описана для эклогитовых гранатов из кимберлитов (Pyle, Haggerty, 1998), гранатов из трубки им. В. Гриба (Лебедева и др., 2022), лерцолитовых гранатов из трубок Удачная и Обнажённая (Howarth et al., 2014) и лерцолитовых гранатов трубки Весселтон (Jollands et al., 2018). Схожесть зональности гранатов, установленной в данной работе, с зональностью гранатов из природных объектов свидетельствует о важной роли метасоматоза с участием CO_2 - H_2O -флюидов в эволюции мантийных пород.

Гранаты, полученные в экспериментах по взаимодействию $\text{Grt}_{\text{LZ}}\text{-CO}_2\text{-C}$ и $\text{Grt}_{\text{LZ}}\text{-H}_2\text{O-CO}_2\text{-C}$, характеризуются содержаниями Cr_2O_3 от 4 до 6 масс. %, при этом содержания CaO варьируют в широких пределах – от 1 до 13 масс. %. В настоящее время основным инструментом классификации мантийных гранатов является диаграмма в координатах $\text{CaO} - \text{Cr}_2\text{O}_3$ (масс. %) (Sobolev et al., 1973), согласно которой богатые Ca составы гранатов, полученных в экспериментах при 950-1150 °C в системах $\text{Grt}_{\text{LZ}}\text{-CO}_2\text{-C}$ и $\text{Grt}_{\text{LZ}}\text{-H}_2\text{O-CO}_2\text{-C}$, соответствуют гранатам верлитового парагенезиса. Перекристаллизованные гранаты из экспериментов при 1250-1550 °C (система $\text{Grt}_{\text{LZ}}\text{-CO}_2\text{-C}$) и при 1050-1550 °C (система $\text{Grt}_{\text{LZ}}\text{-H}_2\text{O-CO}_2\text{-C}$) попадают в поле низкокальциевых гранатов гарцбургитового парагенезиса (рис. 14).

Таким образом, метасоматоз гранатовых лерцолитов углекислым и водно-углекислым флюидами может приводить к смещению составов граната в верлитовую и гарцбургитовую (в зависимости от температуры и природы метасоматического агента) области на диаграмме в координатах $\text{CaO-Cr}_2\text{O}_3$. Также полученные данные хорошо согласуются с информацией о том, что включения в алмазах гарцбургитового парагенезиса демонстрируют более высокие температуры образования, чем в алмазах лерцолитового и верлитового (Shirey et al., 2013).

7.3. Формирование алмаза и графита в системах гранат- $\text{CO}_2\text{-C}$ и гранат- $\text{H}_2\text{O-CO}_2\text{-C}$. Материалы, полученные при изучении мантийных пород и включений в алмазах, свидетельствуют о том, что CO_2 - и H_2O -содержащие флюиды играют ключевую роль в процессах кристаллизации алмаза (Томиленко и др., 2001; Shirey et al., 2013; Sieber et al., 2022). Первые экспериментальные исследования роста алмаза в системах с $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ -флюидами проводились в упрощённых модельных системах, не учитывающих вариаций составов мантийных минералов, тогда как в данной работе смоделированы процессы кристаллизации фаз элементарного углерода в системах гранат- $(\text{H}_2\text{O})\text{-CO}_2\text{-C}$, наиболее близких природным алмазообразующим средам.

В изученных системах осуществляются растворение, транспорт и кристаллизация элементарного углерода. Среда минералообразования в них, однако, различны, и представлены в системе гранат- $\text{CO}_2\text{-C}$ углекислым флюидом с растворёнными компонентами, а в системе гранат- $\text{H}_2\text{O-CO}_2\text{-C}$ – карбонатно-

силикатным расплавом, обогащённым летучими. Очевидно, из-за этого и из-за различного содержания воды в системах, отличаются и граничные условия роста и образования алмаза: в системе гранат- CO_2 -C рост алмаза установлен при $T \geq 1250$ °C, тогда как в системе гранат- H_2O - CO_2 -C - при $T \geq 1150$ °C, т.е. на 100 °C ниже. Также в системе гранат- H_2O - CO_2 -C зафиксирована спонтанная нуклеация алмаза при $T \geq 1350$ °C. Скорости роста алмаза на затравочных кристаллах в CO_2 -флюиде составили от 0,015 мкм/час при 1250 °C до 0,8 мкм/час при 1550 °C, тогда как скорости роста из карбонатно-силикатного расплава - от 0,013 мкм/час при 1150 °C до 0,8 мкм/час при 1550 °C. При установленных скоростях роста алмаза можно оценить время, которое потребуется на образование октаэдрического кристалла алмаза весом 1 карат. Формирование такого кристалла из карбонатно-силикатного расплава займёт от 17,5 лет при 1150 °C до 4,5 месяцев при 1550 °C, а из углекислого флюида с растворёнными компонентами – от 15,2 лет при 1250 °C до 7 месяцев при 1550 °C. С учётом подобия состава систем и P,T-параметров экспериментов природным, такие значения можно рассматривать как реалистичные для роста большинства алмазов в литосферной мантии.

Отдельно необходимо обсудить взаимоотношение графита и алмаза в системах гранат- CO_2 -C и гранат- H_2O - CO_2 -C. Несмотря на то, что все эксперименты (длительностью до 100 часов) были поставлены при P,T-параметрах, отвечающих полю стабильности алмаза, в их продуктах при всех температурах наблюдался метастабильный графит. Кристаллизация графита при этом, вероятнее всего, обусловлена действием кинетического фактора и спецификой состава среды кристаллизации (Пальянов и др., 2000; Пальянов и др., 2005; Sokol, Pal'yanov, 2007). Таким образом, совместное нахождение графита и алмаза, наблюдаемое в природных объектах, не обязательно является следствием их образования на линии равновесия графит/алмаз или перемещения породы в поле стабильности графита, а может быть следствием кристаллизации графита как метастабильной фазы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При исследовании реакций декарбонатизации, сопровождающихся формированием гранатов установлено, что в зависимости от состава карбоната декарбонатизация происходит в диапазонах температур 875-1100 °C (3,0 ГПа), 1075-1300 °C (6,3 ГПа) и 1200-1500 °C (7,5 ГПа). Температуры декарбонатизации демонстрируют зависимость от состава исходного карбоната и увеличиваются в ряду $\text{MnCO}_3 \rightarrow \text{FeCO}_3 \rightarrow \text{MgCO}_3 \rightarrow \text{CaCO}_3$. Минимальные температуры карбонатизации модельных гранатов эклогитового парагенезиса составляют 1000 °C на глубинах 90 км, 1150-1250 °C – на 200 км, и 1400 °C на глубинах порядка 225 км.

2. Экспериментально продемонстрировано, что взаимодействие гранатов мантийных парагенезисов с CO_2 -флюидом при давлении 6,3 ГПа в интервале температур 950-1550 °C приводит к частичному растворению, перекристаллизации и карбонатизации гранатов в CO_2 -флюиде, а также формированию ассоциации

карбоната, кианита и коэсита. Индикаторными признаками гранатов, подвергшихся метасоматозу с участием углекислого флюида, являются их зональность по кальцию и магнию, а также характерные включения карбонатов и CO_2 . В перекристаллизованных гранатах выявлены тренды изменения составов в зависимости от температуры с увеличением содержания гроссулярового минала при $T \leq 1250^\circ\text{C}$, и уменьшением – при $T \geq 1350^\circ\text{C}$ ($P = 6,3$ ГПа).

3. Установлено, что при взаимодействии гранатов мантийных парагенезисов с водно-углекислым флюидом происходят их частичное плавление, растворение, перекристаллизация и карбонатизация, формируются кианит, коэсит, магнезиальный карбонат, корунд-эсколаитовый твёрдый раствор и карбонатно-силикатный расплав. Характерными признаками перекристаллизованных гранатов являются включения карбонатов, CO_2 и корунд-эсколаитового твёрдого раствора, а также специфическая зональность по кальцию и магнию. Тренды изменения составов перекристаллизованных гранатов в зависимости от температуры заключаются в увеличении содержания гроссулярового компонента при $T = 950^\circ\text{C}$, и в его уменьшении – при $T \geq 1050^\circ\text{C}$ ($P = 6,3$ ГПа).

4. В системе гранат- CO_2 -углерод при давлении 6.3 ГПа кристаллизация метастабильного графита осуществляется во всем исследованном диапазоне температур ($950\text{-}1550^\circ\text{C}$), а рост алмаза на затравочных кристаллах — в диапазоне $1250\text{-}1550^\circ\text{C}$. Средой кристаллизации является CO_2 -флюид с растворёнными компонентами, скорости роста алмаза увеличиваются от $0,03$ мкм/ч при 1250°C до $0,8$ мкм/ч при 1550°C , стабильная форма роста – октаэдр. Установлено, что в системе гранат- H_2O - CO_2 -углерод при давлении 6.3 ГПа кристаллизация метастабильного графита осуществляется в диапазоне температур $950\text{-}1550^\circ\text{C}$, а рост алмаза на затравочных кристаллах – в интервале $1150\text{-}1550^\circ\text{C}$. Среда кристаллизации – обогащённый летучими карбонатно-силикатный расплав, скорости роста алмаза на затравки возрастают с повышением температуры от 0.013 мкм/час при 1150°C до 0.8 мкм/час при 1550°C . Устойчивой формой роста алмаза является октаэдр.

ПРИЛОЖЕНИЕ

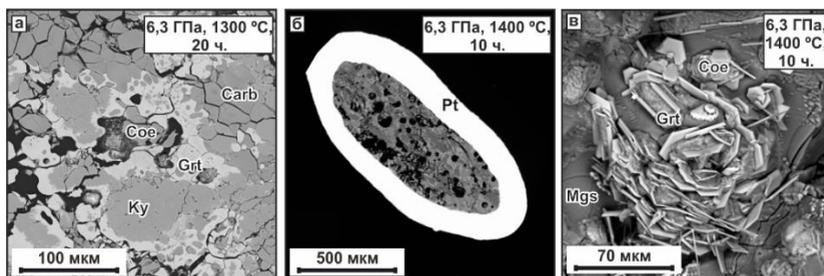


Рис. 1. РЭМ-фотографии полированных фрагментов (а,б) и скола (в) образцов, полученных в экспериментах в системах карбонат $\text{ECI-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (а), $\text{CaMg}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{CO}_3)_2\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (б) и $\text{MgCO}_3\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (в). Температуры, давления и длительности экспериментов указаны на рисунках.

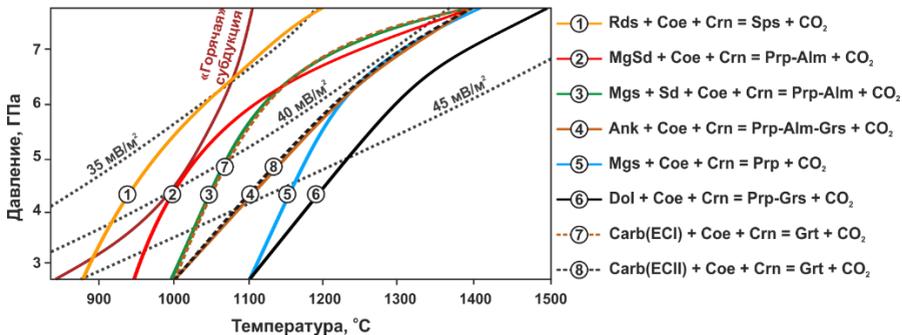


Рис. 2. Экспериментально определённые параметры реакций декарбонизации, приводящих к образованию CO_2 -флюида и гранатов различного состава. Геотермы 35, 40 и 45 MB/m^2 – по (Pollack, Charman, 1977), «горячая» субдукция – по (Syracuse et al., 2010).

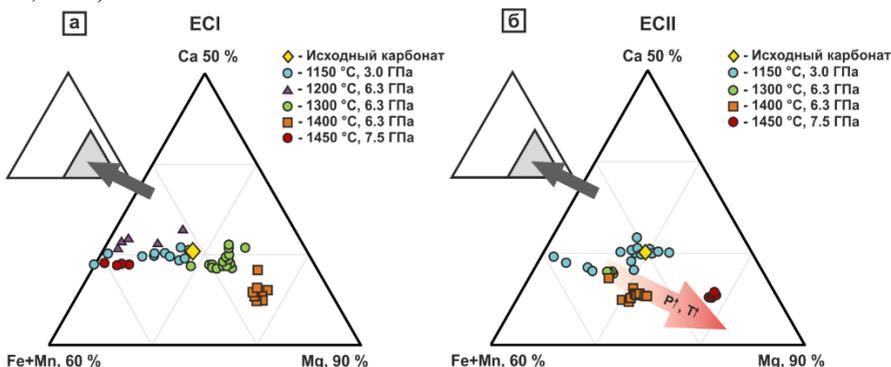


Рис. 3. Проекция составов гранатов, синтезированных в системах $(Mg,Fe,Ca,Mn)CO_3-Al_2O_3-SiO_2$ (ECI) (а) и $(Mg,Fe,Ca,Mn)CO_3-Al_2O_3-SiO_2$ (ECII) (б), на треугольные диаграммы.

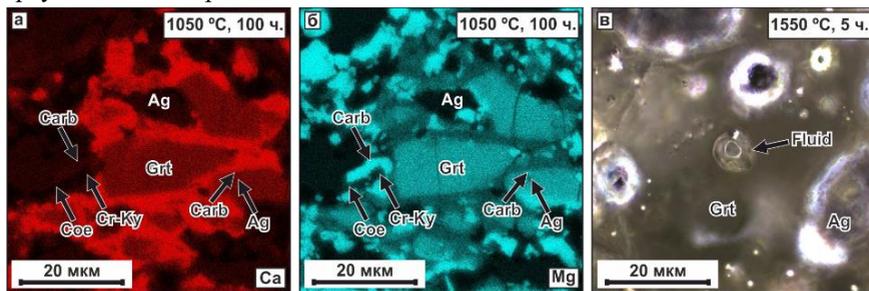


Рис. 4. Элементные карты (а,б) и оптическая микрофотография (в) образцов, полученных при взаимодействии эклогитового (в) и лерцолитового (а,б) гранатов с CO_2 -флюидом.

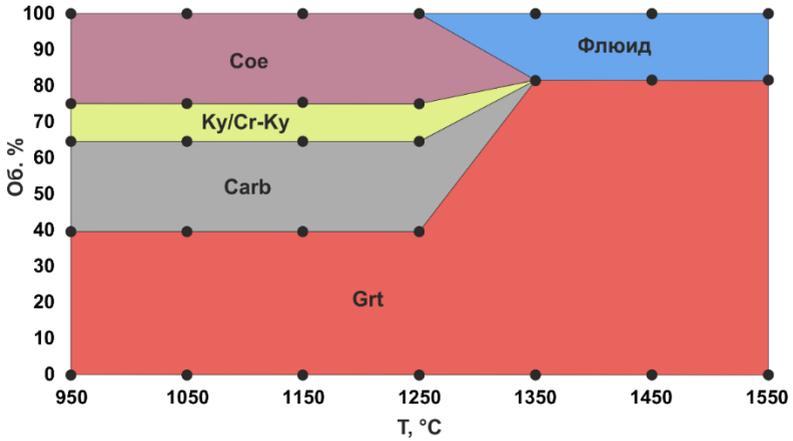


Рис. 5. Объёмные доли фаз (%), полученных в экспериментах по взаимодействию $\text{Grt}_{\text{EC}}\text{-CO}_2\text{-C}$ и $\text{Grt}_{\text{LZ}}\text{-CO}_2\text{-C}$.

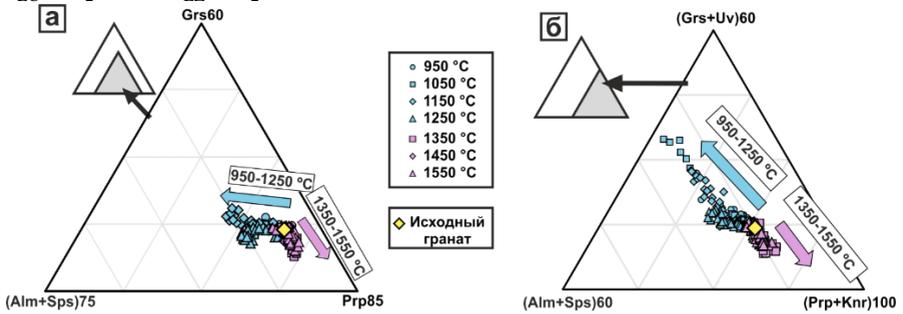


Рис. 6. Проекция составов гранатов, полученных в экспериментах по взаимодействию эклогитового (а) и лерцолитового (б) гранатов с CO_2 -флюидом (мол. %), на треугольные диаграммы и тренды их изменения в зависимости от температуры.

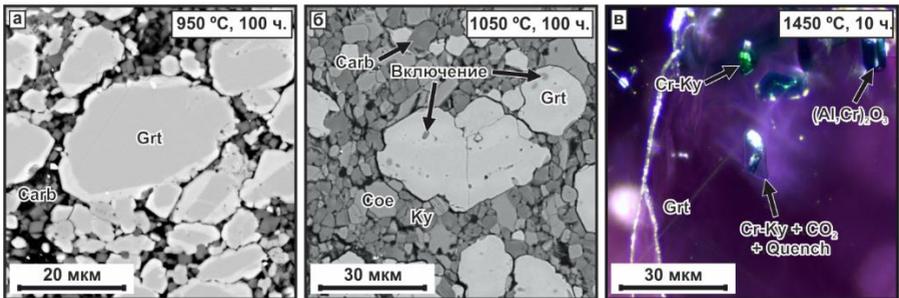


Рис. 7. РЭМ- (а, б) и оптическая (в) фотографии образцов, полученных при взаимодействии эклогитового (а,б) и лерцолитового (в) гранатов с $\text{H}_2\text{O-CO}_2$ -флюидом.

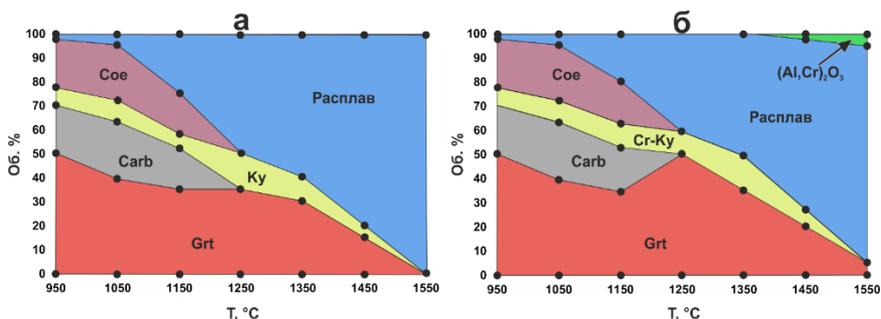


Рис. 8. Объёмные доли фаз (%), полученных в экспериментах по взаимодействию Grt_{EC}-H₂O-CO₂-C (а) и Grt_{LZ}-H₂O-CO₂-C (б).

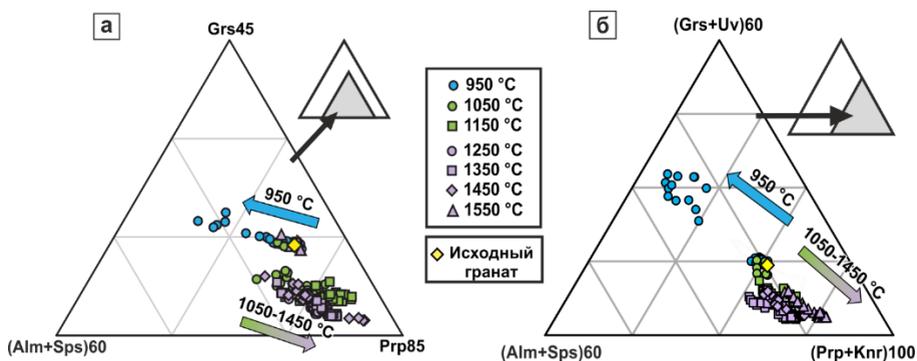


Рис. 9. Проекция составов гранатов, полученных в экспериментах в системах Grt_{EC}-H₂O-CO₂-C (а) и Grt_{LZ}-H₂O-CO₂-C (б) (мол. %), на треугольные диаграммы и тренды их изменения в зависимости от температуры.

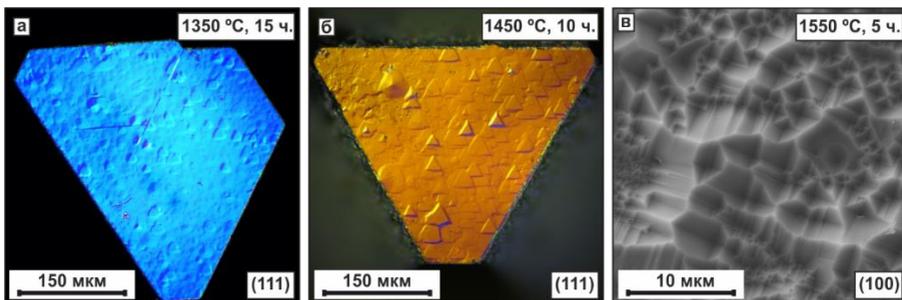


Рис. 10. DIC- (а,б) и РЭМ- (в) микрофотографии граней затравочных кристаллов алмаза из экспериментов в системе гранат-CO₂-C.

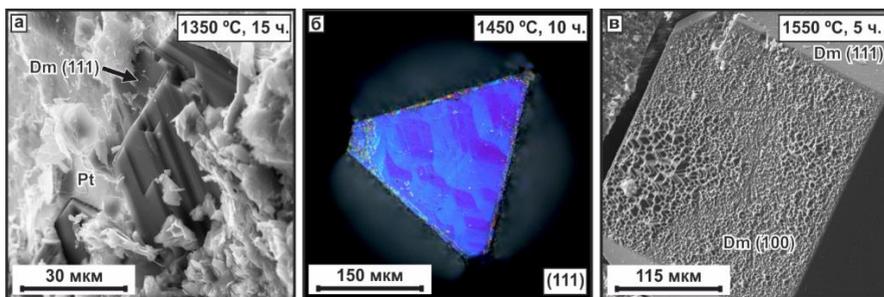


Рис. 9. DIC- (б) и РЭМ- (а,в) микрофотографии граней затравочных кристаллов алмаза из экспериментов в системе гранат- H_2O - CO_2 -C.

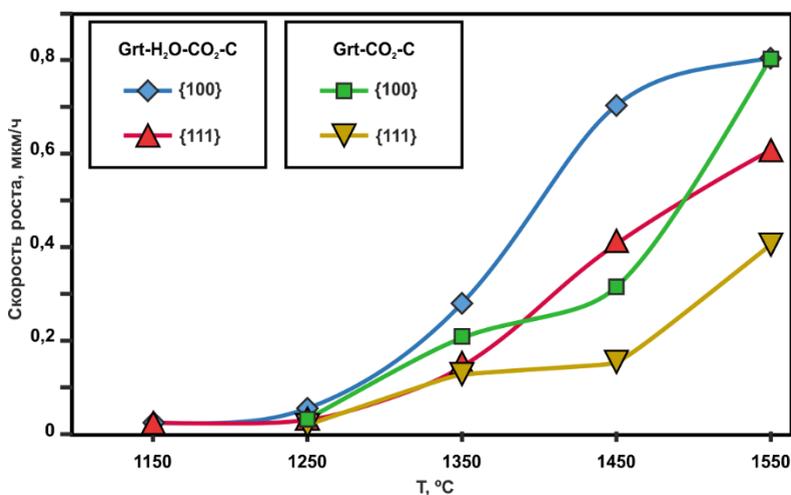


Рис. 12. Графики зависимостей скоростей роста алмаза на затравочных кристаллах в системах Grt- CO_2 -C и Grt- H_2O - CO_2 -C от температуры, P = 6.3 ГПа.

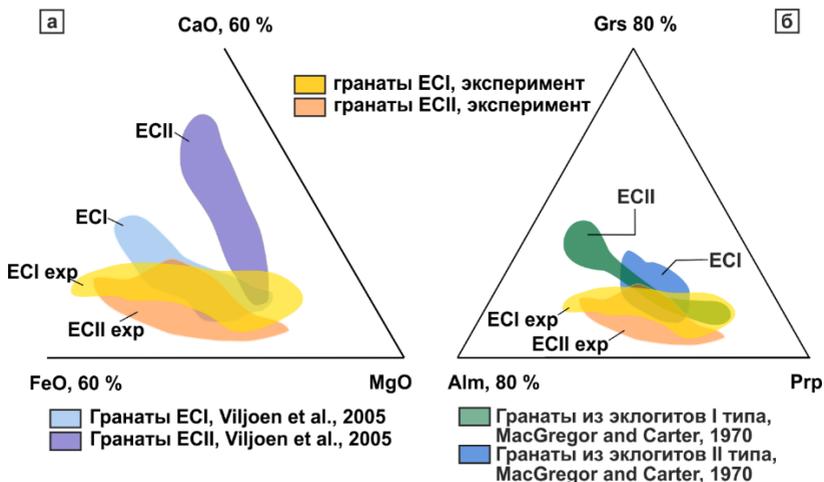


Рис. 13. Сопоставление данных по составам полученных гранатов с природными гранатами из эклогитов группы I и группы II по (Viljoen, 2005) (а) и (MacGregor, Carter, 1970) (б).

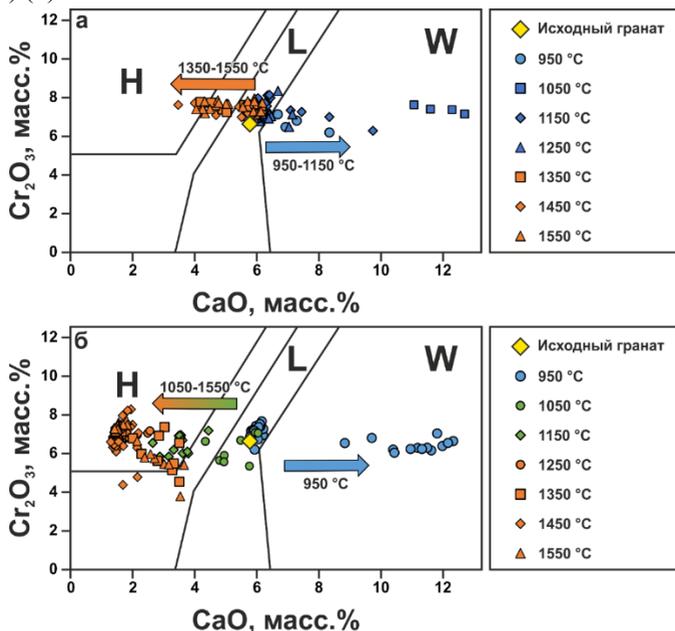


Рис. 14. Классификационная диаграмма составов гранатов согласно данным Н.В. Соболева (Sobolev et al., 1973), с нанесёнными составами гранатов, полученных при взаимодействиях $Grt_{LZ}-CO_2-C$ (а) и $Grt_{LZ}-H_2O-CO_2-C$ (б). Поля парагенезисов: Н – гарцбургитовый, L – лерцолитовый, W – верлитовый.

Список опубликованных статей по теме диссертации:

1. Баталева Ю.В, Новоселов И.Д., Крук А.Н., Фурман О.В., Реутский В.Н., Пальянов Ю.Н. Экспериментальное моделирование реакции декarbonатизации, сопряженных с образованием Mg, Fe-гранатов и CO₂-флюида при мантийных P,T-параметрах // Геология и геофизика, 2020, т. 61, № S5-6, с. 794-809.
2. Bataleva Yu.V., Kruk A.N., **Novoselov I.D.**, Palyanov Yu.N. Formation of Spessartine and CO₂ via rodochrosite decarbonation along a Hot Subduction P-T Path // Minerals, 2020, v. 10, № 8, p. 703.
3. Bataleva Yu.V., Kruk A.N., **Novoselov I.D.**, Furman O.V., Palyanov Yu.N. Decarbonation Reactions Involving Ankerite and Dolomite under upper Mantle P,T-Parameters: Experimental Modeling // Minerals, 2020, v. 10, № 8, p. 715.
4. Bataleva Yu.V., **Novoselov I.D.**, Kruk A.N., Furman O.V., Palyanov Yu.N. Experimental Modeling of Decarbonation Reactions, Resulting in the Formation of CO₂ Fluid and Garnets of Model Carbonated Eclogites under Lithospheric Mantle P,T-Parameters // Minerals, 2023, v. 13, № 7, p. 869
5. **Новоселов, И. Д.**, Пальянов Ю.Н., Баталева Ю.В. Экспериментальное моделирование взаимодействия гранатов мантийных парагенезисов с CO₂-флюидом при 6.3 ГПа и 950-1550 °C // Геология и геофизика, 2023, т. 64, № 4, с. 461-478.
6. **Novoselov I.D.**, Palyanov Y.N., Bataleva Y.V. Experimental study of the interaction between garnets of eclogitic and lherzolitic parageneses and H₂O-CO₂ fluid under the PT parameters of the lithospheric mantle // Lithos, 2023, v. 462-463, p.107408.

Материалы и тезисы семинаров и конференций:

1. Bataleva Y.V., **Novoselov I.D.**, Kruk A.N., Palyanov Y.N. Experimental modeling of decarbonation reactions resulting in the formation of Mg,Fe,Ca,Mn garnets and CO₂-fluid under lithospheric mantle P,T-parameters // XIX International meeting on crystal chemistry, X-ray diffraction and spectroscopy of minerals, Book of abstracts, Russia, Apatity, 2019, p. 182.
2. **Новоселов И.Д.**, Пальянов Ю.Н., Борздов Ю.М. Экспериментальное моделирование карбонатизации гранатов эцлогитового и лерцолитового парагенезисов в углекислом и водно-углекислом флюидах при 6,3 ГПа и 950-1250 °C // Тезисы докладов Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии, Москва, 2021, с. 88.
3. **Новоселов И.Д.**, Пальянов Ю.Н., Борздов Ю.М. Экспериментальное моделирование минералообразующих процессов в системах гранат-CO₂-C⁰ и гранат-CO₂-H₂O-C⁰ при 6,3 ГПа и 950-1550 °C // Тезисы докладов Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии, Москва, 2022, с. 89.
4. **Novoselov I.D.**, Bataleva Yu.V., Palyanov Yu.N. Experimental modeling of carbonation and decarbonation reactions involving eclogitic garnet under upper mantle P,T-parameters // Proceedings of the X International Siberian early career geoscientists conference, Novosibirsk, 2022, p. 51-52.
5. **Новоселов И.Д.**, Пальянов Ю.Н. Экспериментальное моделирование взаимодействия гранатов мантийных парагенезисов с водно-углекислым флюидом при PT-параметрах литосферной мантии // Тезисы докладов XVIII Российского Собрания по экспериментальной минералогии, Иркутск, 2022, с. 35.

Подписано в печать 10.07.2024 г. Печать офсетная.
Бумага офсетная. Формат 60x84 1/16. Усл. печ. 1,0 л.
Тираж 140 экз. Заказ №

Отпечатано в типографии «АЛЕКСПРЕСС»
ИП Малыгин Алексей Михайлович
630090, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 6/1, оф. 104
Тел. 8 (383) 217-43-46