

На правах рукописи



МИХНО Анастасия Олеговна

**ОСОБЕННОСТИ МИНЕРАЛОГИИ И ФЛЮИДНЫЙ РЕЖИМ
ОБРАЗОВАНИЯ КАРБОНАТНО-СИЛИКАТНЫХ ПОРОД
КОКЧЕТАВСКОГО МАССИВА**

25.00.05 – минералогия, кристаллография

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-
минералогических наук

Новосибирск – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии имени В.С. Соболева Сибирского отделения Российской Академии наук (ИГМ СО РАН).

Научный руководитель:

Корсаков Андрей Викторович, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН

Официальные оппоненты:

Добрецов Николай Леонтьевич, академик РАН, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН

Сафонов Олег Геннадьевич, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией Института экспериментальной минералогии РАН

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится «2» октября 2015 г. в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.067.02, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геологии и минералогии имени В.С. Соболева Сибирского отделения Российской Академии наук, в конференц-зале.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3
Факс: (383) 333-27-92, e-mail: gaskova@igm.nsc.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института.

Автореферат разослан «15» августа 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.г.-м.н.



О.Л. Гаськова

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. Метаморфические породы сверхвысоких давлений являются уникальными для изучения процессов, протекающих в субдукционно-коллизийных обстановках на глубинах до 200 км (Sobolev & Shatsky, 1990; Dobretsov et al., 1995; Shatsky et al., 1995; Chopin & Sobolev, 1995; De Corte et al., 1998, 2000; Ogasawara et al., 2000, 2002; Katayama et al., 2000, 2002; Massonne, 2003, 2011; Добрецов, 2003; Добрецов и др., 2006; Korsakov et al., 2004; 2011; Korsakov & Hermann, 2006; Hermann et al., 2006; Schertl & Sobolev, 2013). Среди метаморфических пород сверхвысоких давлений особое место занимают породы Кокчетавского массива Кумды-Кольского блока, так как они являются наиболее глубоко субдуцированными ($P = 6-7$ ГПа, $T=1000-1100$ °C) породами континентальной коры (Ogasawara et al., 2000; Massonne, 2003; 2011; Mikhno & Korsakov, 2013). Высокие содержания алмаза (до 3000 карат/тонна) наряду с контрастной алмазосодержимостью давно привлекли внимание петрологов к карбонатно-силикатным породам Кокчетавского массива (Sobolev & Shatsky, 1990; Dobrzhinetskaya et al., 1994; Shatsky et al., 1995; De Corte et al., 1998; Лаврова и др., 1999; Шацкий и др., 2006; Ситникова и Шацкий, 2009). Исследования изотопного состава азота и углерода в алмазах, а также кислорода в гранатах и пироксенах свидетельствуют о коровом происхождении карбонатно-силикатных пород Кокчетавского массива (De Corte et al., 1998; Cartigny et al., 2001; Sobolev et al., 2011; Imamura et al., 2013; Shirey et al., 2013, Schertl & Sobolev, 2013). В работах (Korsakov et al., 2004; Korsakov & Hermann, 2006, Шацкий и др., 2006) было высказано предположение, согласно которому карбонатно-силикатные породы с калийсодержащим клинопироксеном, являются продуктом взаимодействия карбонатных пород с высококалийным флюидом/расплавом. Однако, Перчуком с соавторами (Перчук и др., 1996, Перчук и Япаскурт, 1998) и Сумино с соавторами (Sumino & Dobrzhinetskaya 2010, Simino et al., 2011) предполагается, что карбонатно-силикатные породы Кокчетавского массива имеют мантийное происхождение. Таким образом, на данный момент не существует единого мнения относительно образования карбонатно-силикатных пород Кокчетавского массива, а также, относительно источника флюида/расплава, принимавших участие в формировании этих пород.

Объектами исследования являются карбонатно-силикатные породы метаморфизма сверхвысоких давлений Кокчетавского массива (месторождение Кумды-Коль).

Целью работы является реконструкция метаморфической истории карбонатно-силикатных пород Кокчетавского массива.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- 1) Выявление минералого-петрографических особенностей карбонатно-силикатных пород.
- 2) Изучение химического состава аксессуарных и породообразующих минералов карбонатно-силикатных пород.
- 3) Исследование пространственного распределения флюидных и полифазных твердофазных включений в гранате и клинопироксене.
- 4) Определение фазового и химического состава включений минералообразующей среды.
- 5) Реконструкция условий образования карбонатно-силикатных пород.

Фактический материал и методы исследования. В работе была использована коллекция образцов карбонатно-силикатных пород, состоящая из 28 образцов. Коллекция образцов была частично собрана автором в результате полевых работ (2011 и 2014 год) и частично предоставлена д.г.-м.н. А.В. Корсаковым. Автором было изготовлено и просмотрено 100 шлифов и 70 препаратов для исследований флюидных и расплавных включений. Проведено 60 термометрических и криометрических опытов с расплавными и флюидными включениями. Выполнено 3000 микронзондовых анализов и анализов на сканирующем электронном микроскопе породообразующих минералов и аксессуарных минералов, рассчитаны P-T параметры образования карбонатно-силикатных пород. Получено 200 изображений в отраженных электронах. Методом КР-спектроскопии получено и расшифровано 150 индивидуальных КР-спектров породообразующих минералов и минералов-включений. Получено 20 КР-карт флюидных и твердофазных включений минералов.

Защищаемые положения.

1) В клинопироксенах из карбонатно-силикатных пород Кокчетавского массива зафиксирована прогрессивная зональность по содержанию K_2O . Кристаллизация клинопироксена с содержанием K_2O изменяющимся от 0.3 мас.% в центре до 0.64 мас.% в краевой части ядер клинопироксена началась при $T = 960$ °С и $P = 5.5$ ГПа и продолжалась до 1100 °С и $P \sim 7.3$ ГПа. Формирование этого клинопироксена произошло на заключительном этапе прогрессивной стадии метаморфизма карбонатно-силикатных пород Кокчетавского массива.

2) В составе продуктов раскristаллизации расплавных включений в порфиробластах клинопироксена карбонатно-силикатной породы Кокчетавского массива был обнаружен калиевый кимрит ($\text{KAlSi}_3\text{O}_8 \cdot \text{H}_2\text{O}$) в одной ассоциации с кокчетавитом (KAlSi_3O_8). Сосуществование калиевого кимрита и кокчетавита в полифазных включениях указывает на то, что формирование кокчетавита во включениях происходило путем дегидратации калиевого кимрита при $P < 4.5$ ГПа.

3) Находки включений пирротина, пирита и халькопирита в центральных зонах порфиробластов граната и калийсодержащего клинопироксена с ненарушенными ламелями калиевого полевого шпата указывают на то, что сульфидные минералы являются равноправными членами высокobarических ассоциаций в карбонатно-силикатных породах Кокчетавского массива в условиях близких к пику метаморфизма

Научная новизна. Впервые в породах сверхвысоких давлений Кокчетавского массива были выявлены включения клинопироксена с прогрессивной зональностью по K_2O . Эти находки позволили реконструировать заключительный этап прогрессивной стадии метаморфизма для пород алмаз-пироповой субфации метаморфизма. Наличие прогрессивного этапа в формировании карбонатно-силикатных пород позволяет однозначно исключить гипотезу их мантийного происхождения. Калиевый кимрит, ранее известный лишь в качестве продукта высокobarических экспериментов, был впервые идентифицирован в природных объектах, а именно в полифазных включениях в порфиробластах клинопироксена карбонатно-силикатных пород Кокчетавского массива. Находки калиевого кимрита ($\text{KAlSi}_3\text{O}_8 \cdot \text{H}_2\text{O}$) в одной ассоциации с кокчетавитом (KAlSi_3O_8), свидетельствует о том, что кокчетавит образуется путем дегидратации калиевого кимрита. Ранее этот механизм образования кокчетавита был предложен Хвангом с соавторами (Hwang et al., 2005), но отвергнут в пользу его метастабильной кристаллизации. Состав расплава, реконструированный по вторичным включениям в трещине, является карбонатитовым ($\text{SiO}_2 \approx 18\%$, $\text{MgO} \approx 7.5\%$, $\text{CaO} \approx 41\%$, $\text{CO}_2 \approx 32\%$). Впервые было продемонстрировано, что сульфидный расплав существовал в условиях близких к пику метаморфизма в карбонатно-силикатных породах Кокчетавского массива.

Практическая значимость работы. Результаты данного диссертационного исследования могут послужить основой для построения геодинамических моделей субдукционно-коллизийных зон. Выявление природного калиевого кимрита в карбонатно-

силикатных породах Кокчетавского массива может способствовать утверждению нового минерального вида.

Апробация работы и публикации. По теме диссертации опубликовано 4 статьи в ведущих российских и зарубежных журналах, рекомендованных ВАК. Результаты работы были также представлены автором на российских и международных конференциях, включая 9-11 Международные Эклогитовые Конференции (Марианские Лазни, Чехия, 2011; Курмайор, Италия, 2013; Рио-Сан-Жуан, Доминиканская Республика, 2015), X Георамаан (Нанси, Франция, 2012), Международные конференции по текущим исследованиям флюидных включений в Азии «ACROFI III и ACROFI IV» (Новосибирск, 2010; Брисбен, Австралия, 2012) и Европе «XXI ECROFI» (Анталия, Турция, 2013), 6 Международную и 7 Сибирскую Конференции (Новосибирск 2012, 2014) и Всероссийскую Конференцию по термобарогеохимии (Москва, 2012).

Структура и объем работы. Квалификационная работа состоит из введения, 5 глав и заключения общим объемом 134 страницы и сопровождается 49 рисунками и 19 таблицами. Список литературы состоит из 151 наименования.

Благодарности. Исследования по данной теме проводятся с 2008 г. в лаборатории минералов высоких давлений и алмазных месторождений ИГМ СО РАН под руководством д.г.-м.н. Корсакова А.В., которому автор выражает глубокую признательность за поддержку и внимание на всех этапах работы. Автор выражает особую благодарность академику Соболеву Н.В., академику Добрецову Н.Л., академику Похиленко Н.П. и член-корреспонденту СО РАН Шацкому В.С. за критические замечания в работе. Особую признательность за плодотворные дискуссии автор выражает д.г.-м.н. Томиленко А.А., д.г.-м.н. Э.В. Сокол, д.г.-м.н., д.г.-м.н. А.Г. Соколу, к.г.-м.н. Смирнову С.З., д.г.-м.н. Д.А. Зеденизову, д.г.-м.н. А.Ф. Шацкому, д.г.-м.н. А.И. Чепурову, д.г.-м.н. К.Д. Литасову, к.г.-м.н. Хлестову В.В и д.г.-м.н. Туркиной О.М. За помощь в освоении методов и ценные советы автор благодарит д.г.-м.н. О.Л. Гаськову, О.А. Козьменко, М.А. Рябуху, С.В. Рашенко, Т.А. Алифирову, к.г.-м.н. Е.Н.Соколову, к.г.-м.н. Т.Ю. Тимину, д.г.-м.н. О.Г. Сафонова, к.г.-м.н. И.С. Шарыгина, к.г.-м.н. А.М. Дымшиц, к.г.-м.н. Е.В. Щукину, к.г.-м.н. Ю.И. Овчинникова и к.г.-м.н. А.С. Степанова. Автор выражает благодарность за помощь в проведении аналитических работ к.г.-м.н. Е.Н. Нигматулиной, к.г.-м.н. Н.С. Карманову и М.В. Хлестову. За помощь во время полевых работ автор выражает благодарность к.г.-м.н. А.Ю. Селятицкому, Д.С. Михайленко, О.В. Щепетовой и С.В. Стрижову.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ (12-05-31431, 13-05-00367, 14-05-31465), Президента РФ (МД-1260.2013.5), Министерства образования и науки РФ (№ 14.В25.31.0032).

Глава 1. Характеристика объекта исследования

Кокчетавский массив находится в Северном Казахстане и представляет собой зону мегамеланжа длиной 80 км и шириной 17 км (Рис. 1.), которая простирается с северо-запада на юго-восток (Dobretsov et al., 1995). Кокчетавский массив состоит из блоков, субдущированных на глубины 150-200 км и сформировавшихся в различных режимах температур и давлений (Dobretsov et al., 1995; Shatsky et al., 1995). Породы неалмазоносного (восточного) Кулетского и алмазоносного (западного) Кумды-Кольского блока, отвечают ультравысокобарическим условиям и разделены зоной Чаглинского разлома (Theunissen et al., 2000). Кумды-Кольский блок сложен биотитовыми сланцами и гнейсами, метапелитами, карбонатно-силикатными породами с высококалиевым клинопироксеном, кварцитами и эклогитами (Shatsky et al., 1995). Возраст пика метаморфизма для пород Кумды-Кольского блока оценивается в 530 млн. лет (Claoué-Long et al., 1991; Shatsky et al., 1999; Hermann et al., 2001; Katayama et al., 2001). Кумды-Кольский и Кулетский блоки были совмещены в Кокчетавский мегамеланж в результате быстрого подъёма на среднекоровый уровень (515-517 млн. лет). Korsakov & Hermann (2006), а также Шацкий и др. (2006) оценивают условия пика метаморфизма Кумды-Кольского блока в $T=1000$ °С, $P=4-6$ ГПа. В то же время, существует большое количество работ (Okamoto et al., 2000; Zhu & Ogasawara, 2002; Massonne, 2003; Dobrzhinetskaya et al., 2006) с более высокими оценками (6-7 ГПа и 1000-1100 °С).

Глава 2. Методы исследования

Определение химического состава породообразующих минералов и минералов полифазных включений производилось на сканирующих электронных микроскопах JEOL JXM-6510LV и TESCAN MIRA 3 LMU JSM 6510LV и рентгеноспектральном микроанализаторе JEOL JXA-8100 в аналитическом центре ИГМ СО РАН (г. Новосибирск). КР-спектры в интервале от 50 до 4500 см^{-1} были получены с использованием спектрометров T64000 Horiba Jobin Yvon и LabRam Horiba Jobin Yvon в аналитических центрах ИГМ СО РАН и НГУ (г. Новосибирск). Конфокальное КР-картирование (Confocal Raman Imaging) флюидных и полифазных включений было выполнено с использованием высокоскоростного КР-спектрометра на базе Confocal Raman Imaging alpha 300 R (WiTec Ltd) в г. Ульм, Германия.

Криометрические и термометрические исследования флюидных и расплавных включений производились с помощью термокамеры THMSG600 (ИГМ СО РАН) и на микротермокамере оригинальной конструкции Н.Ю. Осоргина и А.А. Томиленко (Осоргин Н.Ю., Томиленко А.А. Микротермокамера / Авт. свидетельство № 1562816 СССР от 07.05.1990). Определение редких сидерофильных и халькофильных элементов в сульфидах производилось методом индукционно-связанной плазменной масс-спектрометрии с лазерной абляцией (LA-ICP-MS) в Университете г. Мюнстер (Германия).

Глава 3. Минералого-петрографическая характеристика образцов

Образцы карбонатно-силикатных пород были отобраны в разведочной штольне, расположенной на южном берегу озера Кумды-Коль, и ее отвалах (Лаврова и др., 1999). Среди карбонатно-силикатных пород выделяются алмазонасные и неалмазонасные разновидности. По модальному содержанию карбонатных минералов их можно разделить на две группы: гранат-пироксеновые породы (<50% карбонатов) и мраморы (>50% карбонатов). В карбонатно-силикатных породах встречаются калийсодержащий клинопироксен (Sobolev & Shatsky, 1990; Chopin & Sobolev., 1995), высококремнистый сфен (Ogasawara et al., 2002) и Ca-Mg гранат с низким содержанием Fe (Sobolev et al., 2007), которые наряду с алмазом и коэситом являются неопровержимыми индикаторами ультравысокобарического метаморфизма. Карбонатно-силикатные породы характеризуются полосчатыми текстурами, выраженными чередованием слоев, обогащенных крупно- и среднезернистым клинопироксеном и гранатом и карбонатных слоев.

Первичные породообразующие минералы карбонатно-силикатных пород представлены гранатом, клинопироксеном, доломитом, арагонитом/кальцитом и флогопитом. В качестве аксессуарных минералов в карбонатно-силикатных породах были диагностированы кварц, калиевый полевой шпат, рутил, ильменит, апатит, циркон, фенгит, титанит, алланит, алмаз, корунд, халькопирит, сфалерит, пирротин и пирит. Вторичные минералы представлены цоизитом, роговой обманкой и хлоритом. Их формирование происходило на регрессивном этапе метаморфизма при РТ-параметрах, отвечающих амфиболитовой и зеленосланцевой фациям метаморфизма (Shatsky et al., 2003). Гранаты и клинопироксены карбонатно-силикатных пород образуют порфиробласты размером до 4 см. Находки включений гранатов в порфиробластах клинопироксена и клинопироксена в порфиробластах граната свидетельствуют об их одновременной

кристаллизации. Фенгит диагностирован в виде включений в гранате и клинопироксене и отсутствует в матриксе. Сульфиды наблюдаются в качестве включений в высокобарических минералах (гранатах и пироксенах), а также в матриксе карбонатно-силикатных пород.

Клинопироксены карбонатно-силикатных пород являются натровыми авгитами (Рис. 2.). Составы клинопироксенов различаются для разных образцов главным образом по количеству и распределению примеси калия (содержание K_2O варьируется от 0 до 1.2 мас.%). Предполагается, что калий входит в структуру клинопироксена в виде калиевого аналога жадеита $KAlSi_2O_6$ (Соболев и др., 1972; Перчук и др., 1996; Perchuk et al., 2002; Сафонов и др., 2002; 2005; Bindi et al., 2003). В образцах K98-4 и K20/115 были идентифицированы включения клинопироксена с прогрессивной зональностью по K_2O , которая не отмечалась в предыдущих работах (Перчук и др., 1996; Перчук и Япаскурт, 1998; Perchuk et al., 2002; Korsakov et al., 2004). Во всех порфиробластах и включениях образца K98-14 и K20/115 можно выделить ядро и внешнюю зону (до 250 мкм), состав которой резко отличается от состава центральных частей клинопироксенов. Они характеризуются пониженным содержанием диопсидового минала, отсутствием примеси калия и низкой магнезиальностью, по отношению к центральным частям. Содержание примеси калия в порфиробластах клинопироксена убывает от 0.45 мас.% в центре кристалла до 0 в краевых зонах (регрессивная зональность). В клинопироксенах-включениях можно выделить две зоны в соответствии с изменением содержания K_2O . Зона I (центральная) с прогрессивной зональностью по калию (0.3 мас.% K_2O в центре и 0.64 мас. % в краевой части зоны). Зона II образует кайму вокруг зоны I и показывает регрессивную зональность по содержанию калия (K_2O снижается от 0.71 до 0 мас.%). Исследование данных включений методом КР-спектроскопии позволило исключить возможность частичной амфиболитизации калиевого клинопироксена (Рис. 3.).

Гранаты карбонатно-силикатных пород относятся к пиропальмандин-гроссуляровому ряду и сильно различаются для разных образцов (Рис.4.). Состав гранатов-включений в порфиробластах клинопироксена соответствует составу порфиробластов гранатов. Примесь титана в гранатах достигает 0.97 мас.%. Гранаты мраморов являются более магнезиальными по отношению к гранатам карбонатно-силикатных породам. Гранаты образца Gak150 характеризуются высоким содержанием Fe^{3+} (до 0.50 ф.е.). Гранаты образца Gak103 являются наиболее железистыми и по составу близки к гранатам эклогитов месторождения Кумды-Коль.

Карбонатные минералы. Кальциты гранат-клинопироксеновых пород характеризуются низким содержанием примесей (Mg, Mn, Fe), что может свидетельствовать том, что они изначально являлись арагонитами (Ogasawara et al., 2000; Korsakov et al., 2009; 2011). Кальциты с примесью магнезия наблюдаются как в кальцитовых, так и в доломитовых мраморах. Примесь магнезия в кальцитах может достигать 3.05 мас.%, а примесь Fe не превышает 0.85 мас.%. Доломиты характеризуются однородным составом и следующей формулой: $\text{Ca}_{1.01-1.06}\text{Mg}_{0.91-0.98}\text{Fe}_{0.01-0.05}(\text{CO}_3)_2$. Однако, в работах Schertl et al. (2004) и Korsakov et al. (2009) отмечались неоднородности составов доломитов карбонатно-силикатных пород. Примеси Mg, Mn и Fe в арагонитах (Обр. Gak101) ниже предела обнаружения.

Акцессорные минералы. Содержание SiO_2 во включениях фенгита в порфиробластах клинопироксена достигает 3.45 ф.е., что свидетельствует о высоких давлениях кристаллизации фенгита (Ravna & Terгу, 2004). Титаниты характеризуются примесью Al_2O_3 (~5.8 мас.%) и примесью фтора до 3.07 мас.%. В некоторых образцах титаниты содержат ламели кварца, которые также являются признаком высоких давлений (Ogasawara et al., 2002). Содержание калия в роговой обманке достигает 0.25 мас.%. Калиевый полевой шпат содержит примесь альбитового компонента до 0.3 мол. %. Содержание FeO в цоизите не превышает 2.03 мас.%. В состав алланита входит до 2.96 мас.% Nd_2O_3 , до 8.89 мас.% Ce_2O_3 , до 3.62 мас.% La_2O_3 .

Глава 4. Флюидные и расплавные включения в породообразующих минералах.

Первичные флюидные включения сосуществуют с полифазными включениями силикатного состава в ядрах порфиробластов граната и клинопироксена (Рис. 5), а также встречаются в виде единичных включений. Большая часть первичных флюидных включений газожидкие, однако, также встречаются однофазные (жидкость) и трехфазные (газ+жидкость+твердая фаза). Твердые фазы, кальцит и фенгит, диагностированные во флюидных включениях методом КР-картирования, предположительно, являются дочерними. Криометрические исследования флюидных включений позволили продемонстрировать, что состав флюида является преимущественно водным и содержание солей относительно низкое (от 0.88 до 8.81 мас. % в NaCl эквиваленте). Углекислота, азот и метан не были обнаружены во включениях методом криометрии и КР-спектроскопии. Гомогенизация газа и жидкости во включениях происходит в температурных интервалах от 190 до 225 °С и от 340 до 409 °С. Предполагается, что второй интервал характерен для частично

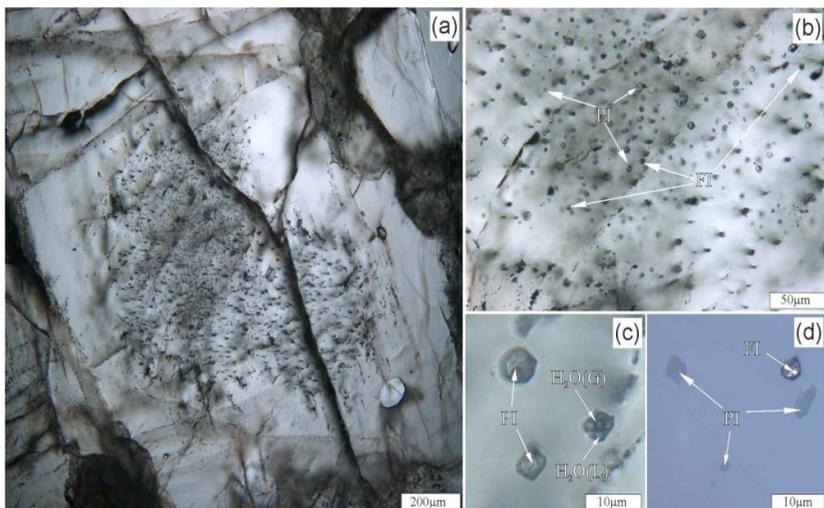


Рис. 5. Фотографии калийсодержащего порфиробласта клинопироксена. (а) Зональность клинопироксена, обусловленная распределением включений. (б) Сосуществование флюидных (FI) и полифазных (PI) включений в центральной зоне порфиробласта клинопироксена (с)-(d) Фазовый состав флюидных и полифазных включений (проходящий и отраженный свет, G - газ, L - жидкость).

декрипитированных включений. Первый интервал температур гомогенизации соответствует высокой плотности ($0.83-0.85 \text{ г/см}^3$).

Полифазные силикатные включения в гранате и клинопироксене исследовались методами сканирующей электронной микроскопии и КР- спектроскопии, что позволило идентифицировать следующие фазы: кальцит, кварц, α -кristобалит, плагиоклаз, фенгит/мусковит, роговая обманка, кокчетавит (KAlSi_3O_8), калиевый кимрит ($\text{KAlSi}_3\text{O}_8 \cdot \text{H}_2\text{O}$) и лёллингит (Рис. 6.). Ранее, калиевый кимрит наблюдался в продуктах высокотемпературных экспериментов и не был идентифицирован в природных объектах. Закономерностей в изменении состава полифазных включений от центра к краю порфиробластов не было выявлено. Следовательно, составы расплавов не претерпевали значительных изменений по мере роста гранатов и клинопироксенов. Однако, составы расплавов, реконструированные для разных образцов карбонатно-силикатных пород, различаются между собой по содержанию K_2O и CaO . Наблюдается корреляция содержания калия в расплаве с содержанием калия во включениях К-

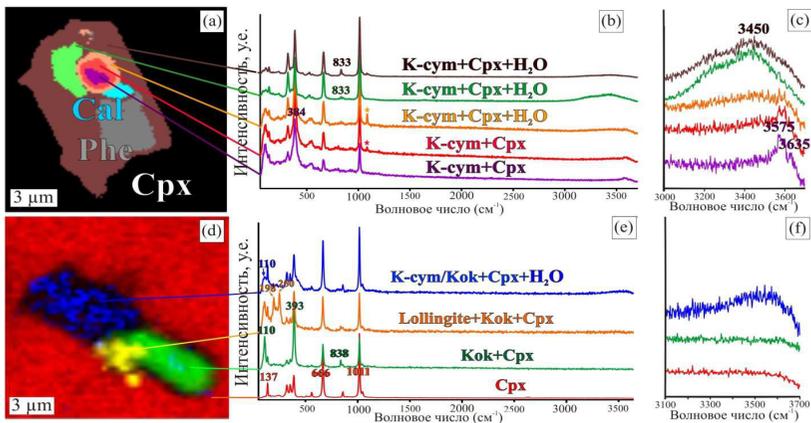


Рис. 6. КР-карты и представительные КР-спектры полифазных включений силикатного состава: (a,d) КР-карты двух полифазных силикатных включений в клинопироксене. (b) - КР-спектр калиевого кимрита (c) - КР-спектр калиевого кимрита в диапазоне частот от 3000 до 3700 cm^{-1} . (e,f)- КР-спектры в диапазоне частот от 50 до 3700 cm^{-1} и от 3000 до 3700 cm^{-1} , соответствующие КР-карте (d). Звездочкой показана характерная линия для кальция при 1086 cm^{-1} . К-сум – калиевый кимрит, Срх – клинопироксен, Кок – кокчетавит, Lollingite – лёллингит.

Срх в гранате, что хорошо согласуется с экспериментальными данными (Perchuk et al., 2002; Сафонов и др., 2005).

Включения карбонатного состава фиксировались в образцах гранат-клинопироксеновых пород с высокой составляющей карбонатных минералов (10-20 об.% - Let1, K98-4) и в мраморе (A8). В образце Let1 карбонатные включения представлены кальцитом и сосуществуют в одной ростовой зоне клинопироксена с полифазными силикатными включениями, в которых был идентифицирован калиевый кимрит. В образце мрамора A8 полифазные включения стремятся к форме отрицательного кристалла и наблюдаются в зонах залеченных трещин в калиевом клинопироксене (Рис.7, а). В этих зонах не наблюдается изменения состава и, в частности, снижения содержания K_2O , что свидетельствует об ультравысокобарической природе трещин с вторичными полифазными включениями. Вторичные полифазные включения сложены кальцитом, лёллингитом,

α -кristобалитом и калишпатом. Валовый состав вторичных включений в клинопироксене является карбонатитовым.

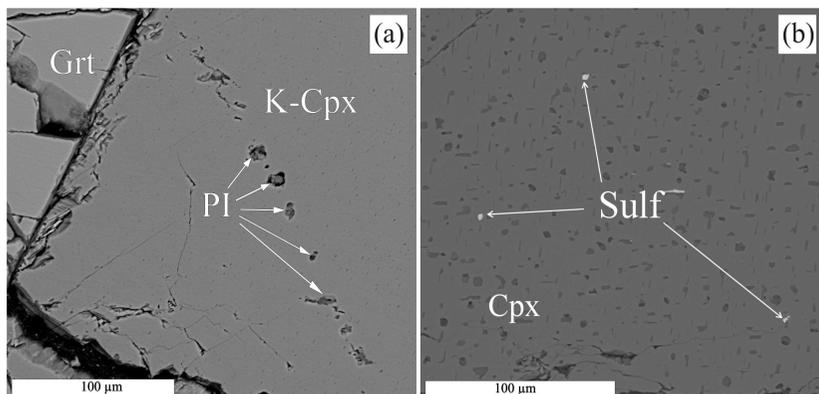


Рис. 7. (а) Фотография в обратно-рассеянных электронах вторичных полифазных включений в клинопироксене. Эти включения трассируют залеченные трещины (Образец А8). (б) Фотографии включений сульфидов в порфиробласте калиевого клинопироксена с ламелями калишпата в обратно-рассеянных электронах. Включения сульфидов сосуществуют с полифазными включениями силикатного состава.

Сульфидные включения представлены пирротинном и сфалеритом и сосуществуют с полифазными силикатными включениями в центральных частях порфиробластов клинопироксена с ламелями (Рис.7, б). При этом, в ядрах калиевого клинопироксена с сульфидами ламели не нарушены, что указывает на ультравысокобарическую природу сульфидов. Различий в редкоэлементном составе сульфидов матрикса с сульфидов-включений не было выявлено. Этот факт, наряду с низкими концентрациями платиноидов свидетельствует в пользу корового происхождения сульфидов карбонатно-силикатных пород Кокчетавского массива.

Глава 5. Реконструкция условий формирования карбонатно-силикатных пород

Для реконструкции РТ-тренда эволюции гранат-клинопироксеновых пород были использованы составы клинопироксена-включения с прогрессивной зональностью по K_2O вдоль профиля и состав граната вблизи клинопироксена-включения с применением геотермометра (Ravna, 2000) и геобарометра (Сафонов и др., 2005). В главе 4 было показано, что состав расплава не

претерпевал изменений во время роста зерен калиевого клинопироксена. Соответственно, расчеты РТ-параметров были основаны на допущении о том, что активности К, Al, Si в расплаве являются постоянными величинами.

Согласно полученным оценкам, давление и температура увеличиваются вместе с содержанием K_2O в клинопироксене (Рис. 8.). Оценки температур и давлений, полученные для ядра клинопироксена с прогрессивной зональностью составляют 5.5 ГПа и 960 °С, тогда как на границе с богатой калием зоной увеличиваются до 7.3 ГПа и 1100 °С. В зоне с регрессивной зональностью по K_2O в клинопироксене температуры и давления резко падают до 950 °С и 4.6 ГПа. Полученные оценки согласуются с оценками условий метаморфизма (Ogasawara et al., 2002; Massonne, 2003; 2011). Таким образом, находки клинопироксенов-включений с прогрессивной зональностью по калию позволили установить фрагменты прогрессивной стадии метаморфизма для карбонатно-силикатных пород Кокчетавского массива (Рис.9.).

Анализ экспериментальных данных о составе и полях стабильности высокобарических фаз в условиях близких к пику метаморфизма
Реконструированный РТ-тренд эволюции карбонатно-силикатных пород Кокчетавского массива (Hermann et al., 2001; Korsakov & Hermann., 2006; Mikhno & Korsakov., 2013) перекрывается полем стабильности калиевого кимрита в области высоких температур от 800 °С до 1100 °С. Следовательно, кристаллизация данной фазы происходит при давлениях, превышающих 4.5 ГПа. Harlow & Davies (2004) было показано, что калиевый кимрит может кристаллизоваться только из расплава, в котором H_2O эквимолярно $KAlSi_3O_8$. Согласно исследованиям (Mosenfelder et al., 2005), высокие скорости эксгумации и отсутствие воды в системе необходимо для сохранения минералов-индикаторов УНР-метаморфизма. Однако, находки калиевого кимрита в качестве дочерней фазы полифазных силикатных включений сосуществующих с флюидными включениями свидетельствуют о высокой активности воды до или на пике метаморфизма. Таким образом, сохранение калиевого кимрита в водонасыщенных условиях требует еще более высоких скоростей эксгумации. Совместное нахождение калиевого кимрита и кокчетавита, наряду с экспериментами по прокаливанию калиевого кимрита (Thompson et al., 1998; Kanzaki et al., 2012) свидетельствует о том, что кокчетавит формируется путем дегидратации калиевого кимрита. Hwang et al. (2013) идентифицировали кокчетавит в качестве минерала ламелей в клинопироксене, тогда как в предшествующих работах (Shatsky et al.,

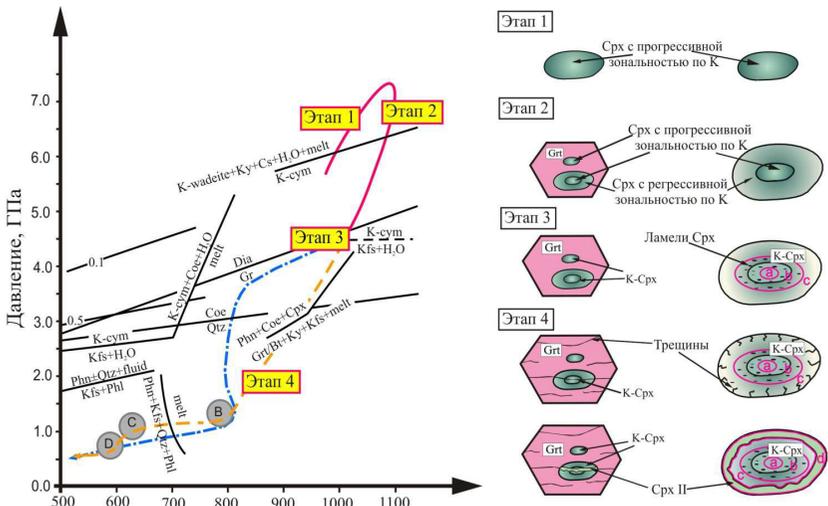


Рис. 9. Модель формирования различных генераций клинопироксена и P-T-эволюция карбонатно-силикатных пород Кокчетавского массива. Сплошная красная линия - P-T-тренд эволюции карбонатно-силикатных пород, реконструированный по данным изучения калийсодержащих клинопироксенов. Прерывистая желтая линия - регрессивная ветвь метаморфизма и этапы B, C, D по данным (Hermann et al., 2001), штрих-пунктирная линия - по данным (Dobretsov & Shatsky, 2004). Переход графит/алмаз - (Chatterjee, 1991) и кварц/коэзит - (Bohlen & Boettcher, 1982), переход коэзит/стишовит (Liu et al., 1996), $K\text{-cym} = Kfs + H_2O$ - (Davies & Harlow, 2002), $Kfs + Phl = Ph + Qz + H_2O$ - (Massonne, 1992), остальные линии заимствованы из работы (Hwang et al., 2004). Kfs - калиевый полевой шпат, Phl - флогопит, Ph - фенгит, m - расплав, St - стишовит, Coe - коэзит, Qz - кварц, Grt - гранат, K-cym - калиевый кимрит, H_2O - жидкая вода.

1995; Перчук и др., 1996; Zhu, 2003; Korsakov & Hermann, 2006) в ламелях фиксировался калиевый полевой шпат. Присутствие ламелей кокчетавита в клинопироксене, являющегося продуктом дегидратации калиевого кимрита ($P > 4.5$ ГПа, $T \sim 1000$ °C), свидетельствует о начале формирования этих ламелей в поле устойчивости калиевого кимрита. Т.к. на сегодняшний момент не существует экспериментальных данных о трансформации калишпата в кокчетавит, то наиболее вероятно, что формирование ламелей калишпата происходит в поле стабильности калиевого полевого шпата ($P < 4.5$ ГПа).

Агрегатное состояние минералообразующей среды на пике метаморфизма. Находки включений силикатного и карбонатитового

состава, а также флюидных включений в одной ростовой зоне клинопироксена указывают на то, что в условиях, близких к пику метаморфизма, в карбонатно-силикатных средах существовали флюид, силикатный и карбонатитовый расплавы. Сосуществование несмешивающихся флюида и силикатного расплава в карбонатно-силикатной системе указывают на то, что даже РТ-параметры пика метаморфизма были ниже второй критической точки для карбонатно-силикатной системы.

Составы силикатных расплавов, реконструированные для разных образцов карбонатно-силикатных пород, сильно варьируют по содержанию калия и кальция. Вариации в содержании калия могут быть объяснены несколькими этапами плавления метапелитов, сегрегации и миграции расплава в карбонатные прослои (Stepanov et al., 2014). Первые выплавки, обогащенные калием, способствуют формированию карбонатно-силикатных пород с К-Срх. Различия в концентрациях кальция в составе силикатного расплава и наличие/отсутствие включений карбонатитового расплава объясняются различным вкладом карбонатной составляющей и гранитного расплава в процесс формирования карбонатно-силикатных пород. Сосуществование включений силикатного расплава, содержащих калиевый кимрит, с включениями преимущественно карбонатного состава свидетельствуют о том, что карбонатитовый и силикатный расплав имеют поле несмесимости в области давлений порядка 4.5 -7 ГПа и температур 950-1100 °С.

Первичные карбонатные включения, по данным Korsakov & Hegmann (2006), наиболее вероятно, представляют собой раскристаллизованный «карбонатитовый» расплав. Появление карбонатитового расплава при $T \sim 1000-1100$ °С могло быть вызвано плавлением метакрбонатов в присутствии свободной флюидной фазы (Thompson & Schmidt, 2008; Poli, 2012). Состав расплава, реконструированный по вторичным включениям в залеченной трещине в калийсодержащем клинопироксене, также является карбонатитовым ($SiO_2 \approx 18\%$, $MgO \approx 7.5\%$, $CaO \approx 41\%$, $CO_2 \approx 32\%$). Однако, для кристаллизации калиевого клинопироксена в зоне трещины необходимо наличие высококалийевого силикатного расплава. В связи с этим мы предполагаем, что калийсодержащий клинопироксен кристаллизовался в присутствии карбонатитового и силикатного расплава.

Сосуществование сульфидных и полифазных силикатных включений в центральных частях порфиробластов калийсодержащего клинопироксена с ламелями свидетельствует в пользу

высокобарического образования (1000-1100 °С и 6-7 ГПа), по крайней мере, части сульфидов. Согласно экспериментальным работам в условиях высоких температур и давлений ($T > 1000$ °С, $P \sim 7$ ГПа) сульфиды не растворяются в силикатном расплаве и присутствуют в системе в виде сульфидного расплава (Литвин и др., 2005; Pal'yanov et al., 2007). Таким образом, наиболее вероятно, несмешивающиеся сульфидный и силикатный расплавы сосуществовали в карбонатно-силикатных породах в условиях близких к пику метаморфизма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволяют сформулировать следующие выводы:

1) Находки калиевого клинопироксена с прогрессивной зональностью позволили реконструировать заключительную стадию прогрессивного этапа метаморфизма, а также исключить гипотезу мантийного образования карбонатно-силикатных пород. Пик метаморфизма для них оценивается в $T = 1000-1100$ °С, $P \sim 6-7$ ГПа.

2) Сосуществование флюидных, полифазных силикатных и карбонатных включений в одной ростовой зоне порфиробластов граната и клинопироксена свидетельствует о том, что кристаллизация этих минералов происходила в присутствии силикатного и карбонатитового расплавов и преимущественно водного флюида.

3) Находки реликтов калиевого кимрита ($KAlSi_3O_8 \cdot nH_2O$) в породах сверхвысоких давлений свидетельствует об очень высоких скоростях экзгумации.

4) Присутствие К-кимрита с кокчетавитом в качестве дочерних фаз расплавных включений наряду с экспериментальными данными по прокаливанию К-кимрита свидетельствует о том, что кокчетавит образуется путем дегидратации К-кимрита.

5) Находки сульфидных включений совместно с полифазными силикатными включениями в центральной зоне порфиробласта калийсодержащего клинопироксена указывают на то, что сульфиды присутствовали в карбонатно-силикатных породах Кокчетавского массива в условиях близких к пику метаморфизма. Наличие признаков декрипитации сульфидных включений, наряду с экспериментальными данными свидетельствует о существовании несмешивающихся сульфидного и силикатного расплавов в условиях близких к пику метаморфизма (6-7 ГПа, 1000-1100 °С).

Основные публикации по теме диссертации:

Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:

Михно А.О., Корсаков А.В. Прогрессивная зональность по К в клинопироксене ультравысокобарных неалмазоносных гранат-клинопироксеновых пород месторождения Кумды-Коль (Кокчетавский массив) // Доклады Академии Наук. – 2012. – Т. 447. – С.552-556.

Mikhno A.O., Korsakov A.V. K₂O prograde zoning pattern in clinopyroxene from the Kokchetav diamond-grade metamorphic rocks: Missing part of metamorphic history and location of second critical end point for calc-silicate system. // Gondwana Research. – 2013. – V. 23. – P. 920-930.

Mikhno A.O., Schmidt U., Korsakov A.V. Origin of K-cymrite and kokchetavite in the polyphase mineral inclusions from Kokchetav UHP calc-silicate rocks: Evidences from Confocal Raman Imaging. // European Journal of Mineralogy. – 2013. – V. 25. – P. 807-816.

Михно А.О., Корсаков А.В. Карбонатитовый, силикатный и сульфидный расплавы: гетерогенность минералообразующей среды в породах сверхвысоких давлений Кокчетавского массива. // Геология и геофизика. – 2015. – Т. 56. – № 1-2. – С. 110-132.

Тезисы конференций:

Korsakov A.V., Golovin A.V., **Mikhno A.O.**, Dieing T., Toporski J., Fluid inclusions in rock-forming minerals from Kokchetav garnet-clinopyroxene diamondgrade metamorphic rocks. // 3th Biennial Conference on Asian Current Research On Fluid Inclusions, Novosibirsk, Russia. Abstract Book. – 2010. P. – 98-99.

Mikhno A.O., Korsakov A.V., Prograde zonation of K₂O in clinopyroxene in diamond-grade UHPM calc-silicate rocks of the Kokchetav massif. // 9th International Eclogite Conference, August 6-9, Marianske Lazne, Czech Republic. Abstract Volume. – 2011. – P. 48.

Mikhno A.O., Korsakov A.V., Schmidt U., Raman imaging of polyphase inclusions in clinopyroxene from UHPMcalc-silicate rocks (Kokchetav Massif): Is kokchetavite anhydrous mineral? // Abstract for 10th GeoRaman International Conference, Nancy, France. – 2012. – P. 257.

Korsakov A.V., **Mikhno A.O.**, Schmidt U., Raman imaging of fluid and “melt” inclusions in K-bearing clinopyroxene: Second critical end point for UHPM garnet-clinopyroxene rocks (Kokchetav massif, Kazakhstan) //

4th Biennial Conference on Asian Current Research on Fluid Inclusions, 2012, Brisbane, Australia. Abstract Book. – 2012. – P. 88-90.

Mikhno A.O., Investigation of polyphase and fluid inclusions in clinopyroxene from diamond-grade calc-silicate rocks of Kokchetav Massif (Northern Kazakhstan) // Abstracts of the 6th International Siberian Early Career Geoscientists Conference, Novosibirsk, Russia. – 2012. – P. 105.

Mikhno A., Shchepetova O., Mikhaylenko D., Korsakov A., Sulfides in ultrahigh pressure rocks of the Kokchetav massif // Advances in High Pressure Research, Novosibirsk, Russia. – 2014. – P. 48-49.

Mikhno A., Gao X.-Y., Korsakov A., Sulfide associations in diamond-grade dolomitic marble from the Kokchetav massif (Northern Kazakhstan): Evidence for the sulfide melt presence at the UHP-conditions // International Association for Gondwana Research, Beijing China. – 2014. – P. 96-98.

Mikhno A.O., Korsakov A.V. Evidence for existence of UHP sulfide melt in calc-silicate rocks from the Kokchetav massif (Northern Kazakhstan) XI International Eclogite Conference // January 31 – February 7, 2015, Dominican Republic. Abstract Volume. – 2015. – P. 79.

Подписано к печати 29 июля 2015 г.
Формат 60×84/32. Печать офсетная
Печ. л. 1,0. Тираж 120. Зак. №182

Издательство СО РАН
630090 Новосибирск, Морской пр., 2
Отпечатано в Издательстве СО РАН

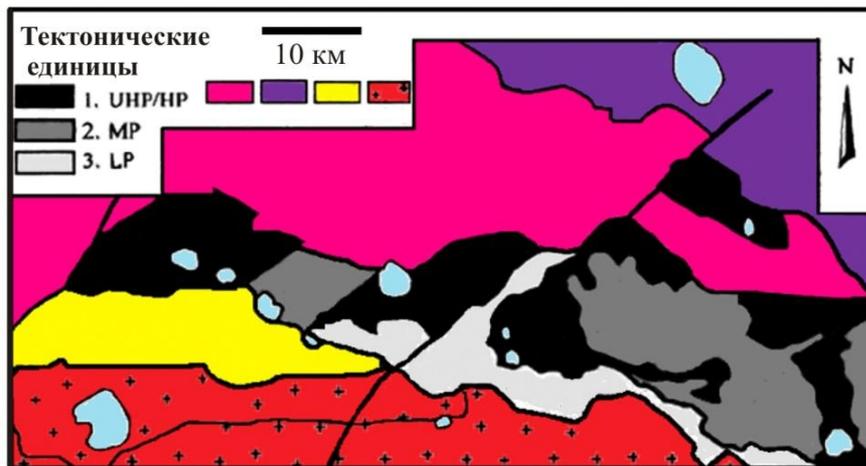


Рис. 1. Геологическая схема центральной части Кокчетавского метаморфического пояса (Добрецов и др., 1998). Породы: НР - высоких, МР - средних, LP - низких давлений.

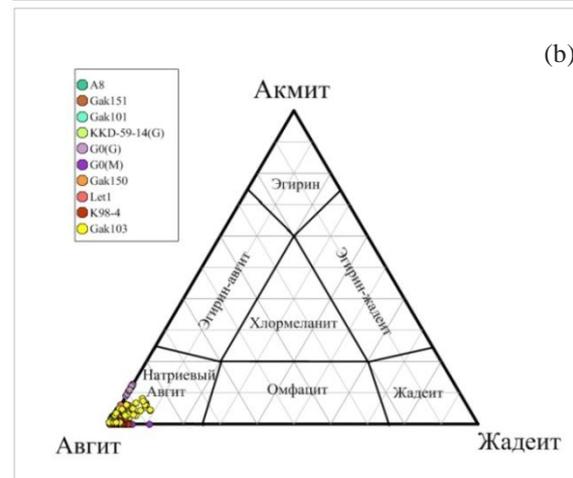
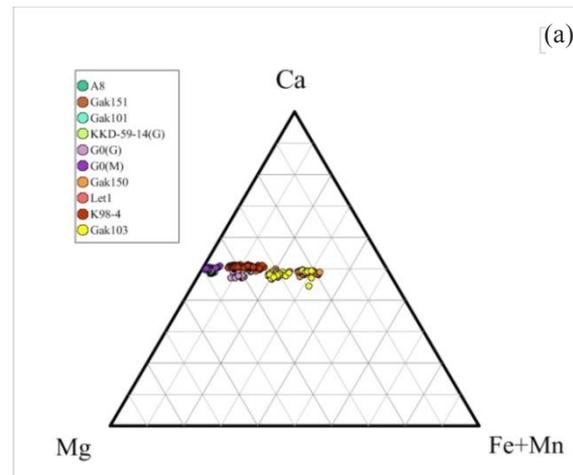


Рис. 2. (а) Соотношение Ca, Mg и Fe+Mn в клинопироксенах карбонатно-силикатных пород. (б) Точки составов клинопироксенов карбонатно-силикатных пород на диаграмме авгит-акмит-жадейт.

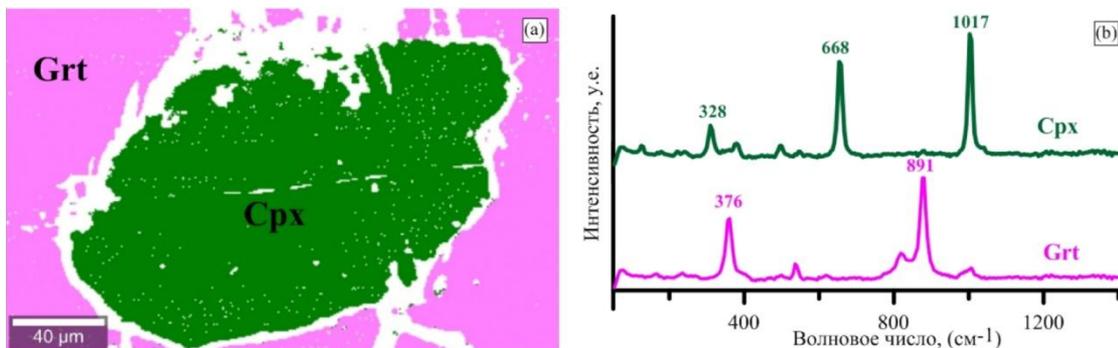


Рис. 3. (а) - КР-карта включения калийсодержащего клинопироксена с прогрессивной зональностью, (б) КР-спектры соответствующие клинопироксену-включению и вмещающему гранату. Обозначения: Grt – гранат, Cpx – клинопироксен.

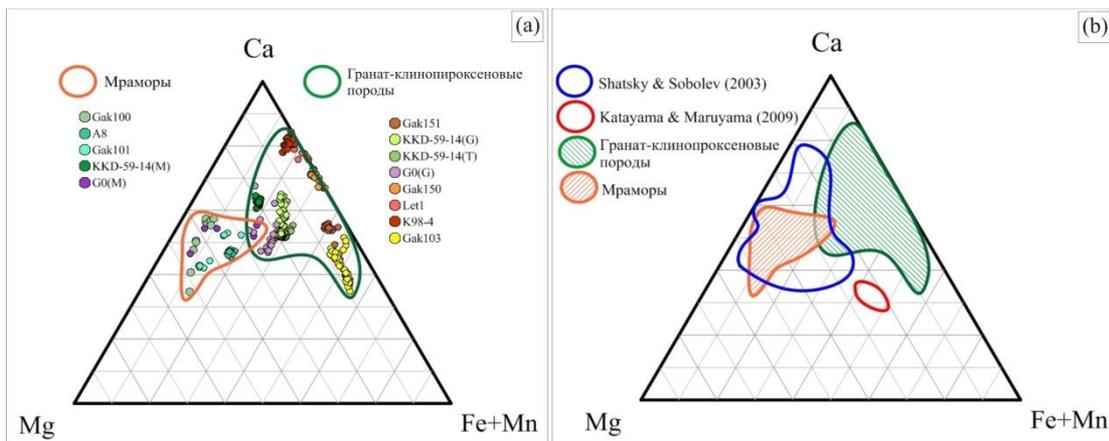


Рис. 4. (а) Составы гранатов различных образцов карбонатно-силикатных пород, нанесенные на диаграмму Ca - Mg - (Mn+Fe). (б) Поля составов гранат-пироксеновых пород и мраморов на диаграмме Ca - Mg - (Mn+Fe). Синей линией обозначено поле гранатов карбонатно-силикатных пород, приведенное в работе (Sobolev et al., 2007, Sobolev et al., 2011), красной - поле составов гранатов карбонатно-силикатных пород из работы (Katayama & Maruyama, 2009).

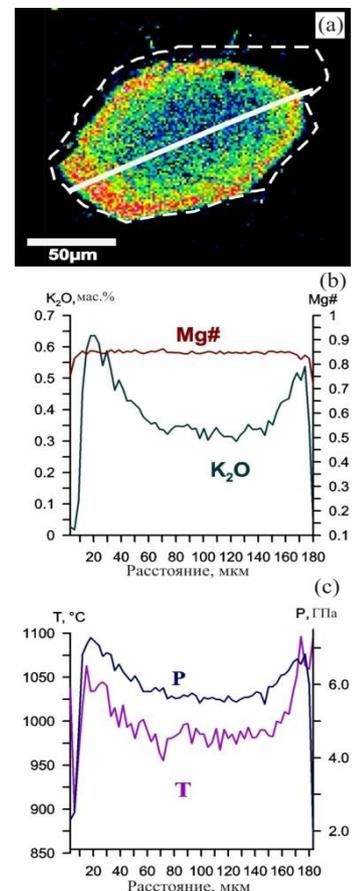


Рис. 8. Включение калийсодержащего клинопироксена с прогрессивной зональностью. (а) Карта по распределению К во включении клинопироксена. (б) Распределение K_2O , изменение магнезиальности во включении калийсодержащего клинопироксена. (с) расчетные значения температур (фиолетовая линия) и давлений (синяя линия).