

На правах рукописи

СЕРДЮК Алена Александровна

**КОНТРАСТНЫЕ РЕЖИМЫ МЕТАМОРФИЗМА В ГРИДИНСКОМ
КОМПЛЕКСЕ (БЕЛОМОРСКАЯ ЭКЛОГИТОВАЯ ПРОВИНЦИЯ)**

Специальность:

25.00.04 – петрология, вулканология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва - 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт экспериментальной минералогии Российской академии наук (ИЭМ РАН).

Научный руководитель:

доктор геолого-минералогических наук
Перчук Алексей Леонидович
(МГУ им. М.В.Ломоносова)

Официальные оппоненты:

доктор геолого-минералогических наук
Слабунов Александр Иванович
Институт Геологии Карельского научного центра
Российской академии наук (КарНЦ РАН, г.
Петрозаводск), заведующий лабораторией

кандидат геолого-минералогических наук
Подлесский Константин Константинович
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт геологии рудных
месторождений, петрографии, минералогии и
геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН, г.
Москва)

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт геологии и
минералогии имени В.С.Соболева
Сибирского отделения Российской академии наук
(ИГМ СО РАН, г. Новосибирск)

Защита состоится «4» октября 2013 г. в 16:00 часов в ауд. 415 на заседании диссертационного совета Д 501.001.62 Геологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119234, Москва, ГСП–1, Ленинские горы, МГУ, Геологический факультет

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале Отдела диссертаций Фундаментальной библиотеки Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., 27).

Автореферат разослан «3» сентября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 501.001.62
доктор геолого-минералогических наук

 Н.Г. Зиновьева

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. К числу наиболее дискуссионных вопросов геотектоники относятся как изменение стилей субдукции на ранних этапах развития Земли, так и время зарождения современного стиля субдукции (Davies, 1992, 2006; de Wit, 1998; Hamilton, 1998; Griffin et al., 2003; Brown, 2006, 2007; Burov and Watts, 2006; O'Neil et al., 2007; Stern, 2007; Condie and Pease, 2008; Shirey et al., 2008; van Hunen and van den Berg, 2008; Condie and Aster, 2010; Sizova et al., 2010, 2013). Главными признаками современного стиля субдукции принято считать наличие в комплексах офиолитов, глаукофановых сланцев и ультравысокобарных пород (Stern, 2005; Brown, 2006). До недавнего времени предполагалось, что из-за высокого геотермического градиента и сравнительно тонкой земной коры первые проявления современного стиля субдукции произошли лишь около 630 млн. лет назад (Caby, 1994; Moeller et al., 1995; Maruyama and Liou, 1998; Parkinson et al., 2001; Jahn et al. 2001; John, Schenk, 2003; Baldwin et al., 2004; Brown, 2006, 2007), что подтверждалось отсутствием находок ультравысокобарных комплексов, датируемых более древними возрастами (Liou et al., 2009). Однако, в последние годы появились свидетельства того, что этот процесс начался значительно раньше. Например, древнейшие на Земле офиолиты из комплекса Исуа, Гренландия имеют архейский возраст (3.8 млрд. лет) (Furnes et al., 2009). В Западном Африканском кратоне не так давно были установлены проявления палеопротерозойского метаморфизма, отвечающего условиям фации глаукофановых сланцев (2.1 млрд. лет) (Ganne et al., 2011). Таким образом, в триаде вещественных индикаторов современного стиля субдукции лишь ультравысокобарные комплексы до недавнего времени имели относительно молодые возраста (предельный возраст не превышает 630 млн. лет, Liou et al., 2009).

В районе с. Гридино (Беломорское побережье Карелии) был обнаружен древнейший на планете эклогитовый комплекс, формирование которого завершилось не менее 1.9 млрд. лет назад (Володичев и др., 2004; Докукина и др., 2009; Скублов и др., 2010). Таким образом, Гридинский эклогитовый комплекс стал уникальным объектом для изучения процессов субдукции (коллизии) в раннем докембрии. На одном из его участков (мыс Гридино) были установлены парагенезисы, отвечающие ультравысокобарным условиям (Dokukina and Konilov, 2011), что несколько нарушило общепринятые представления о единой тектоно-метаморфической

эволюции пород комплекса в составе одного блока (Володичев и др., 2004, Докукина и др., 2009).

Цель работы: восстановление особенностей метаморфической эволюции и генезиса разных типов высокобарных пород Гридинского эклогитсодержащего комплекса.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие **задачи:**

- детальное петрографическое изучение метабазитов Гридинского комплекса;
- выявление парагенетических ассоциаций на разных этапах метаморфической эволюции пород;
- изучение химического состава и выявление химической гетерогенности главных породообразующих минералов;
- изучение минерального и химического состава минеральных включений;
- восстановление метаморфической P-T эволюции пород Гридинского комплекса;
- моделирование нелитостатического давления в минеральных включениях в породообразующих минералах гранат-двупироксенового кристаллосланца;
- экспериментальное изучение состава клинопироксена при его кристаллизации из расплава в системе "габбронорит-вода" в диапазоне температур 900-1300°C и давлении 15 кбар.

Научная новизна

На основании детальных петрологических исследований пород Гридинского комплекса *впервые* установлено:

- кианитсодержащий эклогит (метагаббро) из дайки на острове Эклогитовый претерпел P-T условия ультравысокобарного метаморфизма;
- дайки в зоне коллизии (субдукции) погружались в «сухих» условиях и потому не претерпели явных проградных метаморфических изменений вплоть до P-T условий пика метаморфизма, а эклогиты из исследованных будин и линз, наоборот, испытали проградный метаморфизм в присутствии водно-углекислотного флюида;
- рост граната в эклогитах происходил как от края к центру зерен (II тип эклогитов), так и наоборот - от центра к краю (I тип эклогитов);
- гранат-двупироксеновый и ортопироксеновый кристаллосланцы комплекса были

образованы в результате метаморфических, а не магматических процессов;

- изученные породы из даек метагабброидов и будинированных тел из зоны "мегамеланжа" имеют различные P-T тренды метаморфической эволюции;
- вокруг включений хлорита в породообразующих пироксенах из гранат-двупироксенового кристаллосланца сосуществуют две системы трещин (радиальные и концентрические);
- омфациит не может быть выкристаллизован из расплава габбронорита при давлении 15 кбар.

Практическая значимость

Основные результаты исследования связаны с фундаментальными проблемами петрологии и геодинамики глубинных процессов в зонах конвергенции литосферных плит. Важное практическое значение решения этих проблем – понимание особенностей процессов формирования древнейших орогенных поясов, с которыми могут быть связаны месторождения полезных ископаемых. Знание описанных в диссертации явлений и процессов может помочь в понимании общей геологической ситуации и интерпретации истории геологического развития в районах распространений архейских кристаллических пород, что важно при проведении геолого-съёмочных и поисковых работ.

Защищаемые положения:

- 1) Ортопироксеновый и гранат-двупироксеновый кристаллосланцы имеют магматический облик, но были сформированы в результате проградных метаморфических преобразований хлорит-, амфибол- и биотитсодержащих сланцев в условиях высокобарного метаморфизма.
- 2) Метагаббро на острове Эклогитовый (район с. Гридино, Беломорская эклогитовая провинция) претерпело три этапа метаморфизма в условиях эклогитовой, гранулитовой и амфиболитовой фаций с T/P градиентом менее 350°С/кбар и ультравысокобарными P-T условиями на пике метаморфизма, свидетельствующими о том, что зарождение современного стиля субдукции на Земле происходило не позднее палеопротерозоя.
- 3) Метабазиты Гридинского комплекса характеризуются принципиально разными режимами метаморфизма: погружение одних пород происходило в сухих условиях и без метаморфических преобразований вплоть до пика метаморфизма с последующим

декомпрессионным разогревом и субизобарическим охлаждением; другие породы претерпели проградные изменения, сопровождаемые минеральными реакциями дегидратации, вслед за которыми последовало их декомпрессионное охлаждение и пространственное совмещение с первым типом пород в условиях амфиболитовой фации метаморфизма.

4) На основе экспериментального моделирования кристаллизации габбронорита при температуре 900-1300°C и давлении 15 кбар установлено, что содержание жадеитовой молекулы в магматическом клинопироксене не превышает 10 мол.%, что исключает магматический генезис омфацита в эклогитизированных дайках Гридинского комплекса.

Фактический материал и методы исследования

В работе использовалась подборка из 30 образцов из коллекций А.Л. Перчука, О.И. Володичева, а также отобранных автором во время полевой экскурсии в рамках научной конференции ГЭК-2011 (г. Петрозаводск).

Для детальных петрологических исследований было выбрано 6 наиболее представительных образцов:

- эклогит (образец G2-2) из будины (1.0×0.5 м), находящейся в биотит-амфиболовых гнейсах на ЮВ о-ва Столбиха;
- фенгит-клиноцоизитовый кристаллосланец (образец G2-9) из линзы (~0.4×1.0 м), находящейся в полосчатых биотит-амфиболовых гнейсах в южной части острова Столбиха;
- частично эклогитизированный оливиновый габбронорит (образец B16-50) из линзовидной дайки (20×70 м), прорывающей мигматитовые гранат-клинопироксен-амфибол-биотитовые гнейсы на восточной окраине мыса Гридино;
- кианитсодержащий эклогит (метагаббро) (образец G3-4) из дайки габбрового состава, прорывающей амфиболовые гнейсы о-ва Эклогитовый. Видимая мощность дайки ~ 4-5 м;
- ортопироксеновый кристаллосланец (образец G3-23) из линзовидного тела (~0.4 м в поперечнике) среди мигматизированных плагиогнейсов на востоке острова Избная Луда;
- гранат-двупироксеновый кристаллосланец (образец G4-20) из будины (4×5 м), заключенной в амфибол-биотитовые гнейсы острова Высокий.

Автором были выполнены 5 экспериментов по кристаллизации габбронорита в диапазоне температур 900-1300°C и давлении 15 кбар на высокобарной установке типа «цилиндр-поршень» (ИЭМ РАН, Черноголовка).

Петрологические особенности пород Гридинского комплекса изучались автором с помощью методов оптической и электронной микроскопии и электронно-зондового микроанализа. Было выполнено более 1500 микронзондовых анализов минералов в ИЭМ РАН (Черноголовка), МГУ (Москва) и ИГЕМ РАН (Москва). Химические составы метабазитов были получены с помощью методов силикатного анализа: путем воздушно-сухой навески и методом «мокрой химии» (содержания Na_2O , FeO , CO_2 , H_2O), состав метаультрамафитов – методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии (XRF). Анализы содержаний редкоземельных (РЗЭ) и редких элементов (РЭ) в цирконе были получены на ионном микронзонде Cameca IMS-4f в ЯФ ФТИАН (Санкт-Петербург). Включения хлорита в гранат-двупироксеновом кристаллосланце исследовались методом комбинационного рассеяния (ИЭМ РАН, г. Черноголовка).

Минеральные реакции и P-T параметры эволюции изучаемых пород рассчитывались с помощью программного комплекса winTWQ (версия 2.32 с обновленной базой данных) (Berman, 2007), а также различных геотермометров (гранат-клинопироксенового (Powell, 1985; Ravna, 2000), гранат-ортопироксенового (Harley, 1984), двупироксенового (Brey, Kohler, 1990), гранат-амфиболового (Perchuk et al., 1991) и гранат-хлоритовых (Ghent et al., 1987; Perchuk, 1991)) и барометров (гранат-ортопироксенового (Brey, Kohler, 1990), клинопироксен-плаггиоклаз-кварцевого (Перчук, 1992) и SCAN (McCarthy and Patino Douce, 1998)). В термобарометрии использовались составы центральных и краевых частей кристаллов – классический петрологический подход (Л.Л. Перчук и др., 1983).

Моделирование сверхдавления во включениях в породообразующих минералах гранат-двупироксенового кристаллосланца выполнялось по модели эластичного включения (Gillet et al., 1984). Расчеты осуществлялись с помощью авторских компьютерных программ, созданных на языке Visual Basic, встроенном в программный пакет Microsoft Excel.

Публикации и апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях

различного уровня: международном семинаре по минералогии и петрологии «Структура и разнообразие минерального мира» (Сыктывкар, 2008), конференции «Физико-химические факторы петро- и рудогенеза: новые рубежи», посвященной 110-летию со дня рождения академика Д.С. Коржинского (Москва, ИГЕМ, 2009), «Первой международной научно-исследовательской конференции молодых ученых и специалистов, посвященной памяти академика А.П. Карпинского» (Санкт-Петербург, 2009), ежегодной научной конференции «Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента» (Сыктывкар, 2009, 2010), ежегодной научной конференции «Ломоносовские чтения» (Москва, МГУ, 2010, 2011), ежегодной международной школе по наукам о Земле имени проф. Л.Л.Перчука (2010, 2011), международной конференции, посвященной памяти В.Е. Хаина «Современное состояние наук о Земле» (Москва, МГУ, 2011), научной конференции «Гранулитовые и эклогитовые комплексы в истории Земли (Петрозаводск, 2011). Основные положения работы изложены в 3 статьях в рецензируемых журналах и тезисах 12 докладов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из Введения, 4 глав и Заключения; общий объем составляет 162 страницы; сопровождается 58 рисунками и 57 таблицами. Список литературы включает 202 наименования публикаций отечественных и зарубежных авторов.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю А.Л. Перчуку за ценные советы, внимание, поддержку и терпение; О.И. Володичеву, А.И. Слабунову за обсуждение результатов и предоставленные образцы для исследований; А.А. Вирюс, В.О. Япаскурту за помощь при проведении микрозондовых анализов образцов; К.В. Куликовой за предоставленный образец габбронорита, используемый в экспериментах; С.Г. Скублову за предоставленные анализы зерен циркона гранат-двупироксенового кристаллосланца; В.М. Полукееву за помощь в проведении экспериментов; О.Г. Сафонову, В.В. Федькину, А.Р. Котельникову, Д.А. Варламову и А.В. Кузюре за обсуждение результатов и редакционные правки. Особую благодарность автор выражает В.Н. Сердюку и Ю. Сердюк за неоценимый вклад и поддержку.

Глава 1. Геологический очерк

Гридинский комплекс входит в состав Беломорского подвижного пояса и представляет собой тектоническую пластину северо-западного простирания, прослеживающуюся в прибрежной полосе и на островах Белого моря. Протяженность комплекса составляет около 60 км при ширине 6–7 км.

Основной объем комплекса сложен деформированными биотит–амфиболовыми (\pm гранат \pm клинопироксен) мигматизированными гнейсами. Гнейсы выполняют матрикс зоны меланжа, в котором содержится до 25-30% (от общего объема) обломков различного размера и состава: амфиболиты и эклогиты, реже метаультрамафиты, цоизитовые и скаполитовые породы (Володичев и др., 2004; Слабунов, 2008). Комплекс сечется метаморфизованными в условиях эклогитовой и верхов амфиболитовой фаций дайками габброидов палеопротерозойского возраста, а также интрузиями и жилами плагиогранитов (Володичев и др., 2004; Слабунов, 2008 и ссылки в ней).

Следует отметить, что до сих пор нет единства мнений относительно количества высокотемпературных метаморфических событий, возраста и геодинамической обстановки формирования эклогитовых пород комплекса (табл.1).

Таблица 1. Сценарии магматических и метаморфических событий в эволюции Гридинского комплекса (по литературным данным)

сценарий	Основные события			Методы датирования, источники
	2.8-2.7 млрд.лет	~2.4 млрд.лет	1.9-1.8 млрд.лет	
I	высокотемпературный метаморфизм	роль мафических даек, повторный высокотемпературный метаморфизм	метаморфизм в условиях амфиболитовой фации	U-Pb метод по цирконам, NORDSIM, SHRIMP (Володичев и др., 2004; 2012; Слабунов и др., 2011;)
II	(ультра-?) высокотемпературный метаморфизм, сменившийся гранулитовым метаморфизмом	лейкократовые Bt-Spx-Orx-Pl-Qz* жилы в метагабброидах	метаморфизм в условиях амфиболитовой фации	U-Pb метод по цирконам, SHRIMP (Докукина и др., 2012; Dokukina et al., 2009; Dokukina and Konilov, 2011)
III	кристаллизация магматического габбро	–	эклогитизация пород, за которой последовал амфиболитовый метаморфизм	U-Pb метод по цирконам, SHRIMP - оба события (Скублов и др., 2011); Lu-Hf изохоры по гранатам – эклогитизация (Хервартц и др., 2012).

* Символы минералов здесь и далее по (Kretz, 1983).

Глава 2. Петрография и минералогия

В данной главе рассматриваются парагенетические ассоциации, отвечающие различным этапам метаморфической эволюции пород (доэклогитовый, эклогитовый и постэклогитовые этапы), а также закономерности изменения состава минералов.

В ходе исследований были установлены петрологические отличия эклогитов двух типов, разделяемых ранее по структурным особенностям (Володичев и др., 2004, Травин, Козлова, 2009).

Эклогиты I типа находятся в будинах (рассматриваются на примере эклогита о. Столбиха). Высокобарный парагенезис представлен гранатом, омфацитом и кварцем. В ядрах крупных зерен граната отмечается присутствие водосодержащих минералов (эпидота, хлорсодержащего амфибола), а также альбита и карбоната (рис.1), что свидетельствует о метаморфизме пород в условиях амфиболитовой фации в присутствии С-О-Н флюида на проградном этапе. В краевой части граната находятся включения эклогитового этапа метаморфизма – омфацит, кварц и рутил (рис.1), т.е. рост граната происходил по классическому сценарию – от центра к краю. На регрессивной стадии отмечается рост амфибол±плагиоклазовых кайм вокруг граната, по омфациту образуются клинопироксен+плагиоклаз±амфиболовые симплектиты. Изменения составов граната и клинопироксена, относящиеся к различным этапам метаморфической эволюции породы, представлены на рисунке 2.

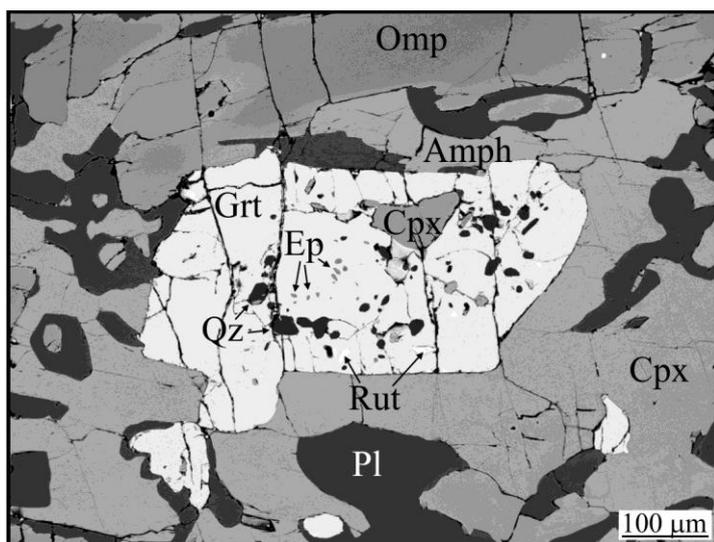


Рис.1. Представительный участок эклогита о-ва Столбиха (I тип). В центральной части граната присутствуют включения, отражающие доэклогитовый этап метаморфизма. В матрице и в краевой зоне роста граната встречаются минералы, отвечающие пику метаморфизма. Симплектиты в матрице отвечают регрессивному этапу. Здесь и далее - фото сделаны в обратно-рассеянных электронах.

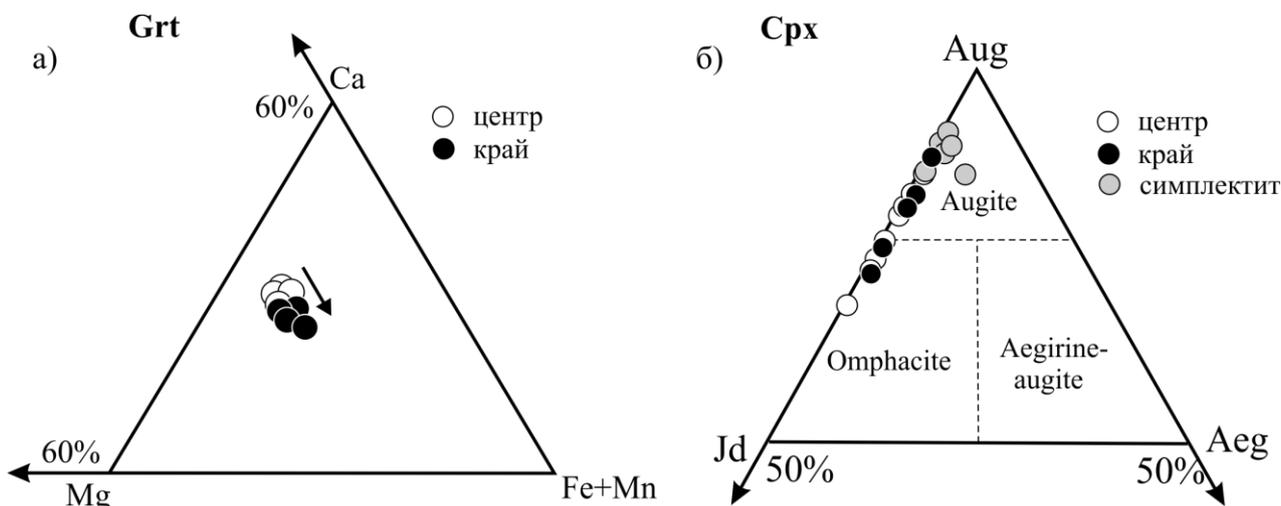


Рис. 2. Изменение составов граната (а) и клинопироксена (б) в эклогите о. Столбиха (I тип).

Эклогиты II типа находятся в дайках и оторванных от них будинах; изученные породы представлены эклогитизированным оливиновым габброноритом с коронарными структурами (именуемый далее коронитом) (мыс Гридино) и кианитсодержащим эклогитом (метагаббро) (о. Эклогитовый). Коронит представляет начальную стадию эклогитизации. В рассматриваемом образце коронита выделяется два домена: плагиоклазовый, обогащенный Na и Al, и пироксеновый, обогащенный Fe и Mg (рис.3). В последнем сохраняются первичные магматические минералы: оливин, клино- и ортопироксены (рис.3). При этом отмечается развитие биотита и гранат-ортопироксеновых симплектитов, отвечающих регрессивному этапу метаморфической эволюции породы. Отличие составов пироксенов, развивающихся на разных этапах эволюции, представлено на рисунках 4 и 5б. В плагиоклазовом домене по магматическому плагиоклазу развиваются высокобарные омфациит+корунд+альбит±шпинелевые симплектиты. Условной границей доменов является пойкилитовый гранат, наиболее быстро купирующий плагиоклазовую область (рис.3). Гранат содержит включения кианита, омфациита и авгита. Образованный на разных этапах метаморфической эволюции гранат характеризуется различными составами (рис. 5а).

Кианитсодержащий эклогит, сложенный гранатом, клино- и ортопироксеном, фиксирует завершённую стадию эклогитизации. В ядрах субидиоморфных зерен граната присутствуют безводные высокобарные минералы: кварц, кианит, омфациит (X_{Jd} до 42 мол. %), отвечающие эклогитовому этапу (пику) метаморфизма.

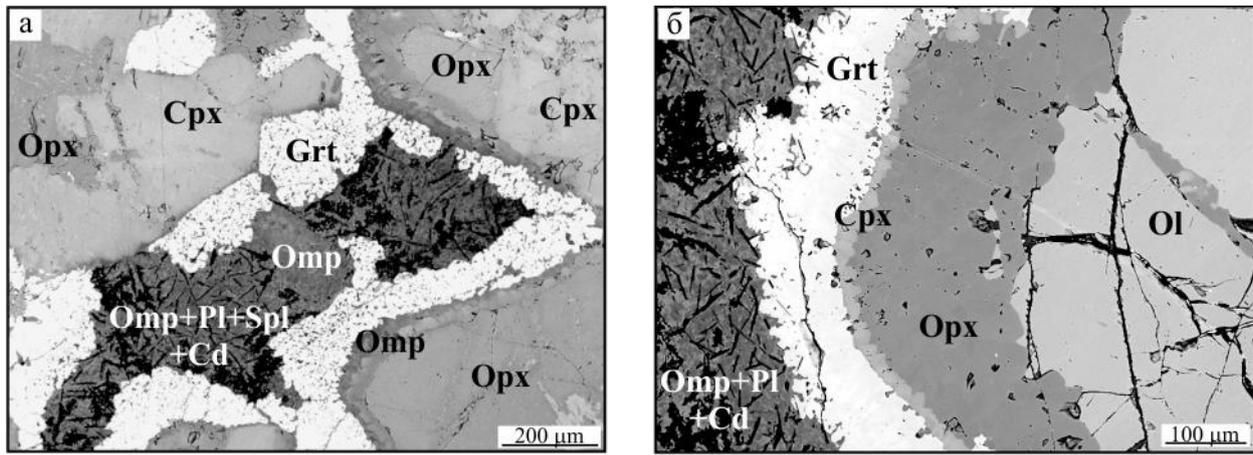


Рис. 3. Коронарные структуры в эклогитизированном оливиновом габбронорите (короните), восточная окраина с. Гридино: а – представительный участок породы (отображены пироксеновый и плагиоклазовый домены); б – развитие метаморфических корон вокруг магматического оливина.

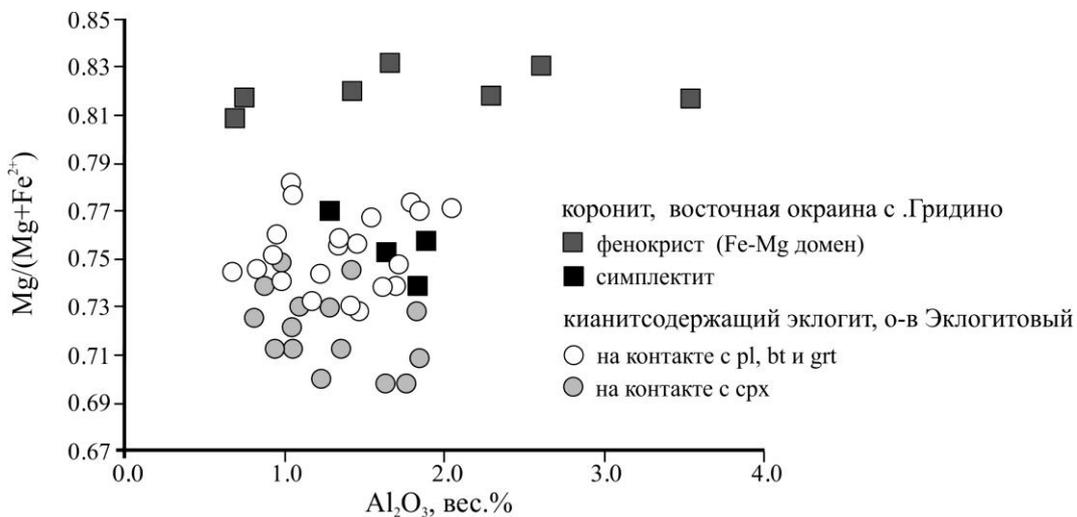


Рис.4. Составы ортопироксенов различной структурной принадлежности эклогитов II типа на диаграмме Al_2O_3 - X_{Mg}

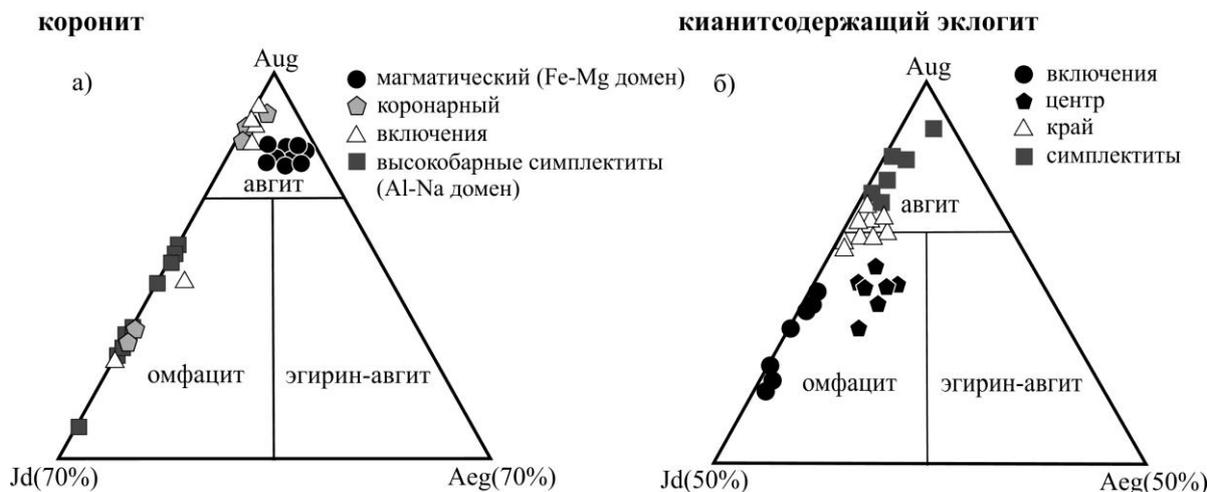


Рис. 5. Составы клинопироксенов из эклогитов II типа: а) коронит, б) кьянитсодержащий эклогит

В матрице породы развиваются минералы, отвечающие гранулитовому (ортопироксен, гранат, кварц, плагиоклаз, клинопироксен) и амфиболитовому (плагиоклаз-клинопироксеновые симплектитовые сростки, гранат, амфибол и биотит) этапам метаморфизма (рис.6).

Ввиду отсутствия явных признаков флюида в породе в эклогитах II типа эклогитовый метаморфизм накладывался на магматическую ассоциацию в сухих условиях, т.е. без проявления проградного метаморфизма. Наличие наиболее высокобарного парагенезиса в центральных частях граната свидетельствует о его обратной схеме роста – от края к центру. Образование омфацита с высоким содержанием жадеита и кианита происходило здесь за счет разложения магматического плагиоклаза.

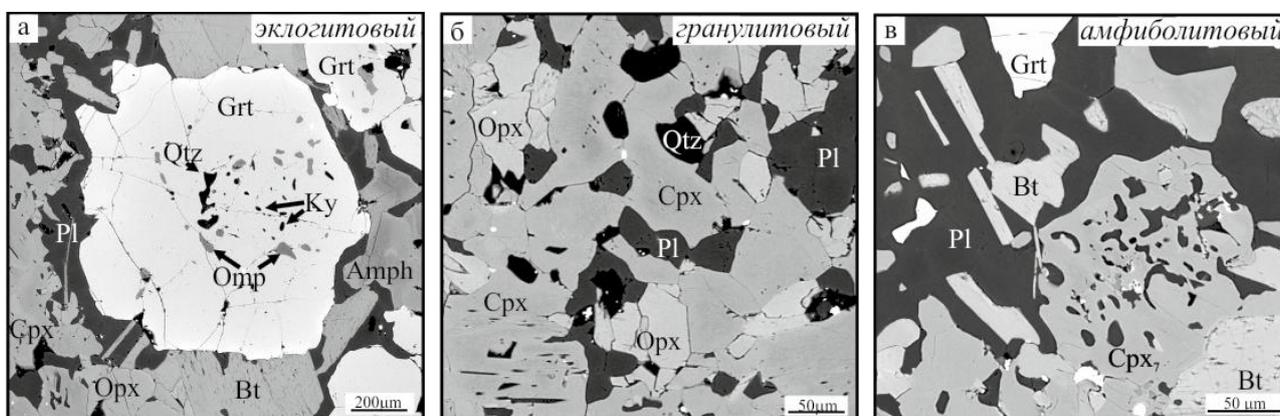


Рис.6. Представительные участки кианитсодержащего эклогита (II тип), отвечающие различным этапам метаморфической эволюции породы.

Гранат-двупироксеновый кристаллосланец (о. Высокий) сложен гранатом, клино- и ортопироксенами (рис.7). Для регрессивной стадии характерно развитие амфибола и мелкозернистой амфибол+гранат+клино-+ортопироксеновой минеральной ассоциации (рис.7в). Регрессивные преобразования наиболее сильно проявлены в краевых частях будины.

В ядрах крупных порфиробластов граната встречаются включения хлорита и карбоната, в краевых частях – клинопироксена и амфибола (рис.7). Наличие включений водосодержащих минералов и карбонатов в ядрах граната свидетельствует о присутствии С-О-Н флюида и условиях амфиболитовой фации метаморфизма на проградном этапе развития породы. Крупные зерна граната имеют слабовыраженную химическую зональность и характеризуются повышенными содержаниями железа и марганца, присущими гранатам коровых (Fe-Ti) перидотитов.

Клинопироксен представлен авгитом с небольшим содержанием жадеитового минала, отмечаются слабовыраженные вариации его состава из разных структурных генераций. В клинопироксене было обнаружено зерно циркона гетерогенного состава, содержащее включение амфибола (рис.7Г).

Амфибол представлен магниальной роговой обманкой и тремолитом. В ортопироксене отмечается четкая зависимость состава от структурной позиции в породе: увеличение содержания Al_2O_3 и снижение магниальности от центра кристалла к краю и далее к симплектитам (рис.8).

Во всех главных породообразующих минералах – гранате, клино- и ортопироксенах встречаются включения хлорита, сосуществующего с фазами, обогащенными РЗЭ (преимущественно Се, Nd, La и др.), а также ураном и торием, - ферродолласеитом (минерал группы эпидота) и ферроторнебомитом. Примечательно, что эти фазы чаще локализуются по периферии включений. Хлорит представлен диабантитом (Неу, 1954). Все включения хлорита окружены трещинами: радиальными в гранате и сосуществующими радиальными и концентрическими в пироксенах (рис.9).

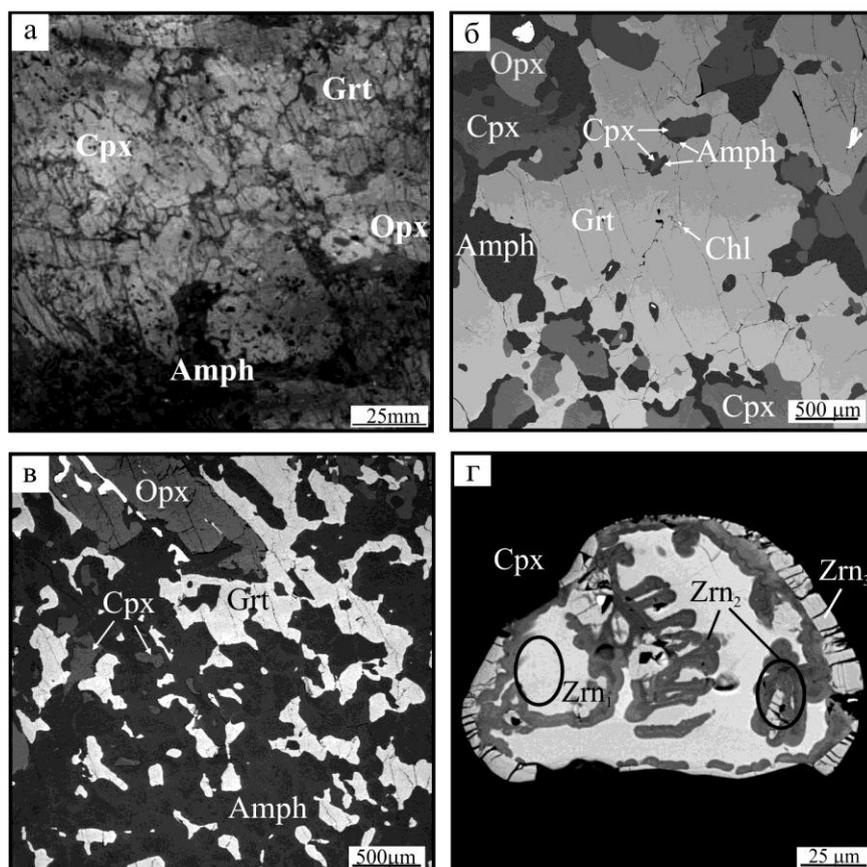


Рис.7. Гранат-двопироксеновый кристаллосланец: а – оптическое фото фрагмента породы в шлифе; б – ксенономорфный кристалл граната с включениями; в – регрессивный агрегат пироксен-гранат-амфиболового состава; г- неоднородное по составу зерно циркона в клинопироксене; овалы – участки анализа.

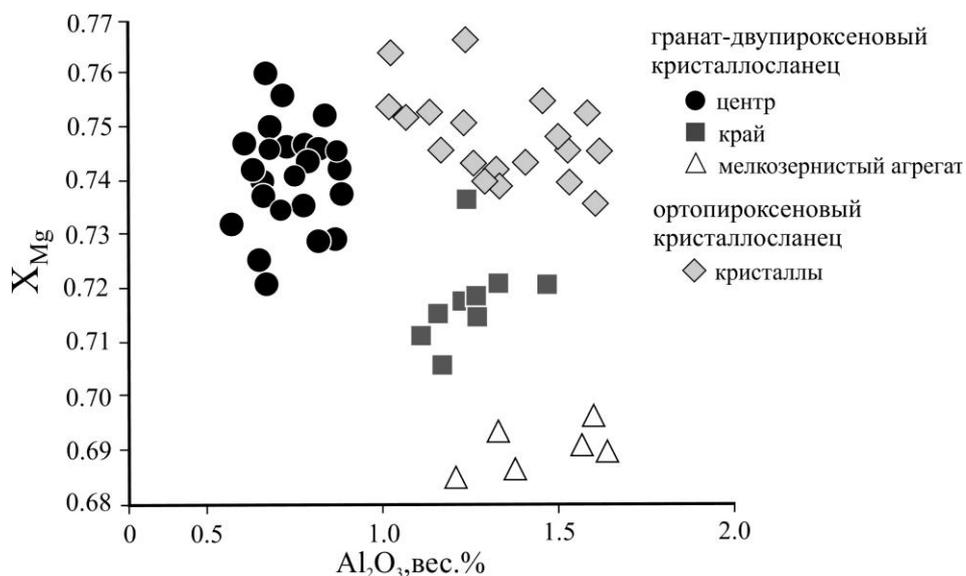


Рис. 8. Диаграмма $Al_2O_3-X_{Mg}$ для ортопироксенов метаультрамафитов, показывающая отчетливую зависимость состава минерала от структурного положения в породе.

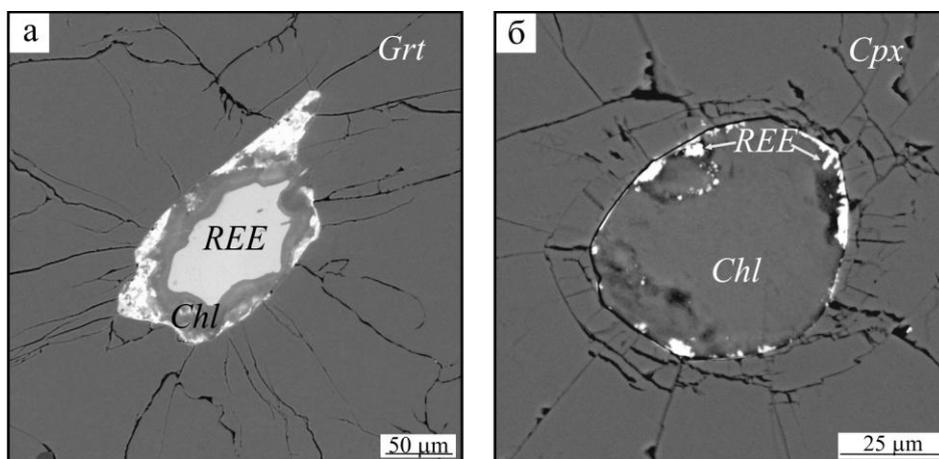


Рис. 9. Включения хлорита: а – в гранате, б – в клинопироксене, окруженные характерными радиальными и концентрическими трещинами.

Ортопироксеновый кристаллосланец (о. Избная Луда) имеет массивную текстуру и гигантокристаллическую структуру. Таблитчатые кристаллы ортопироксена достигают 10-15 см и содержат большое количество включений биотита, амфибола и кварца, а также рудных минералов – магнетита, пирита, ильменита (рис. 10).

Кроме того, в ортопироксене встречаются многочисленные флюидные первично-вторичные включения, цепочки которых прерываются на границе с твердофазными включениями. Параметры состава ортопироксена представлены на рисунке 8. Амфибол представлен магнезиальной роговой обманкой и антофиллитом. Кварц содержит включения антофиллита и единичные – доломита.

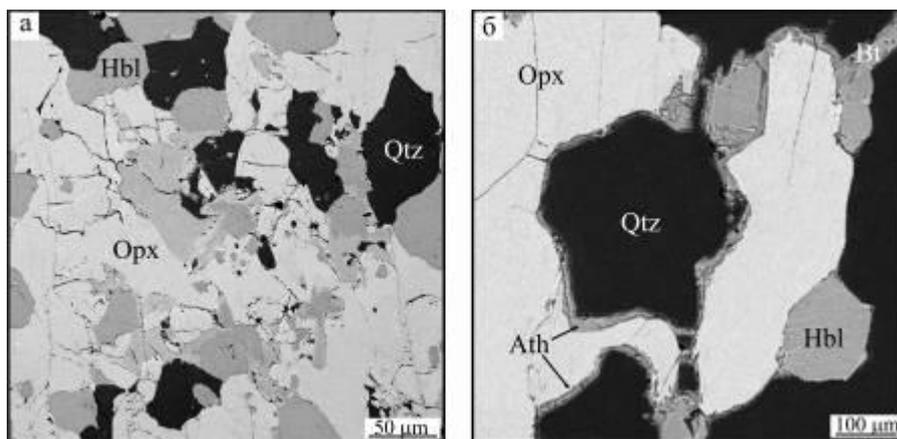


Рис. 10. Ортопироксеновый кристаллосланец: а – обилие включений биотита, амфибола и кварца в монокристалле ортопироксена; б – реакционные каймы антофиллита вокруг включений кварца.

Особенности минеральных преобразований в эклогитах

Выделяемые по структурным особенностям (будины и дайки) эклогиты отчетливо различаются как по петрологическим характеристикам, так и по особенностям эволюции. В эклогитах I типа (будинированные тела) проявлен прогрессивный метаморфизм в присутствии С-О-Н флюида. Гранат на этом этапе рос от центра к краю, что подтверждается присутствием в его ядрах включений относительно низкобарных водосодержащих минералов. В эклогитах II типа эклогитовый метаморфизм накладывался на магматическую ассоциацию без прогрессивного этапа метаморфизма, что, вероятно, связано с отсутствием водосодержащего флюида – катализатора метаморфических реакций. Присутствие в центральных частях граната наиболее высокобарного парагенезиса связано с преимущественным ростом граната от края к центру, т.е. с наиболее быстрым замещением плагиоклазовых доменов исходного габброида.

Глава 3. Метаморфическая эволюция и P-T условия

В данной главе приводятся результаты термобарометрических исследований metabasites Гридинского комплекса. Большая часть P-T параметров была получена с помощью программного комплекса winTWQ (версия 2.32 с обновленной базой данных DEC06) (Verma, 2007). Для достоверности полученные оценки сравнивались с оценками, рассчитанными при помощи различных геотермобарометров.

Обобщенные результаты термобарометрических исследований представлены в таблице 2 и на рисунке 11.

Порода/Стадия	T, °C	P, кбар
Эклогит I типа		
Эклогитовая стадия	660	13
Пост-эклогитовая стадия	620	10
Коронит		
Эклогитовая стадия	660	18
Пост-эклогитовая стадия	690	13
Кианитсодержащий эклогит (II тип)		
Эклогитовая стадия	660	30
Пост-эклогитовая стадия		
<i>Гранулитовый этап</i>	800	12
<i>Амфиболитовый этап</i>	680	10
Гранат-двупироксеновый кристаллосланец		
Эклогитовая стадия	690	17
Пост-эклогитовая стадия		
<i>Гранулитовый этап</i>	690	12
<i>Амфиболитовый этап</i>	650	9

Таблица.2.
Обобщенная таблица P-T параметров пород Гридинского комплекса, рассчитанных с помощью программы winTWQ (Berman, 2007).

Восстановление P-T параметров доэклогитового этапа затруднено, однако по минеральной ассоциации эклогитов I типа (плагноклаз, клиноцоизит, антофиллит, кальцит и доломит) и гранат-двупироксенового кристаллосланца (кальцит, хлорит и магнезиальная роговая обманка) можно предположить, что ранний этап метаморфизма этих пород происходил в условиях амфиболитовой фации в присутствии С-О-Н флюида. В эклогитах же II типа (короните и кианитсодержащем эклогите) отсутствуют проявления проградной ветви метаморфизма: здесь происходит наложение пикового метаморфизма непосредственно на магматическую ассоциацию в сухих условиях.

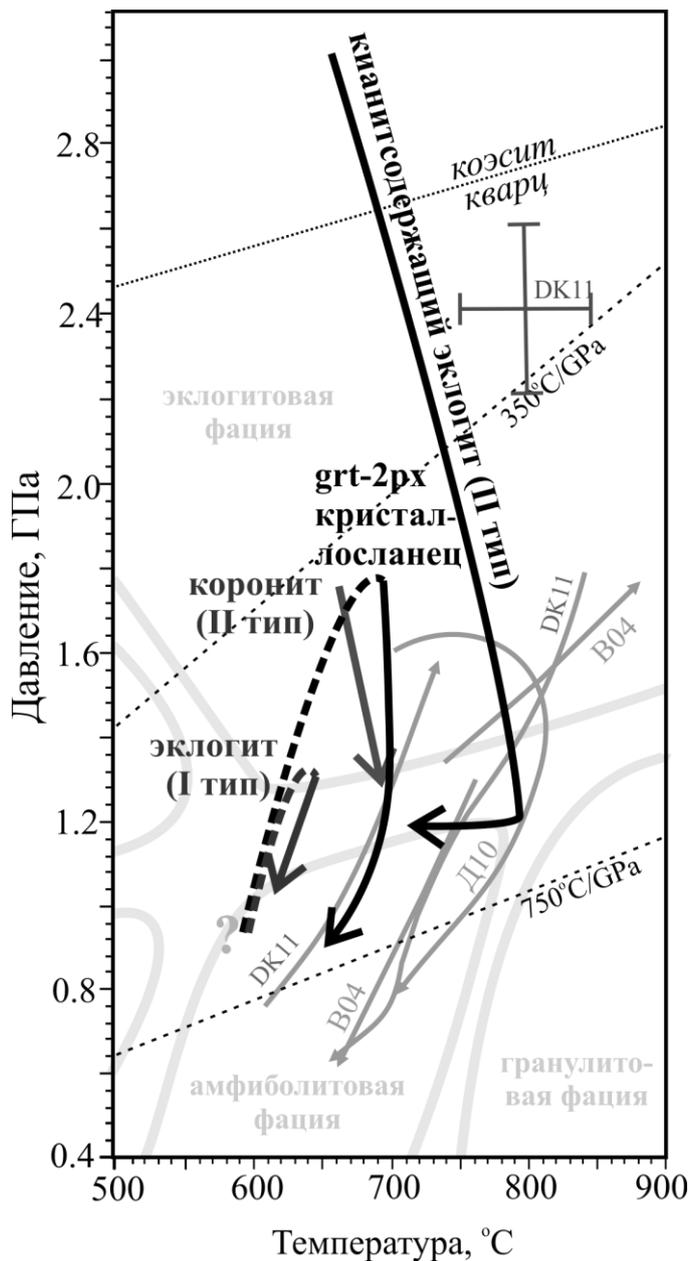


Рис. 11. Обобщенная P-T диаграмма метаморфической эволюции изученных пород Гридинского комплекса и P-T трендов, предлагаемых различными авторами для эволюции всего комплекса (B04 – Володичев и др., 2004; D10 – Докучкина, 2010; DK11 – Dokukina and Konilov, 2011). P-T параметры восстановлены с помощью программы winTWQ (Berman, 2007) Кривая фазового равновесия: кварц = коэсит (Bohlen and Voettcher, 1982); фации метаморфизма (Bucher and Grapes, 2011)

Обсуждение результатов

Природа минеральных включений в гранат-двупироксеновом кристаллосланце

Изолированные включения диабантита, ассоциирующие с фазами, обогащенными РЗЭ, ураном и торием, интерпретируются как свидетельство раннего этапа интенсивных метасоматических или метаморфических преобразований. При этом приуроченность редкоземельных фаз к периферии вакуолей рассматривается как результат преобразования включений после захвата. Уникальное сосуществование двух систем трещин вокруг включений в минерале-хозяине, возможно, обусловлено не только различием *PVT*-свойств хлорита и вмещающего пироксена (граната), но и частичным плавлением включений (Моргунова, Перчук, 2012). Результаты

моделирования, проведенные в данной работе, показывают, что различия в физических свойствах хлорита и вмещающих минералов (граната, клино- и ортопироксенов) недостаточны для создания в рассматриваемых включениях значительных напряжений, способных нарушить прочность вмещающих минералов. Поэтому обнаруженные системы трещин должны быть связаны с фазовыми превращениями во включениях. В их число входят эффекты плавления/кристаллизации включений, а также некие гипотетические смещенные реакции. При этом ни одна из рассмотренных в работе версий (метаморфическая и магматическая) не даёт однозначной интерпретации всем наблюдаемым фактам. Тем не менее, очевидно, что включения претерпели серьезные преобразования в ходе метаморфической эволюции породы в условиях *закройтой* системы.

Твердофазные включения в минералах ортопироксенового кристаллосланца

По набору минералов во включениях в ортопироксене (биотит, амфибол, кварц и пирит) можно предполагать, что ортопироксеновый кристаллосланец развивался по кварц-биотит-амфибол-содержащей породе – типичной для средних ступеней метаморфизма. Необходимо обратить внимание, что изолированность включений в ортопироксеновом кристаллосланце нарушалась на регрессивном этапе метаморфизма, когда в вакуоли через стенки минерала-хозяина проникал флюид. Следствием этого процесса стало образование реакционных кайм низкотемпературного антофиллита (рис.10б).

Таким образом, в минералах изученных метаультрамафитов наблюдаются преобразования включений после их захвата, но в одном случае (ортопироксеновый кристаллосланец) процесс имеет открытый характер, а в другом (гранат-двупироксеновый кристаллосланец) – закрытый.

Генезис метаультрамафитов

Составы метаультрамафитов Гридинского комплекса отвечают типичным характеристикам коровых (Fe-Ti тип) пород, что хорошо согласуется с выводами петрологического исследования о существенном преобразовании пород в ходе нескольких этапов метаморфизма. Формирование безводных минеральных ассоциаций происходило на прогрессивной стадии метаморфизма и сопровождалось интенсивной дегидратацией. О масштабности выноса компонентов из гранат-

двупироксенового кристаллосланца при метаморфизме свидетельствует сохранность хлорита и редкоземельных минералов только в виде включений в породообразующих минералах.

Различие термодинамических условий метаморфизма в породах Гридинского комплекса

Восстановленные минеральные равновесия изученных пород Гридинского комплекса показывают, что они не испытывали единой метаморфической P-T эволюции, как предполагалось ранее (Володичев, 2004; Dokukina, Konilov, 2011). Восстановленные прежде (Володичев и др., 2004; Докукина, 2010; Dokukina and Konilov, 2011) P-T тренды характеризуются общим направлением по часовой стрелке (рис. 11), относительно схожими проградными и ретроградными P-T условиями. Эти данные предполагают T/P отношение эклогитов Гридино как $> 500^{\circ}\text{C}/\text{ГПа}$, что значительно превышает T/P отношения, характерные для «горячих» зон субдукции согласно термомеханическому моделированию (Syracuse et al., 2010). Полученные в данной работе тренды для отдельных пород имеют различный характер, а их T/P отношение значительно ниже, чем предполагалось ранее. Например, T/P отношение для эклогитов II типа составляет около $220^{\circ}\text{C}/\text{ГПа}$ и отвечает высоко-ультравысокобарным метаморфическим поясам, но более древнего возраста (≥ 1.9 млрд. лет) (рис.12). T/P отношения других изученных в работе пород ($380\text{-}410^{\circ}\text{C}/\text{ГПа}$) приближаются к нижней границе ($T/P=350^{\circ}\text{C}/\text{ГПа}$) среднетемпературных эклогитовых – высокобарных гранулитовых поясов (Brown, 2006) (рис. 12). Стоит отметить, что полученные ультравысокобарные условия и низкое T/P отношение ($\sim 220^{\circ}\text{C}/\text{ГПа}$) для эклогитов II типа не противоречит прежним оценкам (Володичев и др., 2004; Докукина и др., 2010, 2012; Dokukina and Konilov, 2011), поскольку геотектонические модели и природные наблюдения показывают, что термодинамические условия и время образования разных блоков (будин, линз, доменов) в одном (ультра)высокобарном комплексе могут заметно отличаться (Gerya et al., 2002; Hacker, 2007).

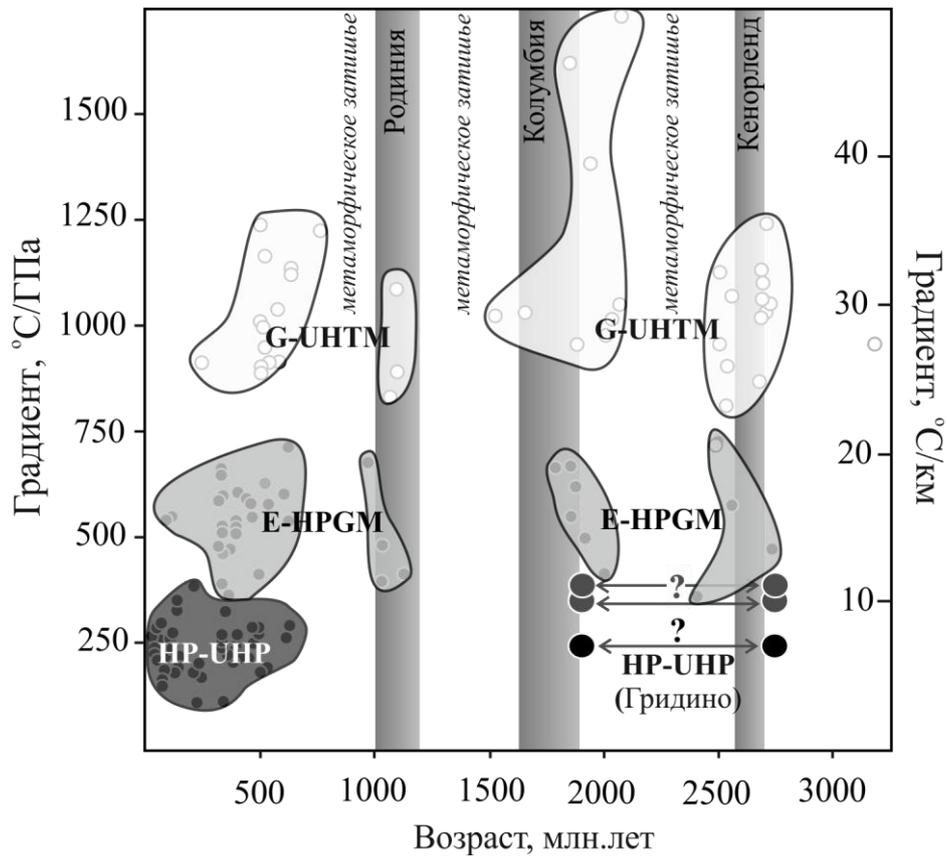


Рис.12. Породы Гридинского комплекса (крупные кружки) на диаграмме, показывающей связь возрастов и Т/Р градиентов для трех групп комплексов высоких ступеней метаморфизма. Условные обозначения: G-UHTM (светло-серые области) гранулитовые – и ультравысокотемпературные гранулитовые комплексы; E-HPGM (серые области) – среднетемпературные эклогитовые – высокобарные гранулитовые комплексы; HP-UHP (темно-серые области) высоко- и ультравысокобарные. Главные метаморфические события хорошо коррелируют с временами существования суперконтинентов (Condie, Aster, 2010). Залитые области, объединяющие данные по метаморфическим поясам, приведены по Brown (2006).

Геодинамическая интерпретация

На основе обобщения данных по метаморфическим Т/Р градиентам в гранулитовых и эклогитовых комплексах из разных регионов мира (рис.12) М.Браун (Brown, 2006, 2007) пришел к выводу, что низкие Т/Р отношения ($<350^{\circ}\text{C}/\text{ГПа}$) характерны преимущественно для фанерозойских комплексов и являются отражением современного стиля субдукции (коллизии). Однако, эклогиты Гридино, возраст которых превышает 1.9 млрд. лет (а по оценкам некоторых исследователей – 2.8 млрд. лет), также попадают в область пониженных Т/Р градиентов ($<350^{\circ}\text{C}/\text{ГПа}$), показывая, что начало современного стиля субдукции могло начинаться уже в палеопротерозое (рис. 12).

Глава 4. Экспериментальное моделирование кристаллизации габбронорита в высокобарных условиях

Матричный омфациит в глубокометаморфизованных габброидах Гридинского комплекса нередко содержит тонкие ламели ортопироксена. Распад твердого раствора пироксена – широко распространенное явление в магматических системах, чего нельзя сказать о метаморфических процессах, где структуры распада в пироксенах встречаются намного реже. Для проверки гипотезы о магматическом генезисе омфациита была проведена серия экспериментов по кристаллизации габбронорита в диапазоне температур 900-1300°C и при давлении 15 кбар, отвечающем условиям образования большинства высокобарных пород комплекса. Стоит отметить, что в классических экспериментальных работах, посвященных изучению водного солидуса габбро (Lambert and Wyllie, 1972; Huang and Wyllie, 1986), а также фазовым отношениям в системе диопсид-геденбергит-энстатит-ферросилит (Lindsley, 1983) данные по содержанию жадеитового минала клинопироксена – главного индикатора давления (глубинности) пород отсутствуют.

В качестве исходного вещества в экспериментах использовался габбронорит, отобранный в восточной части офиолитового массива Сыумкеу (Полярный Урал). Порошок габбронорита помещался в платиновую ампулу, куда добавлялся 1 вес.% воды.

Эксперименты выполнялись в три этапа: 1) плавление габбронорита при температуре 1300°C в течение часа; 2) последующая кристаллизация при различных температурах в отдельном эксперименте от 1200 до 900°C в течение 48-72 часов (табл. 3); 3) закалка в течение нескольких секунд. Результаты эксперимента представлены в таблице 3.

В самом высокотемпературном эксперименте из расплава кристаллизуются пижонит и авгит. Последний встречается во всех продуктах экспериментов, параметры его состава приводятся на рисунке 13. В диапазоне температур 1200-900°C появляется ортопироксен и плагиоклаз (за исключением эксперимента при T=1000°C). В экспериментах при T=1100 и 900°C встречаются единичные зерна кварца.

Пижонит содержит алюминий, что нехарактерно для данного минерала. Авгит характеризуется высокими содержаниями (Mg+Fe²⁺) относительно Ca, недостатком кремния и повышенным содержанием кальциевого чермака (CaTs) (N_{CaTs}=14-30

мол.%). Количество жадеита в клинопироксенах варьирует от 2 до 10 мол. % (рис. 13).

Таблица 3. Экспериментальные данные кристаллизации расплава габбронорита (+1 вес.% H₂O) при P=15 кбар.

№ опыта	T, °C	длительность, час	продукты опыта
LG3	1300	1	L*, pg, cpx _{Jd} 2-6
LG1	1200	48	L, pg, cpx _{Jd} 4-7, орх, pl,
LG2	1100	48	L, cpx _{Jd} 4-9, орх, pl, q
LG4	1000	72	L, cpx _{Jd} 5-10, орх
LG5	900	60	L, cpx _{Jd} 4-9, орх, pl, q

* L- расплав

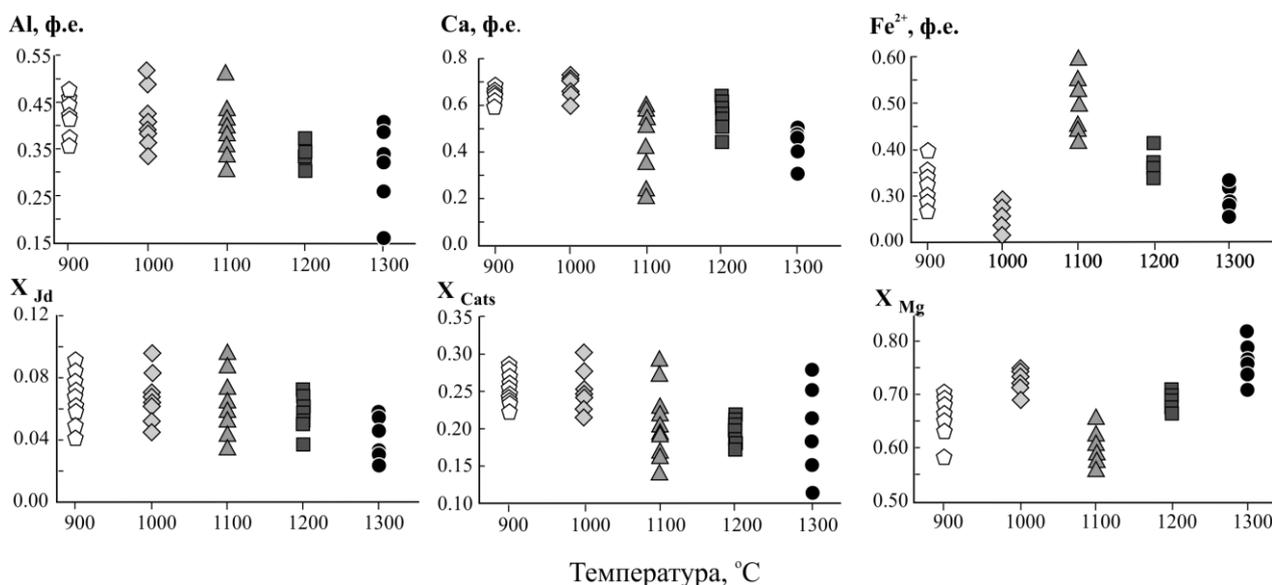


Рис.13. Диаграммы зависимости параметров состава клинопироксенов из продуктов опытов от температуры.

Экспериментальное исследование показало, что максимальное содержание жадеитовой молекулы в клинопироксене, кристаллизующемся из расплава основного состава при барических условиях основания континентальной коры, не превышает 10 мол.%, что исключает магматическую природу омфациита (Jd₂₃) в породах Гридинского комплекса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Породы Гридинского комплекса характеризуются относительно низкими T/P отношениями (220–410°C/ГПа), различными P-T трендами метаморфической эволюции и своеобразным флюидным режимом. В связи с этими данными верхняя граница (ультра)высокобарных метаморфических поясов смещается по крайней мере до палеопротерозоя. Точное определение границы (палеопротерозой или неоархей) будет зависеть от реального возраста эклогитового метаморфизма в породах Гридинского комплекса.

Дальнейшие исследования Беломорской эклогитовой провинции помогут оценить пространственную изменчивость P-T условий и степень их тектонической неоднородности. Для подтверждения ультравысокобарных условий в провинции необходимо продолжить поиски коэсита или других индекс-минералов ультравысокобарного метаморфизма.

Список основных работ по теме диссертации

Статьи

1. **Моргунова*** А.А., Перчук А.Л. Ультравысокобарный метаморфизм в Архейско-Протерозойском Подвижном Поясе (Гридинский Комплекс, Карелия, Россия) // ДАН, 2012. Т. 443. № 3. С. 358– 362

2. **Моргунова А.А.**, Перчук А.Л. Петрология докембрийских метаультрамафитов Гридинского высокобарного Комплекса (Карелия)// Геология и Геофизика, 2012. Т. 53. №2. С.173-192

3. Perchuk, A.L., **Morgunova A.A.** Variable P-T paths and HP-UHP metamorphism in Precambrian terraine, Gridino, Russia: Petrological evidence and geodynamic implications // Gondwana Research, 2013 (опубликовано: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2012.09.009>)

Тезисы

4. **Моргунова А.А.**, 2009. Эклогитизация габброидов острова Безымянный (Беломорский Подвижный Пояс) // Материалы I Всероссийской молодежной научной конференции «Минералы: строение, свойство, методы исследования», Миасс: УрО РАН, 16-20 марта. С. 221-223

5. **Моргунова А.А.**, Перчук А.Л., 2009. Петрология докембрийских метаультрамафитов гридинского высокобарного комплекса, Карелия // Материалы конференции, посвященной 110-летию со дня рождения академика Д.С. Коржинского, Москва: ИГЕМ РАН, 7-9 октября. С. 275-278

6. **Моргунова А.А.**, 2009. Метаморфизм ультраосновных пород Гридинского высокобарного комплекса // Материалы I Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, посвященной памяти академика А.П. Карпинского, 24-27 февраля, СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2009. С. 285-288.

7. **Моргунова А.А.**, Перчук А.Л., 2010 Эволюция метапироксенитов Гридинского высокобарного комплекса, Карелия, «Ломоносовские чтения. Секция «Геология»». Москва, МГУ, 15-20 апреля. <http://web.ru/db/msg.html?mid=1183766&uri=06.html>

8. **Моргунова А.А.**, Перчук А.Л., 2011 Два типа эклогитов в Гридинском высокобарном комплексе (Беломорский подвижный пояс, Карелия): петрология и геотектоническое применение // «Современное состояние наук о Земле». Материалы международной конференции, посвященной памяти Виктора Ефимовича Хаина, Москва, 1-4 февраля С. 1290. <http://khain2011.web.ru/khain-2011-theses.pdf>

9. **Моргунова А.А.**, 2011. Кварцевые вроски в клинопироксенах эцлогитов острова Безымянный (Гридинский комплекс, Карелия) // «Минералогические перспективы» Материалы научной конференции, Сыктывкар, 17-20 мая. С. 112-113

10. **Моргунова А.А.**, Перчук А.Л., 2011. Петрология и геохимия докембрийских метавулканических пород (Гридинский эцлогитовый комплекс, Карелия) // «Гранулитовые и эцлогитовые комплексы в истории Земли». Материалы научной конференции и путеводитель научных экскурсий, Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 16-18 июня. С. 151-155

11. **Моргунова А.А.**, Перчук А.Л., 2011. Нелитостатическое давление во включениях хлорита в породообразующих минералах гранат-пироксеновой породы (Гридинский высокобарный комплекс, Карелия) // «Гранулитовые и эцлогитовые комплексы в истории Земли». Материалы научной конференции и путеводитель научных экскурсий, Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 16-18 июня. С. 155-160

12. Перчук А.Л., **Моргунова А.А.**, 2011. Контрастные режимы эцлогитизации базитов в Гридинском высокобарном комплексе, Карелия // «Гранулитовые и эцлогитовые комплексы в истории Земли». Материалы научной конференции и путеводитель научных экскурсий, Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 16-18 июня. С. 162-165

13. **Morgunova A.A.**, Perchuk A.L. Two pyroxene-garnet rock of the Gridino area of Belomorian mobile belt (Northern Karelia), Karelia, Russia: Record of the prograde and retrograde metamorphic events // Mineralogical Magazine, 2011. V. 75 (3). P. 1502. EGU2010-7046

14. **Моргунова А.А.**, Перчук А.Л., 2011. «Ультравысокобарный метаморфизм в докембрийском комплексе (Гридино, Карелия)», Одесса, 2-9 сентября. <http://www.ises.su/2011/prg.php>

15. **Моргунова А.А.**, Перчук А.Л., 2011. «Ультравысокобарный метаморфизм в архейско-протерозойском подвижном поясе (Гридино, Россия)». «Ломоносовские чтения. Секция «Геология»». Москва, МГУ, ноябрь. <http://web.ru/db/msg.html?mid=1186049&uri=morgunova.html>

***произведена перемена фамилии на Сердюк. Свидетельство И-МЮ № 616228**