

*На правах рукописи*



**АЛИФИРОВА Таисия Александровна**

**ПРОДУКТЫ РАСПАДА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ В  
ГРАНАТАХ И ПИРОКСЕНАХ (НА МАТЕРИАЛЕ  
МАНТИЙНЫХ КСЕНОЛИТОВ ИЗ КИМБЕРЛИТОВ)**

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.

**Научный руководитель:**

**Похиленко Людмила Николаевна**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник ФГБУН Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН

**Официальные оппоненты:**

**Соловьева Лидия Васильевна**, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН Института земной коры СО РАН

**Перчук Алексей Леонидович**, доктор геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой петрологии геологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт экспериментальной минералогии Российской академии наук (г. Черноголовка)

Защита состоится 2 октября 2015 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.067.02, созданного на базе ФГБУН Института геологии и минералогии имени В.С. Соболева СО РАН, в конференц-зале.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, просп. ак. Коптюга, 3

Факс: 8 (383) 333-21-30, 333-27-92

e-mail: gaskova@igm.nsc.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБУН Института геологии и минералогии имени В.С. Соболева СО РАН (адрес сайта <http://www.igm.nsc.ru>, раздел «Образование»)

Автореферат разослан 16 августа 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор геол.-мин. наук



О.Л. Гаскова

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы:** Исследование структур распада твердых растворов (экссоллюционных структур) дает ценную генетическую информацию о составе, происхождении и эволюции исходных гомогенных минералов (*Патнис, МакКоннелл, 1983; Урусов, 1977, 1987; Хусина, 1987*). Находки подобных образований в силикатах мантийных ксенолитов сравнительно редки и отмечались в ортопироксене, клинопироксене или гранате из пироксенитов, вебстеритов и эклогитов в кимберлитах Якутии (*Бобривич и др., 1964; Соболев, Соболев, 1964; Соболев и др., 1973; Лазько, 1979; Jerde et al., 1993; Соловьева и др., 1994; Афанасьев и др., 2001; Соловьева и др., 2002; Taylor et al., 2003; Roden et al., 2006; Бобров и др., 2012*), в единичных случаях в клинопироксене из эклогитов в кимберлитах Финляндии (*Peltonen et al., 2002*). Опубликованные работы по мантийным ксенолитам сосредоточены на изучении минералов в структурах распада, их взаимоотношений и происхождении только в одном из породообразующих силикатов (клинопироксене, ортопироксене или гранате) в ограниченном числе мантийных парагенезисов. Малоизученными остаются закономерно ориентированные срастания минералов в гранатах. Актуальными являются детализация и анализ минералогических и геохимических данных по структурам распада в сосуществующих гранатах и пироксенах разных парагенезисов, охватывающих весь разрез континентальной литосферной мантии. В рамках данной диссертации на примере мантийных ксенолитов из кимберлитов Якутии и Финляндии проведено систематическое исследование минералогии и геохимии продуктов распада граната, клинопироксена и ортопироксена, которое позволяет выявить связи между парагенетической принадлежностью вмещающих гранатов и пироксенов и ассоциациями минералов в экссоллюционных структурах, а также сопоставить данные *P-T* эволюции исходных минералов.

**Объекты исследования:** породообразующие силикатные минералы (ортопироксен, клинопироксен, гранат) со структурами распада твердых растворов в мантийных ксенолитах из кимберлитовых трубок Якутии (Мир, Обнаженная, Удачная-Восточная, Зарница) и Финляндии (Лахтойоки). Коллекция ксенолитов включает следующие типы парагенезисов: перидотитовый, вебстерит-пироксенитовый, эклогитовый.

**Цель работы:** реконструкция условий образования продуктов распада твердых растворов гранатов и пироксенов на материале мантийных ксенолитов из кимберлитов Якутии и Финляндии.

**Основные задачи:** 1. установить минералы и характер их взаимоотношений в закономерных топотаксических срастаниях в гранате, клинопироксене и ортопироксене. 2. определить минералого-геохимические особенности породообразующих минералов и продуктов их распада.

3. оценить составы исходных гомогенных минералов и условий их стабильности. 4. реконструировать  $P-T$  историю преобразования породообразующих силикатных минералов мантийных ксенолитов.

**Фактический материал, методы исследований и личный вклад автора.** Основой для проведения исследования стала коллекция мантийных ксенолитов, собранных в ходе полевых экспедиций 2001-2002, 2008-2012 гг. Л.Н. Похиленко, в 2009, 2011 и 2012 гг. с участием автора. В работе задействованы образцы из авторских коллекций, предоставленные академиком Н.В. Соболевым и к.г.-м.н. А.В. Головиным. В целом коллекция включает 40 ксенолитов мантийных пород. Минералого-петрографическое исследование образцов проводилось автором лично. В процессе работы было изучено более 120 плоскополированных пластинок и шлифов. Автором выполнено и обработано более 750 анализов рентгеноспектральным методом породообразующих минералов и продуктов их распада, получено более 1200 энергодисперсионных спектров, снято и расшифровано более 450 спектров комбинационного рассеяния минералов закономерно ориентированных сростаний на оборудовании Аналитического центра ИГМ СО РАН и Университета Теннесси (Ноксвилл, США). Для определения модальных соотношений минералов в структурах распада оцифровано и обработано более 600 изображений в отраженном свете и в обратно рассеянных электронах. Выполнены расчеты 86 химических составов исходных гомогенных минералов. Данные по редкоэлементному составу минералов (более 350 анализов минералов) получены методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией в лаборатории исследования флюидов при факультете по наукам о Земле Университета Вирджинии (Блексбург, США) автором лично, а также в научно-исследовательском центре Университета Маккуори (Сидней, Австралия) и в Аналитическом центре ИГМ СО РАН.

**Защищаемые положения:**

*1. Продукты распада гранатов перидотитового, вебстерит-пироксенитового и эклогитового типов парагенезисов представлены 10 минеральными видами. Наиболее распространенным среди них является рутил. Минералогия продуктов распада гранатов и пироксенов перидотитового и вебстерит-пироксенитового типов парагенезисов идентична, что свидетельствует о генетическом сходстве процессов образования исходных гомогенных твердых растворов. Кварц из экссолюционных структур в гранатах эклогитового типа парагенезиса представляет собой параморфозы по коэситу.*

*2. Сохранность структур распада твердых растворов на стадии зарождения и роста или на стадии укрупнения в гранатах и пироксенах мантийных ксенолитов определяется температурой и давлением*

*нахождения мантийных ассоциаций в верхней мантии. Тонкие структуры распада в гранатах и пироксенах консервируются на начальных стадиях образования и характерны для пород, переуравновешенных при температурах 890–1270 °С и давлениях 4.5–5.6 ГПа. Развитые структуры распада сохраняются на более поздних стадиях формирования и наиболее характерны для пироксенов и гранатов из вебстеритов, пироксенитов и зернистых лерцолитов, переуравновешенных при температурах 670–910 °С и давлениях 1.5–4.5 ГПа, а также для пироксенов и гранатов эклогитовых пород, переуравновешенных при температурах 810–1080 °С и давлениях 3.2–4.9 ГПа.*

*3. Исходные гомогенные гранаты и пироксены из пород перидотитового и вебстерит-пироксенитового типов парагенезисов до образования продуктов распада находились в мантии при температурах 1100–1400 °С и давлениях более 5–6 ГПа, минералы из пород эклогитового типа парагенезиса – при температурах 1250–1400 °С и давлениях более 6–8 ГПа.*

**Научная новизна:** В диссертации на материале мантийных ксенолитов перидотитового, вебстерит-пироксенитового и эклогитового типов парагенезисов из кимберлитов Якутии и Финляндии впервые выявлены связи между парагенетической принадлежностью граната, клинопироксена и ортопироксена и минеральным составом продуктов их распада; установлено, что сосуществующие вмещающие минералы претерпели единую *P–T* эволюцию. В экссоллюционных структурах породообразующих силикатов мантийных ксенолитов из кимберлитовых трубок Якутии определены ранее не диагностированные амфиболы, апатит, коэсит, кварц. Охарактеризованные в гранатах и пироксенах структуры распада твердых растворов являются первой находкой в лерцолитовых ксенолитах из кимберлитов Финляндии. Проведенные детальные исследования показали, что закономерно ориентированные дочерние минералы в гранатах (оливин, хромшпинелиды, апатит, Na-Ca-амфиболы, минералы группы кричтонита, коэсит) и пироксенах (Ca- и Na-Ca-амфиболы, апатит) являются продуктами распада твердых растворов. Новым в работе является нахождение в гранатах вебстерит-пироксенитового типа парагенезиса ламелей клинопироксенов, содержащих собственные ориентированные пластинки (рутил, ильменит), а также клинопироксена в сростаниях с плагиоклазом. Аналитически доказано, что обогащение по легким редкоземельным элементам в гранатах, слагающих ламели в пироксенах, унаследовано от минерала-хозяина.

**Практическая значимость работы:** Результаты данного диссертационного исследования могут быть использованы при оценке глубинности формирования новых кимберлитовых тел, потенциальной

алмазонасности россыпей (по индикаторным минералам из концентратов тяжелой фракции) или источников сноса (по индикаторным минералам различных типов отложений). Минералогическими критериями алмазоперспективности материала источника могут служить находки гранатов с тонкими структурами распада, гранатов с хромшпинелидами или с высокой долей пироксенов среди продуктов распада. Полученные данные применимы к прогнозной оценке исследуемых территорий при поисках алмазов и их материнских тел как в пределах Якутской и Финской кимберлитовых провинций, так и в других регионах мира, в которых известны проявления кимберлитового магматизма.

**Соответствие диссертации Паспорту научной специальности:**

Результаты работы соответствуют пункту 2 (минералогия земной коры и мантии Земли, ее поверхности и дна океанов) паспорта специальности 25.00.05.

**Апробация работы и публикации:** По теме диссертации опубликованы 20 работ, из них 4 статьи в российских и зарубежных рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК. Результаты работы были представлены на Федоровской сессии (Санкт-Петербург, 2008), IX и X международных кимберлитовых конференциях (Франкфурт-на-Майне, Германия, 2008; Бангалор, Индия, 2012), международной конференции «AGU Fall Meeting» (Сан-Франциско, США, 2012), международной Гольдшмидтовской геохимической конференции (Флоренция, Италия, 2013), X и XI международных экологических конференциях (Курмайор, Италия, 2013; Рио Сан Хуан, Доминиканская республика, 2015), XI международной конференции «Raman Spectroscopy Applied to the Earth Science – Sensu Latu» (GeoRaman) (Сент-Луис, США, 2014), как лично автором, так и соавторами.

**Структура и объем работы:** Работа состоит из введения, 6 глав и заключения общим объемом 247 страниц. В ней содержится 79 рисунков, 5 таблиц, 4 приложения. Список литературы включает 346 наименований.

**Благодарности:** Автор искренне благодарит Л.Н. Похиленко за научное руководство и всестороннюю поддержку на различных этапах выполнения работы. Глубокую признательность диссертант выражает заведующему лабораторией № 451 Академику РАН д.г.-м.н. Н.П. Похиленко, Академику РАН д.г.-м.н. Н.В. Соболеву, д.г.-м.н. А.В. Корсакову, д.г.-м.н. К.Д. Литасову, к.г.-м.н. А.М. Логвиновой, к.г.-м.н. В.Г. Мальковцу, к.г.-м.н. А.А. Гиберу, к.г.-м.н. А.В. Головину, к.г.-м.н. И.С. Бажану и И.С. Шарыгину за плодотворное сотрудничество и ценные советы при обсуждении результатов работы, д.г.-м.н. Ю.Н. Пальянову, д.г.-м.н. Э.В. Сокол, д.г.-м.н. Д.А. Зедгенизову, д.х.н. Ю.В. Сереткину за конструктивные замечания по содержанию и оформлению рукописи. Особую благодарность за помощь в подготовке образцов автор выражает к.г.-м.н. Е.В. Петрушину. Значительная

часть аналитических данных была получена в ИГМ СО РАН при непосредственной помощи к.г.-м.н. А.Т. Титова, Л.В. Усовой, М.В. Хлестова, к.г.-м.н. Н.С. Карманова, к.г.-м.н. В.Н. Королюка, к.г.-м.н. А.П. Шебанина, к.г.-м.н. С.В. Палесского. Зарубежные коллеги профессор Л.А. Тэйлор, Д. Тэйлор, А. Пэтчен, И.П. Базиотис из университета Теннесси и Л. Феделе из университета Вирджинии оказали содействие при выполнении ряда аналитических работ, за что автор им крайне признателен. Автор особенно благодарит за понимание и неоценимую поддержку к.г.-м.н. А.С. Алифирова. Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ (12-05-31411, 12-05-01043), Президента РФ (МД-1260.2013.5), Министерства образования и науки РФ (№ 14.В25.31.0032).

**Условные обозначения, принятые в автореферате:** Adr – андрадит, Alm – альмандин, Amph – амфиболы, Ap – апатит, Brs – барруазит, CaEs – молекула Са-Эскола, CaTs – молекула Са-Чермака, Chr – хромит и магнезиохромит, Coe – коэзит, Crx – клинопироксен, Ctn – кричтонит, Di – диопсид, Ed – эденит, En – энстатит, Fa – фаялит, Fo – форстерит, Fs – ферросилит, Grs – гроссуляр, Grt – гранат, Hd – геденбергит, Ilm – ильменит, Lvn – ловерингит, Mkt – магнезиокатофорит, NaTi Crx – Na-Ti пироксен ( $\text{Na}(\text{Mg},\text{Fe})_{0.5}\text{Ti}_{0.5}\text{Si}_2\text{O}_6$ ), Ol – оливин, Орх – ортопироксен, Pl – плагиоклаз, Prg – паргасит, Prp – пироп, Qz – кварц, Rt – рутил, Spl – шпинелиды, Sps – спессартин, Uv – уваровит, Wo – волластонит.

## **ГЛАВА 1. Краткий очерк истории изученности и современное состояние исследований структур распада твердых растворов в гранатах и пироксенах мантийных пород (по литературным данным)**

*Структуры распада твердых растворов* относятся к числу закономерных топотаксических сростаний и образуются вследствие неустойчивости исходного твердого раствора при изменении физико-химических условий. Они описаны в гранатах, ортопироксенах и клинопироксенах из кимберлитовых трубок Якутии в мегакристаллах и ксенокристаллах, в мантийных ксенолитах эклогитов, пироксенитов и вебстеритов (*Лазько, 1979; Jerde et al., 1993; Соловьева и др., 1994; Qi et al., 1997; Афанасьев и др., 2001; Соловьева и др., 2002; Taylor et al., 2003; Roden et al., 2006; Гаранин и др., 2011; Бобров и др., 2012*), в том числе в их алмазоносных разновидностях (*Tomilenko et al., 2005; Korsakov et al. 2009; Shatsky et al., 2008*), а также во включениях из алмазов (*Sobolev, Yefimova, 2000; Shatsky et al., 2014; Зедгенезов и др., 2015*). В кимберлитах Финляндии структуры распада описаны в клинопироксенах эклогитов (*Peltonen et al., 2002*).

В предшествующих исследованиях по мантийным ксенолитам из кимберлитовых трубок Якутии хорошо изучен минеральный состав продуктов распада пироксенов, приводятся *P-T* оценки стабильности

исходных пироксеновых твердых растворов. Среди выделившихся минералов в гранатах мантийных ассоциаций из кимберлитов Якутии установлены рутил, ильменит, моноклинный и ромбический пироксены, шпинелиды, оливин; в отдельных работах выполнены оценки  $P$ – $T$  параметров стабильности исходных гранатов (Roden et al., 2006; Бобров и др., 2012). В публикациях (Соловьева и др., 1994; Афанасьев и др., 2001) показано преобразование морфологии продуктов распада в пироксенах и гранатах при длительном отжиге в условиях верхней мантии и прослежена стадийность формирования экссолюционных структур. Тем не менее, ранее не проводилось сравнения минерального состава продуктов распада гранатов и пироксенов согласно их парагенетической принадлежности, изучения геохимии продуктов распада пироксенов, сопоставления данных  $P$ – $T$  эволюции сосуществующих вмещающих гранатов и пироксенов.

## **ГЛАВА 2. Геологическая характеристика района исследования**

В данной главе систематизирована информация о местонахождении, геологическом строении, возрасте и тектонической позиции кимберлитовых трубок, из которых отобраны образцы.

Кимберлитовые трубки Обнаженная, Удачная, Мир и Зарница располагаются на Сибирской платформе и принадлежат Якутской кимберлитовой провинции (ЯКП), занимающей северо-восточную часть платформы (Харькив и др., 1998). Кимберлитовая трубка Лахтойоки находится в северо-западной части Восточно-Европейской платформы на Балтийском щите в составе Финской кимберлитовой провинции (ФКП) (Lehtonen, 2005).

## **ГЛАВА 3. Методы исследования**

Исследование структур распада твердых растворов проводилось с использованием методов оптической и сканирующей электронной микроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния, рентгеноспектрального микроанализа с электронным зондом, масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией (LA ICP-MS). Методом LA ICP-MS в 34 образцах получены редкоэлементные составы граната и клинопироксена, в том числе составы продуктов распада, размер которых был достаточным для анализа (более 60 мкм в поперечнике). При этом проводился мониторинг выжигания вещества по месту (с помощью оптической системы), по времени и, соответственно, по глубине, для того, чтобы не захватить при анализе посторонние примеси (минералы и флюидные/расплавные включения).

Оценки составов исходных гомогенных твердых растворов выполнены на основе химических анализов минералов, слагающих структуры распада, их модальных соотношений и расчетных плотностей. Модальные содержания

определены при анализе изображений с оптического и сканирующего электронного микроскопов с помощью программного модуля PlotCalc. Подробное описание методики расчета приводится в разделе 3.3 диссертации и в работе (Alifirova et al., 2015).

#### **ГЛАВА 4. Минералого-петрографическая характеристика мантийных ксенолитов**

Исследованная коллекция мантийных ксенолитов из 40 образцов включает породы с тремя типами парагенезисов: *перидотитовый* (P-тип; 21 образец), *вебстерит-пироксенитовый* (W-тип; 14 образцов) и *эклогитовый* (E-тип; 5 образцов). Типы пород перечислены в **Таблице 1**.

В гранатах и пироксенах присутствуют моно- и полиминеральные продукты распада (**Рис. 1, 2**). *Полиминеральные* (или составные) *продукты распада* представляют собой сростания выделившихся индивидов.

Закономерные топотаксические сростания в гранатах условно разделены на две группы (**Рис. 3**): а) развитые структуры распада с индивидами более 2–5 мкм в поперечнике; б) тонкие (зачаточные) структуры распада с индивидами менее 0.5 мкм в поперечнике. В 37 образцах коллекции (из 39 с гранатом) гранат содержит структуры распада (в 9 из них только тонкие).

В экссоллюционных структурах в гранатах идентифицировано 12 минералов, в число которых входят рутил, ильменит, клинопироксен, ортопироксен, оливин, минералы группы кричтонита (Lvn, Ctn), апатит, хромшпинелиды, Na-Ca-амфиболы (Mkt, Brs), коэсит, кварц, плагиоклаз (**Таблицы 1, 2**). Из них 10 (исключая последние два) являются продуктами распада гранатового твердого раствора; по встречаемости рутил преобладает над другими минералами. По данным КР-спектроскопии установлено, что кварц из структур распада в гранате представляет собой параморфозы по коэситу (**Рис. 4, 5**). Остаточное давление кварца достигает 1.5–2.0 ГПа, коэсита – 0.9–1.4 ГПа. Плагиоклаз в гранате приурочен к ламелям клинопироксена и не образует в нем самостоятельных закономерно ориентированных включений (**Рис. 6**). В некоторых образцах гранаты содержат ламели клинопироксена с собственными продуктами распада (рутилом, ильменитом) (**Рис. 6**).

Клинопироксен присутствует в 39 из 40 образцов, во всех из них он содержит структуры распада. Ортопироксен находится в 27 образцах, из которых структуры распада наблюдаются в 26 ксенолитах. Продукты распада в пироксенах характеризуются различной морфологией и размером (**Рис. 2, 3**): а) тонкие ламели и иглы толщиной до 5–20 мкм и длиной 20–100 мкм, б) мелкие пластинки длиной до 20–30 мкм и 2–5 мкм в поперечнике, в) крупные пластинки и линзы толщиной до 500 мкм и длиной до нескольких миллиметров, г) отдельные изометричные зерна размером до 50–500 мкм в

поперечнике, д) переходящие в ламели зерна различного размера, расположенные внутри минерала-хозяина или на его периферии, е) изометричные зерна и их срастания в виде цепочек, расположенные вдоль границ зерен или плоскостей спайности пироксенов.

Среди продуктов распада клинопироксена и ортопироксена отмечено 7 и 6 минеральных видов, соответственно, включающих пироксены (Срх или Орх), гранат, рутил, ильменит, хромшпинелиды, Са- и Na-Са-амфиболы (Mkt, Ed, Prg), апатит (Таблицы 1, 2), из них последние два минерала наименее распространены.

## ГЛАВА 5. Химический состав минералов и геотермобарометрические оценки

**Р-тип парагенезиса.** Состав оливина соответствует форстериту с соотношением компонентов  $Fo_{90,2-93,2}Fa_{6,7-9,8}$ , содержание NiO составляет 0.31–0.52 мас.%. Ламель оливина в гранате (Об108/12) трубки Обнаженная содержит 94.5 мол.% форстеритового и 5.5 мол.% фаялитового компонентов, концентрация NiO в ламели оливина достигает 0.63 мас.%. Состав ортопироксена, слагающего порфиробласты, соответствует энстатиту с  $En_{86,5-93,6}Fs_{5,9-10,8}$  и содержанием кальциевого компонента до  $Wo_{2,7}$ . Ламели ортопироксена в клинопироксене близки по составу порфиробластовому ортопироксену тех же пород. Клинопироксен по составу соответствует диопсиду с соотношением компонентов  $Wo_{41,3-48,8}En_{47,8-56,3}Fs_{2,4-6,6}$ . В отдельных образцах (О-39, Об106/12) состав ламелей клинопироксена отличается от состава крупных зерен, особенно по содержаниям  $Al_2O_3$  и  $Na_2O$ . Состав порфиробластового граната варьирует по содержаниям компонентов  $Ppr_{55,6-76,9}Alm_{8,4-13,5}$ , при этом  $Grs_{<7,9}Uv_{<10,3}Adr_{<5,2}$ . Содержания  $TiO_2$  до 0.77 мас.%. В пределах индивидуальных образцов большинство зерен гранатов имеют однородный состав. Зональные гранаты отмечены в перидотитах из трубок Удачная (UV241/09) и Лахтойки (Ка-6). Составы ламелей граната в пироксенах и порфиробластов граната отличаются по некоторым компонентам: например, в образце О-25 содержание  $Cr_2O_3$  в ламелях составляет 1.63 мас.%, в порфиробластах 2.97 мас.%. Шпинелиды в породах представлены хромитом-магнезиохромитом (Cr# 71.3–90.6) или хромшпинелью (Cr# 18.1–36.5) с Mg# 44.1–79.7. Шпинелиды из ламелей в ортопироксене (образец О-436) отличаются по составу от зерен в породе (Cr# 71.8, Mg# 49.4) и отвечают магнезиохромиту (Cr# 61.2, Mg# 59.3).

**W-тип парагенезиса.** Составы ортопироксена в данной группе ксенолитов соответствуют энстатиту с соотношением компонентов  $Wo_{0,2-1,2}En_{87,5-94,6}Fs_{5,0-12,2}$ , в некоторых образцах (О-125, О-332, UV70/03, UV41/03) ортопироксен представлен более железистым энстатитом ( $Wo_{0,2-0,7}En_{75,2-86}Fs_{13,7-24,4}$ ). Ламели ортопироксена в клинопироксене отличаются по составу от ортопироксена матрицы по содержаниям  $Al_2O_3$ , MgO, FeO (различия до

2.0, 1.8 и 0.6 мас.%, соответственно). Клинопироксен относится к диопсиду с соотношениями  $Wo_{43-48.9}En_{44.3-51.6}Fs_{2.1-9.7}$ . Большая часть ламелей клинопироксена в ортопироксене имеет составы, близкие к составам порфиробластов клинопироксена в тех же породах. Состав граната из порфиробластов варьирует от образца к образцу по содержаниям компонентов ( $Prp_{46.3-76.1}Alm_{11.4-44.3}Grs_{<9.3}Uv_{<12.9}Adr_{<6.8}$ ). Содержания  $TiO_2$  до 0.52 мас.%. В клинопироксените из трубки Удачная (UV383/09) гранат имеет зональный состав. В образце UV201/09 содержания  $Cr_2O_3$  в гранате из продуктов распада клинопироксена ниже (1.58 мас.%), чем порфиробластовом гранате (2.38–2.39 мас.%). Шпинелиды в породе (образец UV345/08) представлены хромитом (Cr# до 79.8, Mg# 36.9). В хромите из ламелей в ортопироксене ниже значения Cr# (73.4) и выше Mg# (43.3).

**Е-тип парагенезиса.** Согласно классификации *Morimoto (1989)* составы порообразующего клинопироксена (Срх-I) соответствуют омфациту в ксенолитах трубки Удачная ( $Aug_{43-67}Jd_{31-53}Aeg_{0-4}$ ) и Na-содержащим диопсид-авгитам в образцах из трубок Зарница ( $Aug_{72}Jd_{15-16}Aeg_{10-11}$ ) и Обнаженная ( $Aug_{73-75}Jd_{21-22}Aeg_{3-4}$ ), где  $Aug = Di + Hd + En + Fs + (CaTs + CaEs)$ . Вторичные клинопироксены из симплектитов (Срх-II) характеризуются составами, отвечающими Na-авгитам ( $Aug_{77-93}Jd_{2-20}Aeg_{0-4}$ ). Отличительной чертой данных клинопироксенов является относительно высокое содержание компонента CaTs (10–16 мол.%) по сравнению с составами Срх-II (CaTs < 8 мол.%). По классификации *Coleman et al. (1965)* гранаты из образцов LUV134/10 и UV662/11 принадлежат полю эклогитов группы С и демонстрируют следующие составы  $Prp_{13-19}Alm_{24-41}Grs_{35-59}$ . Составы гранатов из образцов UV58/10 и LUV184/10 лежат в области эклогитов группы В с соотношением компонентов  $Prp_{31-44}Alm_{41-44}Grs_{8-21}$ . Гранат из образца OLK1514 трубки Обнаженная по составу принадлежит полю эклогитов группы А с соотношением компонентов  $Prp_{62-63}Alm_{25-26}Grs_{6-7}$ . Содержания  $TiO_2$  в гранатах до 0.31 мас.%. Ламели ортопироксена, наблюдаемые в клинопироксене из ксенолита OLK1514, по составу отвечают энстатиту ( $En_{84.7}Fs_{13.7}$ ), доля других компонентов сравнительно мала (например, CaTs около 1 мол.%). В составе кианита из гроспидита LUV134/10 соотношение  $Al_2O_3/SiO_2 = 1.65$  ниже идеального (1.7); среди второстепенных компонентов определяются FeO (~0.3 мас.%) и  $TiO_2$  (до 0.06 мас.%).

**Геотермобарометрия.** Для оценки температуры и давления перидотитовых и пироксенитовых пород использовались термометр «Са в ортопироксене» (*Brey, Kohler, 1990*) в паре с гранат-ортопироксеновым барометром (*Brey, Kohler, 1990*), дупироксеновый термометр (*Taylor, 1998*) в паре с гранат-ортопироксеновым барометром (*Nickel, Green, 1985*). Пироксениты и вебстериты с минералами, содержащими развитые структуры

распада, были переуравновешены в мантии при низких-средних температурах и давлениях (1.5–4.5 ГПа и 670–910 °С) (Рис. 7). Близкие  $P$ - $T$  оценки получены для зернистых гранатовых и гранат-шпинелевых лерцолитов из трубок Мир и Обнаженная (1.9–2.4 ГПа и 680–740 °С), гранаты и пироксены в них также содержат развитые структуры распада (Рис. 7). Деформированный гранатовый лерцолит UV831/09 и оливиновый вебстерит UV394/09 из трубки Удачная-Восточная были переуравновешены при более высоких температурах и давлениях (5.2–5.6 ГПа и 1090–1270 °С) (Рис. 7). Примечательно, что в данных породах порфиробласты граната содержат только тонкие структуры распада. Для лерцолитов из трубки Лахтойки  $P$ - $T$  параметры не оценивались, поскольку отсутствуют данные о составе ортопироксена (последний полностью замещен кварцем).

Оценки температур эклогитов проводились по гранат-клинопироксеновым термометрам (Ellis, Green, 1979; Krogh, 1988; Krogh Ravna, 2000). Давления оценивались путем проецирования расчетных значений температур на геотерму с тепловым потоком 40 мW/m<sup>2</sup> (Boyd et al., 1997). Согласно расчетам изученные эклогиты трубок Удачная-Восточная и Зарница были переуравновешены при температурах 970–1080 °С и давлениях 4.1–4.9 ГПа, эклогит из трубки Обнаженная находился в мантии при температуре 813 °С и давлении 3.2 ГПа (Рис. 7).

#### **Геохимические особенности минералов ксенолитов**

**$P$ - и  $W$ -типы парагенезисов.** Характер распределения РЗЭ в клинопироксенах из ксенолитов лерцолитов и оливиновых вебстеритов (т.е. перидотитового типа парагенезиса) сопоставим: спектры имеют выпуклую форму в области легких и средних РЗЭ. Значения  $[La/Yb]_n$  в лерцолитах равны 17.9–42.8, в оливиновом клинопироксените 25.2–52.4, в оливиновых вебстеритах 6.5–166.2. По геохимическим особенностям клинопироксенов из ксенолитов вебстерит-пироксенитового типа парагенезиса выделяются две группы. К первой группе относятся низкотемпературные клинопироксениты и ортопироксениты, в которых отношение  $[La/Yb]_n$  составляет 30.9–187.3, содержания  $La_n$  находятся на уровне 4.5–5.2 хондритовых единиц,  $Yb_n < 0.2$ . Ко второй группе относятся вебстериты и высокотемпературные клинопироксениты, в них отношение  $[La/Yb]_n$  равно 3.6–70.5, содержания  $La_n$  и  $Yb_n$  составляют 9.8–61.2 и 0.5–3.4, соответственно. Редкоэлементный состав включений клинопироксена в гранате и ламелей клинопироксена в ортопироксене практически идентичен составам клинопироксена из порфиробластов.

Отношение  $Ti/Eu$  в клинопироксенах высокое и составляет: 759–4542 в лерцолитах, 795–4860 в оливиновых вебстеритах и 1996–2040 в оливиновом клинопироксените, 3258–5550 в пироксенитах первой группы, 1294–3129 в вебстеритах и пироксенитах второй группы. На диаграмме  $[La/Yb]_n$  –  $Ti/Eu$

точки образцов перидотитового и вебстерит-пироксенитового парагенетических типов формируют единый тренд, интерпретируемый как силикатный метасоматоз (Coltorti et al., 1999) (Рис. 8).

Породообразующие **гранаты** характеризуются спектрами распределения РЗЭ с выраженным увеличением нормированных концентраций от легким к тяжелым (так называемые спектры с простым обогащением), отношение  $[La/Yb]_n$  обычно  $<0.003$ ,  $[La/Ce]_n$  в основном  $<1$ . Геохимически гранаты из структур распада в моноклинном и ромбическом пироксенах обладают рядом сходств и различий с породообразующим гранатом (Рис. 9). В области средних и тяжелых РЗЭ формы их спектров близки и отличаются лишь по уровню хондритовых единиц. Тогда как концентрации легких РЗЭ в гранатах ламелей обычно выше, чем в порфиробластовых гранатах. Соотношение  $[La/Ce]_n$  часто  $>1$ , до 1.4–1.8 в перидотитовых (оливиновый вебстерит О-436) и до 3.2 в пироксенитовых ксенолитах (гранатовый клинопироксенит О-1085). Спектры распределения РЗЭ приобретают «ковшеобразную» форму (Рис. 9). Таким образом, подобный характер распределения РЗЭ в гранатах из экссолуционных структур в пироксенах является их отличительной чертой. Особенность редкоэлементного состава граната индивидуальных образцов, проявленная в закономерном повышении нормированных содержаний тяжелых РЗЭ в ряду тонкие ламели – крупные ламели – край и центр порфиробластов, отражает фракционированное распределение РЗЭ в его различных генерациях (Рис. 9).

**Е-тип парагенезиса.** Распределение средних и тяжелых РЗЭ в **клинопироксенах** коэситовых эклогитов аналогично распределениям в некоторых перидотитах и вебстеритах-пироксенитах. Отличие заключается в резко деплетированном характере распределения легких РЗЭ (до Nd). Концентрации  $La_n$  в эклогитовых клинопироксенах составляют 0.1–1.1. Значения  $[La/Yb]_n$  равны 0.3–4.1,  $[Nd/Yb]_n = 15.4–38.9$ . Аномалии по Eu в клинопироксенах коэситовых эклогитов не отмечено. Клинопироксены из гроспидита LUV134/10 значительно деплетированы по РЗЭ. Содержание  $La_n$  в реликтах клинопироксена находится на уровне 0.3 хондритовых единиц.

Порфиробластовые **гранаты** коэситовых эклогитов имеют спектры распределения РЗЭ с простым обогащением. Соотношение  $[La/Yb]_n \leq 0.002$ , соотношение  $[La/Ce]_n < 1$ . В гроспидите LUV134/10 гранат обогащен средними РЗЭ с  $Eu_n$  на уровне 13–15 хондритовых единиц, деплетирован по легким и тяжелым РЗЭ, отношение  $[La/Yb]_n$  равно 0.164–0.020,  $[Sm/Er]_n > 1$  и составляет 1.9–2.4, отчетливо проявляется положительная Eu аномалия,  $Eu/Eu^* = 1.7–2.2$ .

### **Реконструкция составов исходных гомогенных минералов**

**Р- и W-типы парагенезисов.** Реконструированные составы **клинопироксена** по содержанию компонентов варьируют в пределах  $Wo_{38-}$

$48.6\text{En}_{45.0-54.4}\text{Fs}_{2.4-12.0}$ . Расчетные составы клинопироксенов отличаются более высокими содержаниями  $\text{MgO}$  (13.1-16.7 мас.%) и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (2.0-10.1 мас.%) от составов клинопироксена в матрице ксенолитов, полученных при рентгеноспектральном микроанализе (далее измеренных составов). Концентрации  $\text{TiO}_2$  в реконструированных составах клинопироксена составляют до 1-1.5 мас.%. В породах вебстерит-пироксенитового типа парагенезиса содержания компонента  $\text{CaTs}$  обычно выше в реконструированных составах (до 10.9 мол.%), чем в измеренных (0-4.9 мол.%). В оливиновом вебстерите М4/01 (трубка Мир) в реконструированном составе клинопироксена содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  выше (3.25 мас.%), чем в измеренном составе клинопироксена (2.41 мас.%).

Реконструированные составы **ортопироксена** содержат  $\text{En}_{75.7-93.8}\text{Fs}_{5.1-23.9}$  и близки измеренным составам, отличаясь лишь более высокой долей воластонитового компонента (0.4-4.2 мол.%). Концентрации  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  и  $\text{TiO}_2$  составляют до 6.3, 2.1 и 1.0 мас.%, соответственно. Доля  $\text{CaTs}$  до 12.3 мол.%. Реконструированные составы ортопироксена из оливинового вебстерита О-436 и ортопироксенита UV345/08 характеризуются относительно высокими содержаниями  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (1.3 и 1.2 мас.%, соответственно) по сравнению с измеренными составами ортопироксена матрицы (до 0.44 и 0.48 мас.%, соответственно).

По главным элементам реконструированные составы **граната** с развитыми структурами распада несущественно отличаются от измеренных составов и имеют сходные содержания компонентов ( $\text{Prp}_{45.7-75.4}\text{Alm}_{12.0-43.7}\text{Uv}_{0.1-12.0}$ ). Содержания  $\text{TiO}_2$  до 1.9 мас.%. Реконструированные составы граната с тонкими структурами распада равны измеренным. Выявлено, что в ксенолитах перидотитового и вебстерит-пироксенитового типов парагенезисов из трубок Якутии реконструированные составы гранатов, содержащих развитые структуры распада, близки измеренным составам гранатов с тонкими структурами распада. Они сопоставимы с составами низкохромистых разновидностей гранатов в ксенолитах деформированных перидотитов и гранатов мегакристовой ассоциации из кимберлитов Якутии (Похиленко, Соболев, 1978; Барашков, 1981; Лазько и др., 1983; Соловьева и др., 2008; Agashev et al., 2013), Канады (Hood, McCandless, 2004; Kopylova et al., 2009) и других районов.

**Е-тип парагенезиса.** Реконструированные составы **клинопироксена** эклотитов близки измеренным составам порфиробластового клинопироксена ( $\text{Aug}_{45-77}\text{Jd}_{17-48}\text{Aeg}_{0-11}$ ). Отличие заключается в более высоких концентрациях  $\text{TiO}_2$  (до 2.43 мас.%) и  $\text{P}_2\text{O}_5$  (до 0.5 мас.%), что выражается в повышенных содержаниях  $\text{NaTi Crx}$  (2–5 мол.%) по сравнению с измеренными составами ( $\text{NaTi Crx}$  1–2 мол.%). Доля  $\text{CaEs}$  (1–8 мол.%) и  $\text{CaTs}$  (3–11 мол.%) в

реконструированных составах несколько выше, чем в измеренных (0–6 и 1–8 мол.%, соответственно).

Реконструированные составы **граната** по главным компонентам незначительно отличаются от составов граната, полученных при рентгеноспектральном микроанализе ( $\text{Prp}_{15-63}\text{Alm}_{26-44}\text{Grs}_{6-55}$ ). Концентрации  $\text{TiO}_2$  в них выше и составляют 0.37–1.18 мас.%. Содержание  $\text{P}_2\text{O}_5$  достигает 0.11–0.12 мас.% в составе гранатов из эклогитовых ксенолитов трубки Удачная (UV662/11, UV58/10 и LUV134/10). В этих образцах порфиروبласты граната содержат апатит среди продуктов распада.

## **ГЛАВА 6. Происхождение структур распада в пироксенах и гранатах перидотитов, вебстеритов-пироксенитов и эклогитов из кимберлитов Якутии и Финляндии**

Петрографические характеристики указывают на то, что продукты распада в минералах исследованных ксенолитов обычно проявляются в последовательном ряде: тонкие ламели → крупные ламели. Укрупнение выделившихся индивидов приводит к увеличению их объема с течением времени (при снижении температуры и давления). При длительном отжиге стадия укрупнения сменяется перекристаллизацией структур распада и образуются: ламели, переходящие в зерна → скопления выделившихся зерен → зерна на границе минерала-хозяина. Похожий ряд морфологических переходов был выявлен в пироксенах орогенных массивов (*Sautter, Fabriès, 1990*) и мантийных ксенолитов (*Mercier, Nicolas, 1974; Соловьева и др., 1994*), а также в пироксенах экспериментальных продуктов (*Ried, Fuess, 1986; Weinbruch et al., 2003*).

Развитые структуры распада, присутствующие в гранатах и пироксенах изученных ксенолитов, предполагают нахождение пород в субконтинентальной литосферной мантии (СКЛМ) при сравнительно низких давлениях и температурах в течение длительных периодов времени. Продолжительность периода нахождения четко не определена, тем не менее, на основе неравновесности по Nd изотопии между минералами пироксенитов из кимберлитовой трубки Мир ранее было установлено, что, вероятно, этот период превышал несколько сотен миллионов лет (*Roden et al., 1999, 2006; Agashev et al. 2001*).

По реконструированным составам пироксенов и гранатов (содержавшим развитые структуры распада) перидотитового и вебстерит-пироксенитового типов парагенезисов установлено, что исходные минералы были устойчивы при  $T$  1100–1400 °C и  $P > 5$ –6 ГПа (**Рис. 10**). Как показано ранее, гранаты с тонкими структурами распада находились в мантии при близких  $P$ – $T$  параметрах (1090–1270 °C и 5.2–5.6 ГПа; **Рис. 7**).

Характер распределения РЗЭ в гранатах и клинопироксенах перидотитового и вебстерит-пироксенитового типов парагенезисов имеет

сходные черты, что может указывать на генетическую близость процессов их образования в СКЛМ. Этот вывод согласуется с принятой точкой зрения на формирование гранатов и клинопироксенов в перидотитах в результате фракционной кристаллизации просачивающихся мантийных расплавов (Harte et al., 1993; Burgess, Harte, 1999, 2004; Gregoire et al., 2003; Klein-BenDavid, Pearson, 2008; Agashev et al., 2013). На диаграмме  $[La/Yb]_n - Ti/Eu$  точки образцов перидотитов и вебстеритов-пироксенитов формируют единый тренд силикатного метасоматоза (Coltorti et al., 1999) (Рис. 8). Таким образом, можно предположить, что расплавы, из которых кристаллизовались вебстериты и пироксениты, служили метасоматизирующим агентом по отношению к материнским перидотитовым породам.

Несмотря на то, что для лерцолитовых ксенолитов из трубки Лахтойки не оценивались  $P-T$  параметры переуравновешивания и составы исходных гомогенных пироксенов, имеющиеся минералого-геохимические данные по пороодообразующим минералам и продуктам распада в них согласуются с выводами, основанными на результатах исследования ксенолитов из кимберлитов Якутии.

По реконструированным составам гранатов из эклогитовых пород с использованием геобарометра (Collerson et al., 2010) получены  $P-T$  оценки 6.8–8.4 ГПа и 1300–1400 °С для образцов из трубок Удачная и Зарница, 6.3 ГПа и 1250 °С для эклогита из трубки Обнаженная (Рис. 10).

По результатам работы предполагается, что низкомагнезиальные эклогиты из трубок Удачная и Зарница являлись фрагментами переработанной океанической коры, субдуцированной и подверженной частичному плавлению с образованием TTG-расплавов, т.е. представляют собой остаточные эклогиты, впоследствии приобщенные к континентальной литосфере (Barth et al., 2001, 2002). Протолит высокомагнезиального эклогита из трубки Обнаженная мог иметь гибридное корово-мантийное происхождение (Taylor et al., 2003) или же происходить из нижних частей кумулятивного слоя океанической коры (Barth et al., 2002).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертации можно сформулировать следующим образом:

- В гранатах 10 из 12 идентифицированных минералов (в том числе оливин, хромшпинелиды, апатит, Na-Ca-амфиболы, минералы группы кричтонита, коэсит), слагающих закономерно ориентированные сростания, представляют собой продукты распада исходного гранатового твердого раствора. Рутил среди них является наиболее распространенным минералом и находится совместно с пироксенами в породах перидотитового и

вебстерит-пироксенитового типов парагенезисов и с коэситом и/или апатитом в породах эклогитового типа парагенезиса.

- Установленные в пироксенах продукты распада исходного пироксенового твердого раствора представлены 7 минеральными видами в клинопироксенах и 6 минеральными видами в ортопироксенах. Наиболее распространенными среди них являются моноклинный или ромбический пироксены, рутил, ильменит, гранат, к числу редких относятся Са- и Na-Са-амфиболы, апатит.

- Минералогия продуктов распада в породообразующих силикатах перидотитового и вебстерит-пироксенитового типов парагенезисов идентична, что свидетельствует о генетической связи пироксенов и гранатов в породах данных парагенетических типов.

- Минералы группы кричтонита и оливин в гранатах, шпинелиды и амфиболы в гранатах и пироксенах характерны среди продуктов распада в перидотитовом и вебстерит-пироксенитовом типах парагенезисов. Хромшпинелиды среди продуктов распада граната встречены только в ксенолитах из алмазоносных кимберлитовых трубок (Мир, Удачная, Лахтойки). Ламели амфиболов в гранатах и пироксенах были отмечены только в ксенолитах из неалмазоносной трубки Обнаженная.

- Кварц из экссолуционных структур в гранатах эклогитового типа парагенезиса представляет собой параморфозы по коэситу и не является результатом распада твердого раствора. Апатит в гранате и клинопироксене, а также коэсит (и параморфозы кварца по нему) в гранате наиболее типичны среди продуктов распада в эклогитовом типе парагенезиса.

- Развитые структуры распада в ортопироксене, клинопироксене и гранате характерны для пород, переуравновешенных в верхней мантии при температурах 670–1080 °С и давлениях 1.5–4.9 ГПа. Тонкие структуры распада в гранатах и пироксенах сохраняются на начальных стадиях формирования и присущи глубинным породам, переуравновешенным в верхней мантии при температурах 890–1270 °С и давлениях 4.5–5.6 ГПа.

- Исходные гомогенные минералы перидотитов, вебстеритов-пироксенитов и эклогитов до распада твердых растворов находились в мантии при температурах 1100–1400 °С и давлениях свыше 5–8 ГПа.

- Составы исходных гомогенных гранатов перидотитового и вебстерит-пироксенитового типов парагенезисов близки составам гранатов с тонкими структурами распада, а также составам низкохромистых разновидностей гранатов из ксенолитов деформированных перидотитов и гранатов мегакристовой ассоциации.

- Обогащение по легким редкоземельным элементам в гранатах, слагающих ламели в ортопироксенах и клинопироксенах, унаследовано от минерала-хозяина.

## **Основные публикации по теме диссертации:**

### Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:

1. Похиленко Л.Н., **Алифирова Т.А.** Плагиоклаз и апатит из экссолюционных структур в минералах мантийных ксенолитов // Доклады РАН. – 2011. – Т. 437. – № 4. – С. 540-542.
2. **Alifirova T.A.**, Pokhilenko L.N., Ovchinnikov Y.I., Donnelly C.L., Riches A.J.V., Taylor L.A. Petrologic origin of exsolution textures in mantle minerals: evidence in pyroxenitic xenoliths from Yakutia kimberlites // *International Geology Review*. – 2012. – V. 54. – No. 9. – P. 1071-1092.
3. Похиленко Л.Н., **Алифирова Т.А.**, Юдин Д.С.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  датирование флогопита из мантийных ксенолитов: свидетельства древнего глубинного метасоматоза литосферы Сибирского кратона // Доклады РАН. – 2013. – Т. 449. – № 1. – С. 76-79.
4. **Alifirova T.A.**, Pokhilenko L.N., Korsakov A.V. Apatite,  $\text{SiO}_2$ , rutile and orthopyroxene precipitates in minerals of eclogite xenoliths from Yakutian kimberlites, Russia // *Lithos*. – 2015. – V. 226. – P. 31-49.

### Основные тезисы и материалы конференций:

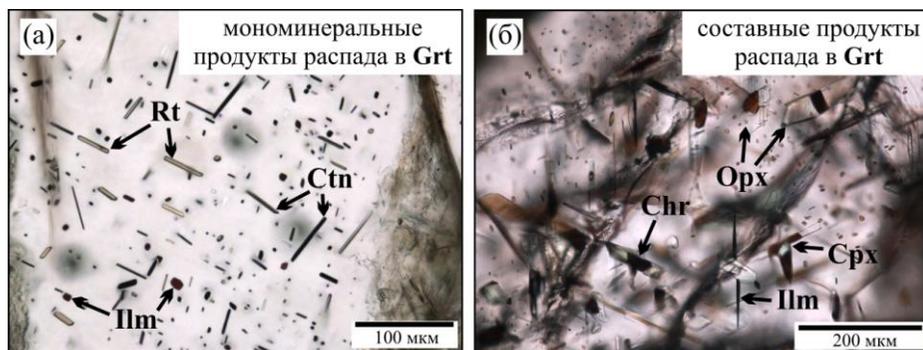
5. Pokhilenko L.N., **Alifirova T.A.** The alkaline minerals from the mantle xenoliths of kimberlite pipes of Yakutia // 10th International Kimberlite Conference, Bangalore, India. Long Abstracts [Электронный ресурс]. – 2012. – Abstract No. 10IKC-028. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
6. **Alifirova T.A.**, Pokhilenko L.N., Malkovets V.G., Griffin W.L. Petrological inferences for the role of exsolution in upper mantle: evidence from the Yakutian kimberlite xenoliths // 10th International Kimberlite Conference, Bangalore, India. Long Abstracts [Электронный ресурс]. – 2012. – Abstract No. 10IKC-048. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
7. **Alifirova T.A.**, Pokhilenko L.N., Ovchinnikov Y.I., Taylor L.A. Mantle minerals from Siberian kimberlites: exsolution textures as petrogenic indicators // AGU Fall Meeting, San Francisco, California, USA [Электронный ресурс]. – 2012. – Abstract No. V51B-2784. – Режим доступа: <https://fallmeeting.agu.org/2012/>.
8. **Alifirova T.A.**, Pokhilenko L.N., Korsakov A.V. Grosspyrite xenolith from Udachnaya: a question of coesite preservation // 10th International Eclogite Conference, September 2–10, 2013, Courmayeur, Italy. Abstract Volume. – 2013. – P. 2.
9. **Alifirova T.A.**, Pokhilenko L.N. Apatite exsolution as an indicator of Udachnaya grosspyrite UHP history // Goldschmidt2013 Conference Abstracts. *Mineralogical Magazine*. – 2013. – V. 77. – No. 5. – P. 576.
10. **Alifirova T.A.**, Pokhilenko L.N., Korsakov A.V. Amphibole in exsolution textures of garnet and its connection with fluid-saturated conditions of ancient subduction zones // Abstract for 11th GeoRaman International Conference, June

15-19, 2014, St. Louis, Missouri, USA [Электронный ресурс]. – 2014. – Abstract No. 5084. – Режим доступа: <http://georaman2014.wustl.edu>.

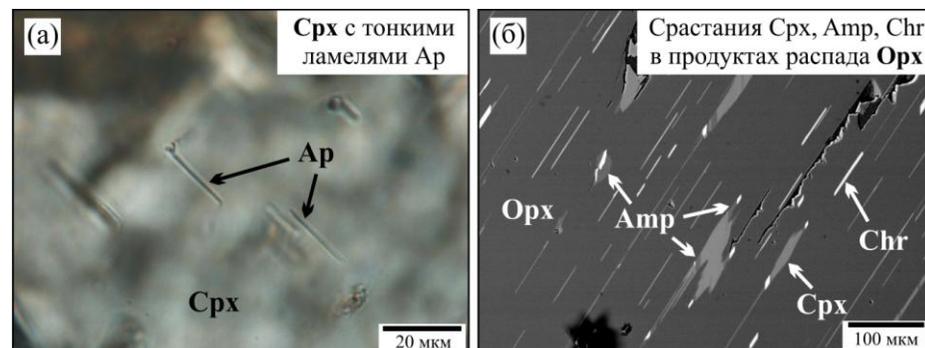
**Таблица 1.** Диагностированные минералы в структурах распада в гранате, клинопироксене и ортопироксене.

Тип парагенезиса	Породы	Минерал-хозяин		
		Grt	Cpx	Orpx
P-тип	Зернистые лерцолиты	Ol, Орх, Срх, Rt, Ilm, МГК, Spl, TCP	Орх, Grt, Rt, Ilm, Spl	Срх, Amp, Rt, Ilm, Spl
	Деформированные лерцолиты	Spl, TCP	Орх	–
	Оливиновые вебстериты	Ol, Срх, Amp, Rt, Ilm, МГК, TCP	Орх, Grt, Rt, Ilm, Amp	Срх, Grt, Amp, Rt, Ilm, Spl
W-тип	Вебстериты	Срх, Rt, Ilm, МГК, Орх, Ol, Pl <sup>‡</sup>	Орх, Grt, Rt, Ilm	Grt, Срх, Rt, Ilm
	Клинопироксениты	Срх, Rt, TCP	Орх, Grt	Grt
	Ортопироксениты	Орх, Срх, Rt, Ilm, Spl, МГК, Ap	Орх, Grt, Rt, Spl	Grt, Срх, Rt, Ilm, Spl
E-тип	Коэситовые эклогиты	Rt, Ilm, Ap, Qz*, Coe	Rt, Ap, Ilm	–
	Биминеральные эклогиты	Rt, Ilm, Ap, Qz*, TCP	Орх, Rt, Ilm, Ap	–
	Гроспидиты	Rt, Ap	Rt, Ap, Ilm	–

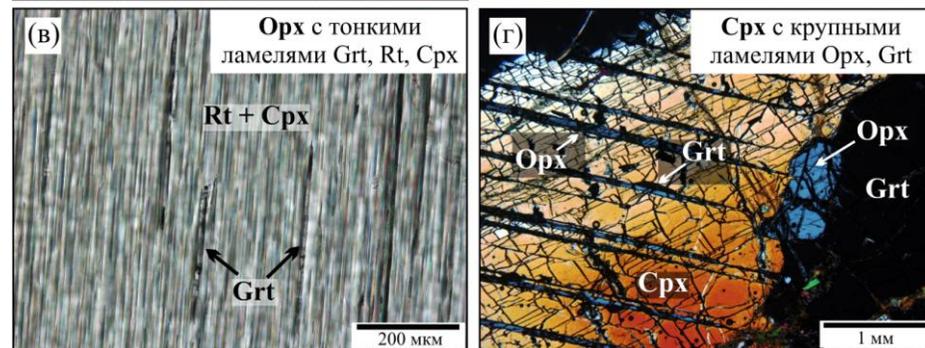
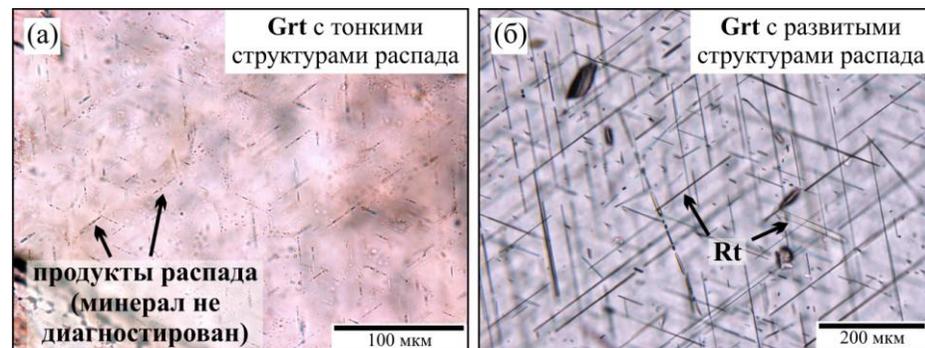
Примечание: МГК – минералы группы кричтонита, TCP – тонкие структуры распада в гранатах, ‡ – только с клинопироксеном в продуктах распада граната, \* – параморфозы по коэситу.



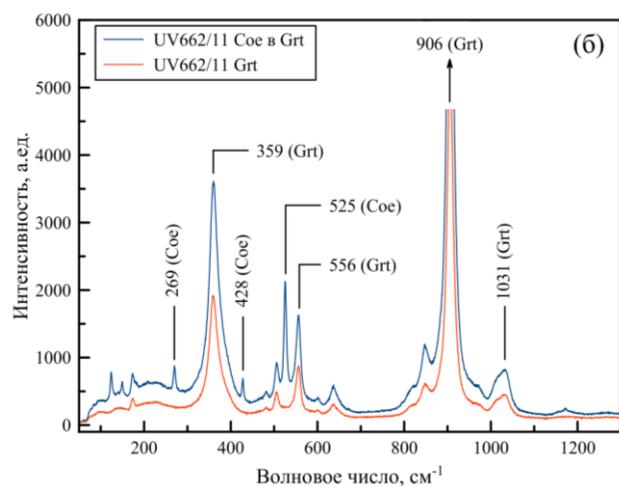
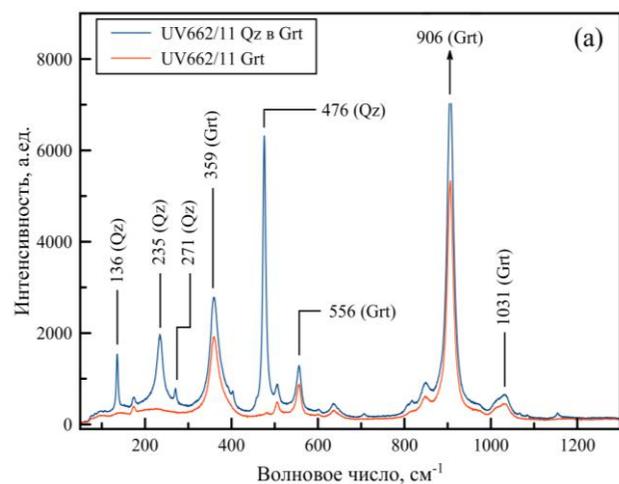
**Рис 1.** Мономинеральные (а) и составные (б) продукты распада в гранате: (а) иглы, пластинки и палочки рутила, ильменита, кричтонита, (б) срастания пластинок и игл орто-клинопироксена, хромита, ильменита в гранате.



**Рис 2.** Мономинеральные (а) и составные (б) продукты распада в пироксенах: (а) тонкие ламели апатита в клинопироксене, (б) – составные «ламели» из клинопироксена, амфибола и хромита в ортопироксене.



**Рис 3.** Продукты распада в гранатах (а-б) и пироксенах (в-г) различной размерности, сохранившиеся на начальных (а) и более поздних (б-г) стадиях формирования.



**Рис 5.** КР-спектры кварца (а) и коэсита (б) из структур распада в гранате, коэситовый эклогит UV662/11 (трубка Удачная).

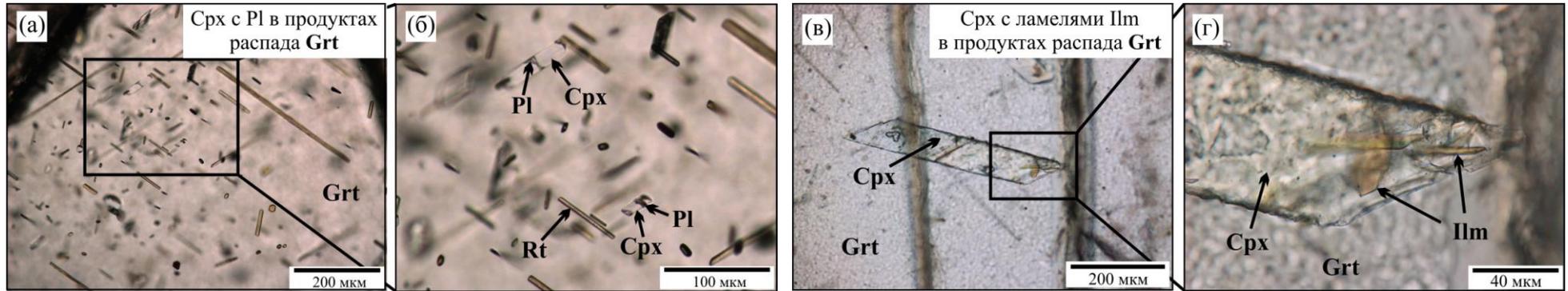


**Рис 4.** Структуры распада в гранате с рутилом, коэситом, кварцем (параморфозы по коэситу), апатитом, коэситовый эклогит UV662/11 (трубка Удачная).

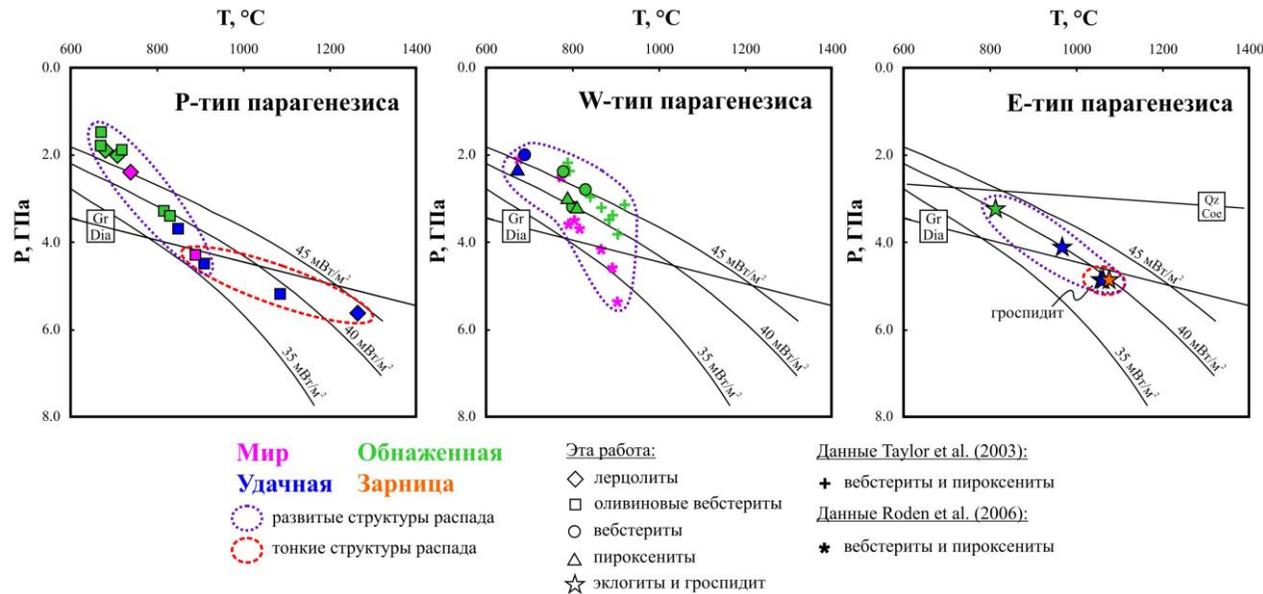
**Таблица 2.** Представительные анализы минералов из продуктов распада Grt, Cpx и Opx.

Образец:	Ob106/12	Ob111/12	O-436	UV345/09	M34/01	O-207	M5/01	UV223/09	O-173	O-207
ПР:	<b>Mkt</b>	<b>Mkt</b>	<b>Chr</b>	<b>Chr</b>	<b>Rt</b>	<b>Rt</b>	<b>Ilm</b>	<b>Ilm</b>	<b>Ctn</b>	<b>Lvn</b>
MX:	Grt	Cpx	Opx	Opx	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt
SiO <sub>2</sub>	47.2	47.2	н.п.	0.06	0.19	0.04	0.04	0.04	0.88	0.47
TiO <sub>2</sub>	0.76	0.26	0.83	0.16	94.3	95.3	58.3	55.2	68.1	63.8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.36	10.04	19.84	5.81	0.26	0.35	0.16	0.30	2.74	3.38
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.43	2.14	46.7	52.6	3.33	0.39	0.26	0.81	2.41	3.86
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>				0.28						
FeO	4.63	2.85	17.08	23.66	0.69	1.91	23.69	28.92	11.69	9.93
MnO	0.09	0.05	н.п.	0.18	н.п.	н.п.	0.22	0.38	н.п.	н.п.
MgO	19.0	19.9	13.96	10.13	0.09	0.04	16.44	12.71	5.22	5.17
CaO	9.14	9.40	0.62	н.п.	0.27	0.16	0.13	0.11	1.26	1.55
SrO									2.58	1.47
Na <sub>2</sub> O	4.50	4.12								
K <sub>2</sub> O	0.17	1.27							0.63	0.47
NiO					н.п.	н.п.	0.40	0.24		
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>					н.п.	н.п.	н.п.	н.п.		
ZrO <sub>2</sub>					0.15	0.31	н.п.	н.п.	4.15	4.66
Сумма	97.3	97.3	99.0	99.9	99.3	98.5	99.7	98.7	99.7	94.8

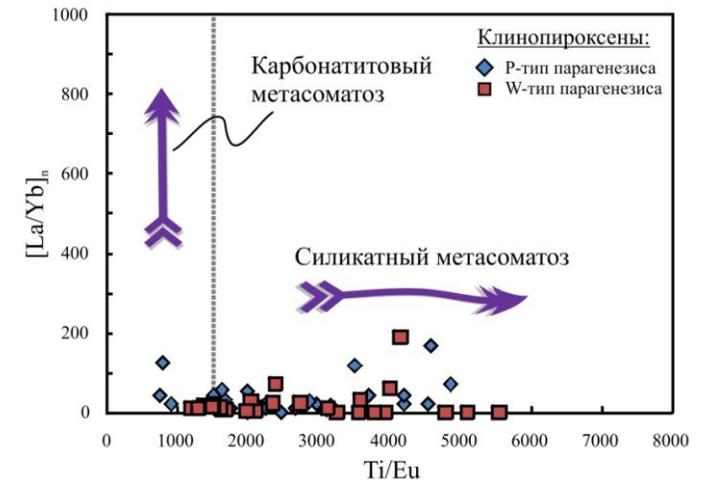
Примечание: ПР – продукты распада, MX – минерал-хозяин, н.п. – ниже предела обнаружения рентгеноспектрального микроанализа при заданных параметрах съемки.



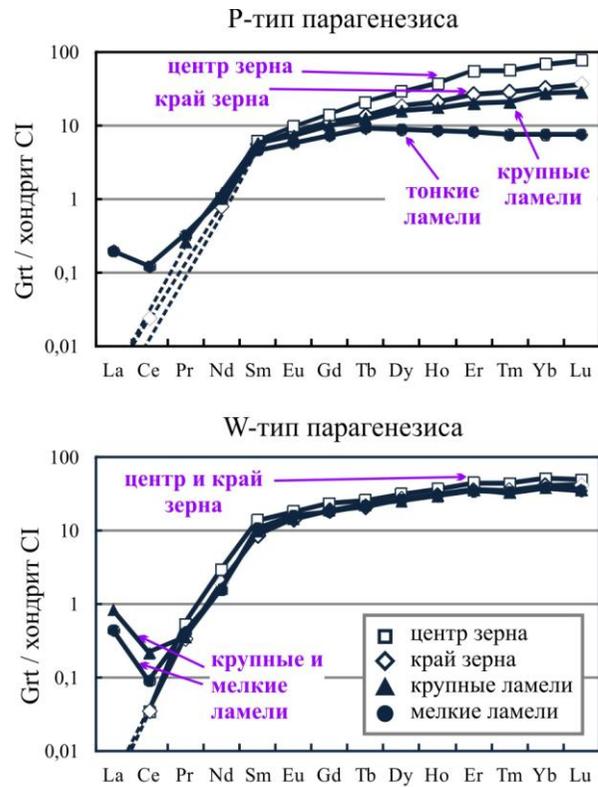
**Рис 6.** Составные (полиминеральные) продукты распада в гранатах. (а) и (б) – клинопироксен в продуктах распада гранатах в сростаниях с плагиоклазом, гранатовый вебстерит М5/01 (трубка Мир), (в) и (г) – ламель клинопироксена с пластинками ильменита, гранатовый вебстерит О-264 (трубка Обнаженная),



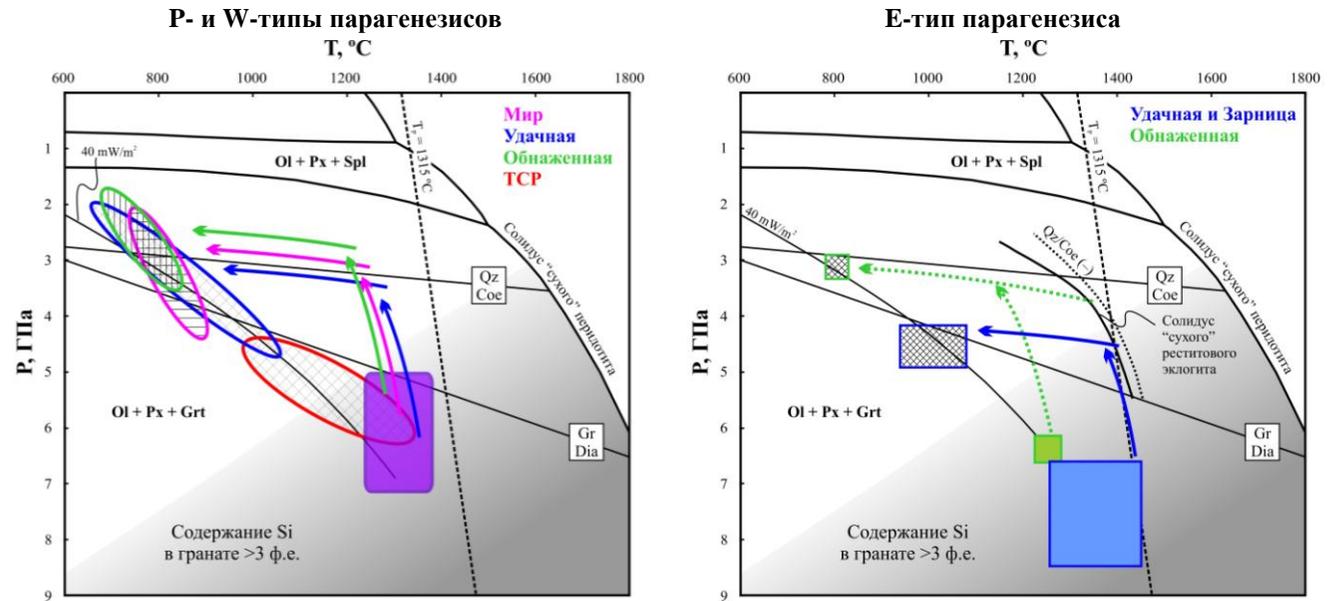
**Рис 7.** Геотермобарометрические оценки для ксенолитов перидотитового (Р-тип) и вебстерит-пироксенитового (W-тип) типов парагенезисов по двухпироксеновому геотермометру в комбинации с гранат-ортопироксеновым геобарометром (Brey, Kohler, 1990). P-T оценки для ксенолитов эцлогитового (Е-тип) типа парагенезиса по гранат-клинопироксеновым геотермометрам (Krogh, 1988; Ellis, Green, 1979; Krogh Ravna, 2000) в проекции на геотерму 40 мВт/м<sup>2</sup>. Линии геотермического градиента по расчетным данным (Pollack, Chapman, 1977). Линии перехода кварц-коэсит (Bose, Ganguly, 1995) и графит-алмаз (Kennedy, Kennedy, 1976) по экспериментальным данным. Пунктирными линиями обведены точки образцов с развитыми (фиолетовый цвет) и тонкими (красный цвет) структурами распада в гранатах и пироксенах.



**Рис 8.** Положение точек составов клинопироксенов в породах перидотитового (Р-тип) и вебстерит-пироксенитового (W-тип) типов парагенезисов на дискриминационной диаграмме  $[La/Yb]_n$  –  $Ti/Eu$  (Coltorti et al., 1999).



**Рис 9.** Спектры распределения редкоземельных элементов гранатов перидотитового (P-тип) (оливиновый вебстерит Ob108/10, трубка Обнаженная) и вебстерит-пироксенитового (W-тип) (вебстерит O-550, трубка Обнаженная) типов парагенезисов. Результаты анализа гранатов, слагающих порфиробласты (центр и край зерна) и ламели в орто- и клинопироксене (крупные и мелкие ламели). Содержания элементов нормированы на состав хондрита CI (McDonough, Sun, 1995).



**Рис 10.** Метаморфическая  $P$ - $T$  эволюция пород перидотитового (P-тип) и вебстерит-пироксенитового (W-тип) и эклогитового (E-тип) типов парагенезисов. Оценки  $P$ - $T$  параметров по реконструированному составу исходных гомогенных минералов показаны сплошными полями: (слева) фиолетовое – перидотитовые и вебстерит-пироксенитовые породы, (справа) зеленое и синее – эклогитовые породы. Геотермобарометрические  $P$ - $T$  оценки для пород P- и W-типов показаны эллипсами (слева): синий контур – трубка Удачная, розовый контур – трубка Мир, зеленый контур – трубка Обнаженная, красный контур – породы, содержащие гранаты с тонкими структурами распада (ТСП); для пород E-типа – прямоугольными полями с двойной штриховкой: синий контур – трубки Удачная и Зарница, зеленый контур – трубка Обнаженная. Поле стабильности граната, содержащего >3 атомов Si на формулу, а также соотношения фаз в системе CMAS построены согласно работе Gasparik (2014). Кривая изэнтропии для температуры  $T_p = 1315$  °C взята из работы McKenzie et al. (2005). Кривая солидуса для «сухого» (номинально безводного) коэситового эклогита, испытывавшего экстракцию щелочного расплава дацит-риолитового состава (реститового эклогита), построена согласно работе Rosenthal et al. (2014). Кривая «Qz/Coe (-)» показывает стабильность кварца или коэсита в эклогите под этой кривой. Кривая солидуса «сухого» перидотита построена по экспериментальным данным (Gudfinnsson, Presnall, 1996). Линии фазовых переходов кварц–коэсит (Bose, Ganguly, 1995) и графит–алмаз (Kennedy, Kennedy, 1976) по экспериментальным данным. Линия геотермического градиента (континентальная геотерма) с величиной теплового потока  $40 \text{ мВ/м}^2$  построена по расчетным данным (Pollack, Chapman, 1977).