

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Таисии Александровны Алифировой «Продукты распада твердых растворов в гранатах и пироксенах (на материале мантийных ксенолитов из кимберлитов)», представленную на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.05 – минералогия, кристаллография.

Представленная диссертационная работа является комплексным исследованием минералов из структур распада в гранатах и пироксенах из глубинных ксенолитов перидотитового, пироксенитового и эклогитового семейств из кимберлитовых трубок Якутии и Финляндии. Мантийный материал для исследований был взят из разновозрастных кимберлитовых трубок, расположенных на разных кратонах: верхнеюрская трубка Обнаженная и среднепалеозойские трубки Мир, Удачная, Зарница расположены на Сибирском кратоне, неопротерозойская трубка Лахтойоки находится на Восточно-Европейском кратоне. Следует подчеркнуть, что данная работа по объему исследованных объектов, глубине их изучения разнообразными современными методами и анализу их природы является на сегодняшний день первой и оригинальной.

Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав и заключения. Она содержит 79 рисунков, 5 таблиц, список литературы с 346 наименованиями и 4 приложения. Общий объем составляет 247 страниц. Автор выдвигает и последовательно аргументирует в соответствующих разделах и главах три защищаемых положения, каждое из которых является актуальным и содержит научную новизну. Ниже оппонент приводит обсуждение работы Таисии Александровны Алифировой по главам с замечаниями к каждой главе, общие замечания приведены в конце отзыва.

В небольшой, но очень важной для дальнейших построений главе 1, Т.А. Алифирова дает обзор истории изученности и современного состояния исследований структур распада в гранатах и пироксенах из пород мантийного генезиса. Текст главы написан по большому количеству литературных источников и свидетельствует о тщательном и доскональном знакомстве автора диссертации с изучаемым предметом на примере мировых данных. В дальнейшем эти примеры используются для сравнения с данными, полученными самим автором. В главе 2 даются, также по литературным данным, краткие сведения по геологической характеристике районов исследования. Обе главы написаны грамотным лаконичным языком и замечаний у оппонента не вызывают.

В главе 3 (Методы исследования) рассматриваются такие вопросы, как подбор и подготовка препаратов для примененных методов исследования, и дается краткая характеристика этих методов. Исследование, как самих структур распада, так и включающих их материнских минералов, произведено с применением классических (оптическая микроскопия, рентгеноспектральный микроанализ) и самых современных методов исследования твердого вещества (растровая электронная микроскопия, спектроскопия комбинационного рассеяния, масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией). Автор описала принцип работы каждого метода и задачи, для которых они использовались в рамках поставленной проблемы. Аналитические приборы и приборные комплексы в большинстве случаев составляют последнее поколение в своем направлении, а сами анализы выполнялись в аналитическом центре ИГМ СО РАН (г. Новосибирск), а также в университетах Вирджиния (США) и Сидней (Австралия). В главе приведены режимы работы приборов и пределы обнаружения элементов. В разделе 3.3 описывается метод расчета химического состава первичных гомогенных граната и пироксенов с учетом состава минералов, находящихся в минерал-хозяине в виде структур распада. В формулу расчета введены объемные доли и плотности минералов.

Глава 4 (Минералого-петрографическая характеристика мантийных ксенолитов) является самой объемной и включает по существу две главных части: петрографическую характеристику исследованных мантийных ксенолитов со структурами распада и



подробное описание минералов из структур распада в гранате, клинопироксене и ортопироксене. Исследованные ксенолиты разделены на 3 группы: перидотитовые, вебстерит-пироксенитовые и эклогитовые. В таблице 2 приведена характеристика ксенолитов с указанием типа парагенезиса, названия породы, типа структуры, породообразующих минералов и P–T характеристик, полученных без учета состава выпавших минералов (продукты распада – по автору). В этой таблице было бы полезным для дальнейшего рассмотрения поместить количественные содержания породообразующих минералов. *Оппонент отмечает, что эта часть главы имеет ряд петрографических ошибок и неточностей:*

1. Оливиновые вебстериты и оливиновый клинопироксенит отнесены в перидотитовую группу, тогда как во всех классификациях они являются пироксенитами (см. Доусон, 1983 – стр. 139, рис. 40; Петрографический словарь под ред. В.П. Петрова, 1981 и другие справочники).
2. В описании деформированных лерцолитов (стр. 34) автор называет крупные выделения граната, пироксенов, оливина то порфиروبластами, то порфирокластами, тогда как все они являются именно порфирокластами, а порфиробласты в этих породах составляют оливин в мелко- тонкозернистой матрице и мелкие зерна клинопироксена и ортопироксена в «шлейфах, хвостах» позади крупных порфирокласт пироксенов (см. Доусон, 1983 – стр. 144 – 147).

Далее в главе 4 автор диссертации дает подробную характеристику минералов в продуктах распада граната, клино- и ортопироксена. В этой части работы приводятся детальное описание каждого минерального вида в минерале-хозяине, распространенность, размеры, форма, цвет, типы минеральных сростков и некоторые другие характеристики. В таблицах 3 и 4 приведен набор минералов в минералах-хозяевах – гранате и пироксенах. Эта часть работы прекрасно иллюстрирована фотографиями полированных пластинок в проходящем свете и на рентгеновском микроанализаторе в отраженных электронах. Исследователь обнаружила наряду с обычными минералами, встречающимися в продуктах распада граната и пироксенов, достаточно редкие виды - минералы группы кричтонита, амфибол, апатит, коэзит. Рассматривается разный качественный набор минералов из продуктов распада в разных парагенезисах. Для многих редких минеральных видов для подтверждения диагностики приведены спектры комбинационного рассеяния. Особенно ценным и интересным, на взгляд оппонента, является описание и фотографии двойных и тройных сростков минералов структур распада в минерале-хозяине. *На сегодняшний день эта часть работы является наиболее полной систематикой структур распада в гранатах и пироксенах мантийного генезиса из кимберлитов.*

Глава 5 дает подробную характеристику химического состава минералов, родительских минералам–продуктам, распада и самим выпавшим минералам. Составы минералов сведены в таблицах (Приложение – Табл. Б1-12) и показаны на многочисленных графиках в координатах петрогенных оксидов, отношений оксидов, формульных единиц и рассчитанных минералов. Кроме того, на графиках приводятся поля составов минералов со структурами распада из ксенолитов отдельных трубок и из орогенных массивов по литературным данным. Рассмотрение химизма минералов дается отдельно для выделенных автором парагенезисов. Достаточно подробно описываются также минералы из продуктов распада с рассчитанными формулами для сложных минеральных видов (например – кричтонит) и с классификационной диаграммой типов (амфибол). Автор отмечает случаи, когда составы продуктов распада минерала и матричного минерала – граната, орто- или клинопироксена не совпадают с составом одноименного матричного минерала.

В части главы 5, отведенной для оценок P–T параметров для пород перидотитовой и вебстерит-пироксенитовой серий, использованы наиболее популярные в мантийной петрологии геотермометры и геобарометры – Brey, Köhler, 1990; Taylor, 1998; Nickel,



Green, 1985. Оценки температур эклогитов проводились по гранат - клинопироксеновым термометрам (Ellis, Green, 1979; Krogh, 1988; Krogh, Ravna, 2000), а для получения давления полученная температура проецировалась на геотерму  $40 \text{ мВ/м}^2$ . За исключением 2-х ксенолитов из трубки Удачная, исследованные ксенолиты перидотитов, пироксенитов показали сравнительно низкие параметры последнего равновесия (примерно от 1.5 – 4.5 ГПа и 670- 910° С). Для последнего равновесия эклогитов получены параметры: 4.1 – 4.9 ГПа и 970 - 1080° С.

Геохимические особенности граната и клинопироксена из зерен матрицы и из относительно крупных ламелей – пластинок распада рассмотрены наиболее обстоятельно для редких земель (Табл. В-1, 2; Рис 61 - 75). Для гранатов матрицы и ламелей в пироксенах установлен в целом сходный тип распределения с увеличением нормированных содержаний РЗЭ от легких к тяжелым, которое принято называть нормальным. Отклонение распределения РЗЭ в сторону обогащения La для ламелей граната в пироксенах автор в дальнейшем объясняет влиянием минерала-хозяина. Характерно, что гранаты из более низкотемпературных пироксенитов (минерал-хозяин и ламели - пластинки распада) имеют более низкие содержания РЗЭ и отличаются по типу распределения. В целом же можно говорить о геохимической идентичности гранатов и частично клинопироксенов из перидотитового и вебстерит-пироксенитового парагенезисов.

*Для более определенной интерпретации дифференцированного поведения РЗЭ в разных морфологических формах минерала и из разных парагенезисов желательно было бы рассчитать коэффициенты распределения элементов между гранатом и клинопироксеном в конкретных образцах, что могло бы указать на присутствие или отсутствие равновесия для этих элементов. Известно (Orman et al., 2002), что замораживание процессов диффузии для РЗЭ в гранате и клинопироксене происходит при существенно различающихся температурах, и этот фактор мог сместить равновесное распределение.*

Выполненные по приведенной в главе 3 формуле, реконструированные химические составы граната и пироксенов из ксенолитов перидотитов, пироксенитов и эклогитов (Приложение – Табл. Г-1, 2, 3) представляют большой интерес для дальнейших петрогенетических построений автора в главе 6. Расчеты показали, что первичные (до распада) клинопироксены содержали существенно больше оксидов магния, алюминия и титана, а в пироксенитах и вебстеритах также выше содержание минерала Са-Чермака. В реконструированном ортопироксене выше содержание волластонитового компонента, оксида титана и иногда оксида хрома. Показано, что рассчитанные первичные гранаты из перидотитов и пироксенитов сопоставимы по составу с низкохромистыми гранатами из деформированных перидотитов и низкохромистых мегакристов. В рассчитанных составах клинопироксенов из эклогитов выше содержание оксида титана и фосфора и минералов Са-Эскола и Са-Чермака. Гранаты рассчитанных составов содержат по сравнению с матричным минералом больше титана и фосфора.

В заключительной главе 6 на основе полученных данных обсуждаются такие вопросы, как последовательное преобразование структур распада в мантийных условиях, химизм и структура исходных твердых растворов, реакции их распада, а также возможные протолиты пород со структурами распада минералов и их Р-Т эволюция в условиях верхней мантии. Автор детально описывает преобразование структур распада - от их появления в структуре минерала-хозяина до перекристаллизации в более крупные выделения (пластинки, ламели, изометричные зерна) до «выхода» и перекристаллизации на границе с минералом-хозяином. Показано влияние кристаллохимического строения минерала-хозяина и минерала в структурах распада на морфологию выпавшего минерала. Детально, в основном по соответствующим литературным данным, описаны реакции распада для стехиометрических и нестехиометрических составов компонентов. Для приведенных реакций рассмотрена роль главных факторов, влияющих на выпадение



компонента или минала (изменение температуры и давления). В данном разделе интересен вывод о влиянии изменения окислительно-восстановительной обстановки на процесс распада некоторых минералов (например, при выпадении рутила из граната, апатита из граната и пироксенов).

*На взгляд оппонента неоднозначным и сомнительным кажется причисление вростков амфибола в гранате и клинопироксене к продуктам распада. Амфибол в виде правильных и неправильных ориентированных вростков в этих минералах установлен только в ксенолитах из трубки Обнаженная. В ксенолитах перидотитов и пироксенитов этой трубки чрезвычайно развит флогопит-амфиболовый метасоматизм (Харькив и др., 1982, 1983; Уханов и др., 1988). Детальные исследования этого процесса (Solov'eva et al., 2015) показали его древний возраст (1640 – 1800 млн. лет). Параллельные брусковидные и линзовидные пластинки амфибола (магнезиальный паргасит) развиваются по спайности в клинопироксене в количестве от 10 до 50 % и интенсивно замещают гранат и пироксены с краев, а также структуры распада ортопироксена в мегакристаллах клинопироксена и наоборот (Solov'eva et al., *Geodynamic&Tectonophysics*. 2015/6(3) Doi:1058000 - Fig. 2, 5). Таким образом, морфологическое сходство амфибола из продуктов метасоматического замещения и продуктов распада в гранате и пироксенах из трубки Обнаженной требует более точного определения их генезиса.*

Автор диссертации в разделе 6.3 на основании целого ряда аргументов, таких как высокое содержание Ti в первичном гранате, присутствие избытка Si в некоторых гранатах из пироксенитов, сходство редкоземельных спектров в перидотитах и пироксенитах, высокие температуры и давления для рассчитанных первичных минералов и других, делает вывод о генетическом родстве перидотитового и вебстерит-пироксенитового семейств и об их кристаллизации на достаточно больших глубинах литосферной мантии (рис. 78). Выпадение структур распада в этих сериях пород рассматривается в основном как следствие падения температуры и давления. В качестве механизма возникновения пород автор предполагает фракционную кристаллизацию мантийных расплавов, просачивающихся через твердую матрицу перидотитов. При этом метасоматизирующим агентом являлись расплавы, родительские вебстеритам-пироксенитам, воздействовавшие на перидотитовый субстрат. В качестве подтверждения выдвинутой гипотезе автор приводит данные о том, что рассчитанные первичные составы граната с развитыми структурами распада аналогичны составам граната с зачаточными структурами распада, а также низкохромистого граната деформированных перидотитов и мегакристов. В разделе 6.3.3 и на рис. 79 детально обсуждается происхождение исследованных эклогитов и приводится модель их эволюции в поле P-T.

*Целиком соглашаясь с мнением автора о том, что развитие структур распада в минералах перидотитов и пироксенитов определяется изменением термодинамических параметров (уменьшение температуры и, возможно, давления и изменения окислительно-восстановительных условий среды), оппонент выражает большое сомнение в той части рассуждений, где приводится аргумент о близости первичных составов гранатов их низкохромистым эквивалентам из деформированных перидотитов и мегакристов. Вызывает возражение также механизм кристаллизационного фракционирования расплавов при просачивании применительно к формированию перидотитов и пироксенитов для трубки Обнаженная. Дело в том, что составы минералов названного семейства (в том числе и граната) из трубки Обнаженная при их сопоставлении с соответствующими минералами из зернистых и деформированных перидотитов из трубки Удачная по данным разных авторов (Соловьева и др., 1994, 2008; Соловьева, 2007; Ionov et al., 2010; Agashev et al., 2013; Howarth et al., 2014; Pernet-Fisher et al., 2015) показывают, более высокую магнезиальность (Mg#) всех пороодообразующих минералов. Интенсивное просачивание базитовых расплавов через перидотиты, как это показано для разных трубок мира (Griffin et al., 1996; Burgess, Harte, 2004; Соловьева и др., 2008; Agashev et al., 2013 и другие) должно было существенно понизить магнезиальный*



индекс пород и минералов. Скорее нужно говорить о том, что магма, давшая начало перидотит-пироксенитовым парагенезисам из трубки Обнаженная, имела другой – возможно, коматиитовый состав, а сами породы кристаллизовались из этой магмы. Это предположение никак не противоречит основным достижениям автора работы о типах, механизмах и генезисе структур распада в гранате и пироксенах из минералов литосферной мантии.

Данные по P-T характеристикам пород выделенных парагенезисов, определенные по восстановленным первичным составам главных минералов (1100 - 1400°C, P > 5-6 ГПа для перидотитов и пироксенитов; и 1300 - 1400°C, 6.8-8.4 ГПа для эклогитов, кроме эклогита из трубки Обнаженная) свидетельствуют о значительно больших глубинах, на которых эти парагенезисы возникли и, по-видимому, существовали длительное время. Следовательно, нужно предположить реализацию каких-то геодинамических механизмов, выведших эти породы на меньшие глубины. Но этот вопрос в работе фактически не обсуждается. Кроме того, высокие давления могли быть получены из-за высокой температуры, которая вводится в формулу давления.

В целом диссертационная работа Таисии Александровны Алифировой заслуживает самой высокой оценки. Она безупречно логически выстроена, содержит последовательную аргументацию, иллюстрирована прекрасно выполненными фотографиями и графиками и является вполне законченным исследованием. Более того, несколько глав диссертации (3, 4, 5) практически являются систематизированным научным пособием для изучения структур распада в мантийных парагенезисах ксенолитов из кимберлитов, и в этом состоит новый значительный вклад автора в проблему состава, строения и эволюции верхней мантии Земли. В работе содержатся также оригинальные предложения по минералогическим критериям алмазности коренных источников и вторичных коллекторов – а именно, находки гранатов с тонкими структурами распада, гранатов с высокими содержаниями пироксенов в структурах распада, а также с хромитами и Cr-шпинелью. Таким образом, исследование Т.А. Алифировой имеет и большое прикладное значение и может успешно применяться при поисках и оценке алмазных месторождений. Основные научные выводы диссертации опубликованы в разных научных изданиях (9 публикаций в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК), в том числе в ведущих отечественных журналах, а также в зарубежных изданиях. В семи из них автор диссертации стоит первым в списке авторов. Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации.

Таким образом, диссертация Таисии Александровны Алифировой «Продукты распада твердых растворов в гранатах и пироксенах (на материале мантийных ксенолитов из кимберлитов)» соответствует всем требованиям для соискания ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.05 – «минералогия, кристаллография», а ее автор Таисия Александровна Алифирова, вне всякого сомнения, заслуживает присвоения искомой ученой степени.

Официальный оппонент,  
доктор геолого-минералогических наук  
15.09.2015 г.



Сведения об оппоненте:

Соловьёва Лидия Васильевна

Почтовый адрес: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128

Ведущий научный сотрудник

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

Подпись Соловьёва  
Л. В. заверяю  
Зав. канцелярией Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук  
«15» 09. 2015 г.

Л.В. Соловьёва



Домашний адрес: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 323а, кв. 14  
Мобильный телефон: 89149573036  
E-mail: [solv777@crust.irk.ru](mailto:solv777@crust.irk.ru)