



*Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Институт
экспериментальной минералогии
имени академика Д.С. Коржинского
Российской академии наук
(ИЭМ РАН)*

*Академика Осипьяна ул, 4, Черноголовка г,
Ногинский р-н, Московская обл, 142432
Телефон/факс: 8(49652)49-687
<http://www.iem.ac.ru>
ОКПО 02699808, ОГРН 1035006109984
ИНН/КПП 5031007090/503101001*

Здекабре 2018

№ 13105-3418/237



ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию

ЧЕПУРОВА Алексея Анатольевича

**«ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИЛИКАТНЫХ И ОКСИДНЫХ МИНЕРАЛОВ
МАНТИЙНЫХ ПАРАГЕНЕЗИСОВ, АССОЦИИРУЮЩИХ С АЛМАЗОМ»,**

представленную на соискание ученой степени

доктора геолого-минералогических наук по специальности

25.00.05 – «минералогия, кристаллография»

Представленная крупная обобщающая работа актуальна, обладает научной новизной и имеет практическое значение.

Актуальность данной работы обусловлена целым рядом дискуссионных проблем, связанных с особенностями кристаллизации и преобразования мантийных силикатных и оксидных минералов в связи с генезисом алмаза. Актуальными для изучения являются вопросы, связанные с ролью металлических расплавов при кристаллизации алмазов и силикатных минералов, пониманием условий кристаллизации субкальциевых гранатов в мантии Земли, а также эволюции состава кимберлитовых расплавов, химическая устойчивость мантийных силикатов в этих расплавах и влияние

присутствия этих ксенокристаллов на изменение физических свойств кимберлитовых магм в процессе извержения. Все это направлено на обобщение новых данных и предложение новых генетических моделей мантийных парагенезисов, ассоциирующих с алмазом. Особая роль в решении геологических задач принадлежит исследованиям при высоких давлениях и температурах. В связи с этим, работа А.А. Чепурова «Экспериментальное исследование кристаллизации и преобразования силикатных и оксидных минералов мантийных парагенезисов, ассоциирующих с алмазом», основанная на экспериментальных исследованиях, является весьма актуальной.

Цели и задачи работы четко сформулированы и понятны.

Главная цель работы - экспериментальное исследование кристаллизации силикатных и оксидных минералов, типичных для мантийных алмазсодержащих парагенезисов, в том числе совместно с алмазом в металлическом расплаве, а также изучение взаимодействия силикатных минералов с кимберлитовым расплавом.

Поставлено семь последовательных и взаимосвязанных задач, направленных на выполнение настоящей работы.

1. Разработка и совершенствование методик проведения экспериментов при высоких давлениях и температурах, а именно: по кристаллизации алмаза и сопутствующих силикатных фаз в силикат-металл-углеродных системах, по кристаллизации и устойчивости граната в модельных системах.
2. Проведение совместной кристаллизации алмаза и силикатных минералов в силикат-металл-углеродных системах при высоких давлениях и температурах.
3. Кристаллизация высокохромистых гранатов в модельных системах при *PT*-условиях, соответствующих верхней мантии Земли.
4. Экспериментальное исследование устойчивости силикатных минералов при взаимодействии с кимберлитовым расплавом при мантийных *PT*-параметрах.
5. Отжиг алмазов при высоких давлениях и температурах.
6. Выявление особенностей поверхностных микроструктур на кристаллах природного алмаза с использованием атомно-силовой микроскопии.
7. Анализ и сопоставление полученных экспериментальных результатов с данными по природным образцам.

Основу диссертации составляют результаты многолетних (1995-2018) исследований при высоких давлениях и температурах.

В работе содержатся материалы по изучению природных и искусственных алмазов, синтезированных гранатов, оливинов, пироксенов и шпинели, а также экспериментальные данные по оценке свойств кимберлитовых расплавов. При выполнении диссертационной

работы автором разработаны новые элементы ячейки высокого давления, усовершенствованы приемы подготовки ячеек и проведения экспериментов. Данное направление работы оказывает существенное влияние на развитие эксперимента и его значимости при решении широкого круга геологических задач, имеющих фундаментальное и практическое значение.

Новизна работы отразилась в получении принципиально новых экспериментальных результатов и данных.

Не вызывает сомнения и **практическая значимость работы**. В ходе выполнения диссертационной работы были усовершенствованы и запатентованы технологические приемы для выращивания и отжига кристаллов алмаза, а также методика травления поверхности алмаза наночастицами железа.

В главе 1 «**Существующие представления о кристаллизации алмаза, образовании хромистых гранатов и генезисе кимберлитовых расплавов**» представлен обзор данных по кристаллизации алмаза в природных условиях и эксперименте, образованию субкальциевых хромистых гранатов в условиях мантии Земли, а также современным взглядам на происхождение кимберлитовых расплавов.

Обзор работ по синтезу алмаза в большей степени основан на работах конца 1990-х годов. Из современных работ в представленном обзоре упомянуты лишь отдельные экспериментальные работы группы Ю.Н. Пальянова за 2015 год. Приведена, основанная лишь на обзоре работ 1997-1999 годов, неверная интерпретация гипотезы образования алмаза в мантийных условиях группы Ю.А. Литвина.

Выполнение диссертационной работы по представленной тематике подразумевает более детальное и тщательное исследование и обзор имеющихся в мировом доступе работ по экспериментальным исследованиям процессов алмазообразования.

К настоящему времени получен доказательный материал на основе экспериментальных и минералогических данных в пользу того, что алмазообразующая среда должна обладать основным ключевым критерием сингенезиса, т.е. быть способной к образованию не только самого алмаза, но и всего набора парагенных фаз первичных включений алмаза. В связи с этим диссиденту полезно было бы так же рассмотреть мантийно-карбонатитовую концепцию генезиса алмаза (Литвин и др., 2016, Litvin, 2017). Данная концепция дает четкое представление о химическом и фазовом составе алмазообразующего очага, его главных и примесных растворимых и нерастворимых компонентах.

Глава 2 «Методика работы» посвящена описанию использованных методов исследования. Приводится подробное описание экспериментальной установки БАРС и

аналитических методов, которые соответствуют современному мировому уровню. Разнообразие аналитических методов, без всякого сомнения, является сильной стороной работы.

В главе 3 «Экспериментальное моделирование совместной кристаллизации алмаза и силикатных минералов» описываются результаты, полученные при экспериментальном изучении роста кристаллов алмаза в металлическом расплаве, содержащем силикатные компоненты, а также приводятся данные по составу образованных силикатных фаз совместно с алмазом. На основе данного фактического материала выдвинуто и обосновано 1-е защищаемое положение.

1-е защищаемое Положение. При давлении 5.5 ГПа и температуре 1450 °C в гетерогенной среде, состоящей из расплавов Fe-Ni-C и силикатсодержащего материала, основным агентом алмазообразования является Fe-Ni расплав, причем рост монокристаллов алмаза сменяется образованием его расщепленных кристаллов при содержании силикатного вещества более 10 вес. %. Химический состав силикатов и оксидов, кристаллизующихся совместно с алмазом соответствует минералам мантийных алмазосодержащих парагенезисов.

Первое защищаемое положение базируется на одиннадцати экспериментах (согласно таблице 3.1) с использованием металл-силикат-углеродной системы с переменным составом, пять из них с оливином в качестве силикатного компонента, а шесть – с щелочным базальтом. При этом использовались различные схемы сборки, затравочный кристалл алмаза располагался как сверху камеры, так и снизу. То есть проведена серия опытов с большим количеством переменных, которые могут влиять на конечный результат. Один опыт проведен в силикат-углеродной системе с содержанием оливина 100 мас. %, где не было достигнуто плавление, что очевидно (температура плавления оливина при нормальном давлении 1400-1900°C в зависимости от состава). Было бы интересно продолжить серию опытов и сравнить влияние расположения затравки, состава силикатного компонента системы на его общий мас. %, при котором сменяется режим роста алмаза, определить предел содержания различной по химическому составу силикатной составляющей в металлическом расплаве, при котором происходит полное прекращение роста алмаза.

Делая упор на преобладание среди включений в природных алмазах силикатных фаз, а также находки металлических включений в ассоциации с сульфидами, абсолютно игнорируется массив минералогических данных по другим минеральным и флюидным включениям в алмазах. Диссертант приводит полученные экспериментальные данные в пользу гипотезы кристаллизации алмаза в объемах металла во вмещающих породах на

глубинных горизонтах мантии (стр. 101). Более продуктивным в данном случае является критерий сингенезиса алмаза и ростовых включений в них (Litvin 2007), в соответствии с которым материнская среда должна быть в равной мере эффективной как для образования алмазов, так и для всего набора химически различных веществ первичных включений в алмазах.

К настоящему времени осуществлен синтез алмаза в самых разнообразных по химическому составу системах, способных растворять углерод при определенных РТ параметрах. Это отмечает и сам диссертант в разделе первой главы «Кристаллизация алмаза в эксперименте» (стр. 35). Подтверждение того, что металл-углеродные системы являются эффективными для роста алмаза было получено еще в первых экспериментах по синтезу алмаза при высоких давлениях (Bundy et al., 1955, Liander, 1955). Экспериментальное изучение синтеза алмаза в металл-углеродных системах показало роль металлических расплавов в растворении источника углерода (графита), достижении пересыщенного раствора к алмазу, необходимых для роста кристаллов алмаза (Rodewald 1961, Литвин 1968, 1969). Система Fe-Ni-C детально изучена при давлениях до 6 ГПа (Strong, Chrenko, 1971, Kocherzhinskii et al, 1993). В большинстве силикатных расплавов растворимость углерода ничтожно мала (Шилобреева и др., 1990), следовательно, в таких расплавах невозможна спонтанная нуклеация алмаза и рост алмаза на затравку. Тем не менее, нуклеация алмаза была установлена в расплавах состава Na_2SiO_3 (Akaishi, 1996), а так же в силикат-углеродной системе $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{C}$ при 8,5 ГПа (Литвин, 2009). Обзор первых экспериментальных работ по определению влияния силикатных компонентов на рост кристаллов алмаза в металлических системах выполнен и А.И. Чепуровым с соавторами (1997). Так например, в серии экспериментов с силикат-металл-углеродной системой, состоящей из 15-50 мас % сплава Mn-Ni и базальта (который не плавился в условиях опыта), были получены новообразованные кристаллы алмаза, идентичные по свойствам алмазам из системы Mn-Ni-C, в то время как при плавлении силикатной составляющей системы наблюдалась лишь перекристаллизация углерода в виде чешуек графита при содержании металлической составляющей до 40 мас.% (Чепуров А.И, Сонин В.М., 1987). А.М. Дорошев с коллегами (Doroshev et al., 1995) получил кристаллы алмаза при 5,5-6,0 ГПа в системе Fe-Ni-C с добавками до 5 мас.% силикатно-оксидной смеси, в полученных алмазах были также обнаружены включения силикатных фаз.

Также установлено, что в расплавах карбонат-силикатных систем при повышенном содержании силикатной составляющей приводит к прекращению нуклеации алмаза (Шацкий и др., 2002, Пальянов и др., 2005).

В работе (Litvin et al., 2003) для силикатно-карбонатных расплавов с переменными составами впервые введено понятие концентрационного барьера нуклеации алмаза (КБНА) как граничной характеристики алмазообразования. Более детально данные процессы охарактеризованы в диссертационной работе А.В. Боброва (2009). В дальнейшем значение КБНА было определено и для карбонат-силикатных и карбонат-оксид-силикатных систем в условиях нижней мантии Земли (Spivak, 2016, Spivak, Litvin, 2019).

В связи с изложенным выше, не удивительно, что и в металл-силикат-углеродных системах силикатная составляющая действует в качестве ингибитора для роста алмаза, что нашло отражение и в форме новообразованных кристаллов алмаза. Очевидна и связь составов силикатных включений в новообразованных алмазах от стартовых составов.

Действительный интерес в данной главе вызывает раздел 3.2, посвященный железистости силикатных минералов, кристаллизующихся совместно с алмазом в равновесии с металлическими расплавами. Получены важные экспериментальные данные, показывающие стабильность составов новообразованных силикатных фаз, вне зависимости от соотношения Fe-содержащей металлической и силикатной составляющих системы. Тем не менее, выводы в этом разделе вызывают много вопросов. Прежде всего, говоря о «железистости», в тексте и нужно было оперировать значениями X_{Fe} , а не просто содержаниями FeO (стр. 111). Влияние металлической фазы на железистость силикатов из представленных экспериментов трудно оценить. Действительно, содержание FeO в оливине, равновесном с металлическим расплавом, статистически ниже (4.2-7.7 мас. %). Однако наивысшие значения были получены (согласно таблице 3.3) в смеси с максимальным содержанием оливина и лишь немного меньше содержания железа в стартовом оливине (9 мас. %). Кроме того, из описания экспериментов не совсем понятно, есть ли вариации железистости оливина в продуктах опытов: зональность кристаллов или вариации от зерна к зерну. Есть ли какая-нибудь зависимость железистости оливина от соотношения оливин/металл в стартовых составах? Судя по таблице 3.3 ее нет, но по ней судить трудно, поскольку не понятно, какие составы оливина приведены. Еще более вопросов вызывает влияние металлического расплава на составы клинопироксенов и гранатов, кристаллизовавшихся из примеси стекла щелочного базальта к металлу. Автор не сообщает о составах этих фаз, которые могут кристаллизоваться из данного стекла в отсутствие металлического расплава (вероятно, эксперименты без металлической фазы не проводились). В отсутствие такого сравнения выводы о влиянии металлического расплава на железистость минералов по крайней мере не корректны и недостаточно обоснованы. Автор с радостью обнаруживает, что «синтезированные нами образцы (имеется в виду,

клинопироксены и гранаты) по химическому составу ближе всего к ... минералам эклогитового парагенезиса в природных алмазах». Интересно, что автор ожидал получить из состава базальта (пусть даже щелочного) и почему этот результат автору представляется столь важным? Отсутствие сравнений составов минералов в равновесии с металлической фазой и без нее делают все дальнейшие рассуждения о связи «низкожелезистых силикатов» с восстановительными условиями и о равновесии этих фаз с металлической фазой не вполне обоснованными. Высокомагнезиальные составы в природных ассоциациях могут быть связаны с другими причинами, например, степенью плавления. Автор также избегает обсуждения содержания Fe^{3+} в силикатах в равновесии с металлической фазой (напр. Rohrbach et al., 2007), что, на наш взгляд, дало бы больше пространства для сравнения экспериментальных и природных данных и их интерпретации.

В разделе 3.2 автор пытается оценить влияние летучести кислорода на железистость Fe-Mg минералов в равновесии с металлическим расплавом. Для этого он предлагает ряд равновесий с участием SiO_2 , Al_2O_3 , Al_2SiO_5 (стр. 124). Реальность таких равновесий в присутствии металлического расплава несколько сомнительна, поскольку совершенно не понятно в какой форме эти компоненты присутствуют в системах – компоненты расплава (тогда какого?) или кристаллические вещества. Судя по изложению, активности этих компонентов брались равными 1. Но тогда автор заведомо предполагает, что корунд, кианит, кварц (коэсит) присутствуют в системе, а термодинамические свойства SiO_2 , Al_2O_3 , Al_2SiO_5 стандартизовались на кристаллические вещества. Но реально это не так. Если же это не кристаллические фазы, а компоненты расплава, тогда необходимо указать модели смешения этих компонентов в расплавах, а значит предложить модели их активности. Без этих уточнений приведенные расчеты остаются лишь просто упражнениями, не имеющими приложений к оценкам летучести кислорода в конкретных экспериментальных системах. Из редакционных замечаний заметим, что характеристика твердых растворов Mg-Fe-Са граната и оливина как регулярных не совсем точна, поскольку, судя по приведенным выражениям избыточных функций, это субрегулярные растворы.

В разделе 3.3 приводятся данные по исследованию микроморфологии кристаллических поверхностей алмазов из кимберлитов методом атомно-силовой микроскопии. Не совсем понятна логика включения данного раздела в главу 3. Данный раздел посвящен исследованию морфологии природных алмазов и имеет некую «свою» нумерацию, не отражающуюся в содержании работы (стр. 136, 142). Было бы разумно

хотя бы сравнить микроморфологию поверхностей природных алмазов с полученными алмазами в металлических и металл-силикатных системах.

Далее идет раздел 3.4 «Устойчивость сульфидных включений в алмазах в постростовых условиях». Несоответствие данного раздела общей тематике главы 3 «Экспериментальное моделирование совместной кристаллизации алмаза и силикатных минералов» очевидна и отражается в нарушенной нумерации подразделов. Складывается впечатление, что диссертант в последний момент верстал работу, перераспределяя разделы из разных глав. Безусловно, это демонстрирует некую неряшливость в выполнении работы и, конечно же, негативно влияет на общее впечатление от работы. Тем не менее, в данном разделе приводятся заслуживающие внимания экспериментальные данные по устойчивости сульфидных включений.

Глава 4 посвящена экспериментальному моделированию кристаллизации хромистых гранатов. На основе данного фактического материала выдвинуто и обосновано 2-е и 3-е защищаемые положения.

2-е защищаемое Положение. При давлении 5 ГПа и температурах 1100-1300°С в результате взаимодействия серпентинита и хромита возникают минеральные ассоциации, состоящие из высокомагнезиального оливина, ортопироксена, хромистой шпинели и граната. При этом, в условиях поступления кальция состав граната изменяется в широком диапазоне от самых низкокальциевых (0.3 мас. % CaO) до высококальциевых (20 мас. % CaO) разновидностей, что демонстрирует определяющую роль миграции кальция на кристаллизацию широкого спектра гранатов.

3-е защищаемое Положение. При давлении 5 ГПа и температуре 1300 °С в системе оливин-ортопироксен- хромит-корунд в присутствии водного флюида и до 1.5 вес.% CaO содержащего субстрата происходит кристаллизация гранатов с содержанием Cr₂O₃ до 14.25 мас.% и CaO не более 3.5 мас.%, сходных по составу с гарцбургитовыми гранатами из включений в природных алмазах, что демонстрирует принципиальную возможность образования субкальциевых хромистых пиропов мантийных парагенезисов путем метасоматических преобразований гарцбургитов.

По экспериментальному моделированию образования низкокальциевых хромистых гранатов была проведена серия из пяти опытов, цель которых состояла в выяснении влияния состава среды кристаллизации на образование таких гранатов. В качестве стартового состава использовалась среда исключительно обедненная по CaO, а так же зерна хромита с разным значением хромистости (стр. 156). Весьма сложно понять какой именно стартовый состав использовался в конкретном эксперименте, поскольку таблица 4.1 «Параметры экспериментов» (стр.157) не содержит данную информацию, а в главе 2 в

разделе 2.4 «Исходные компоненты и расходные материалы» (стр. 94) указан один общий состав хромита. Описание результатов экспериментов также вызывает ряд вопросов. На стр. 164 указано, что полученные зерна гранатов в основной массе имеют неоднородный состав. Но при этом в таблице 4.2 «Состав граната из экспериментов с природным серпентином» (стр. 162 и 163) приведены данные с указанием только номера эксперимента без указания их привязки к положению точки анализа в рамках зерна, что затрудняет понимание полученных результатов. Составы новообразованных оливина и ортопироксена ожидаются в рамках стартовых составов. Хочется надеяться, что таблицы 4.4 и 4.5 (стр. 166) содержат усредненные составы полученных фаз. Необходимо было бы указать хотя бы общее количество анализов для каждой фазы, по которым рассчитаны средние значения (данное замечание относится ко всем таблицам по составам новообразованных фаз). К сожалению, так и не удалось найти описание результатов и составы полученных фаз в экспериментах 4-6-12 и 4-14-12, *PT*-параметры которых повторяются в 4-5-12 и 4-15-12, соответственно (таблица 4.1 стр. 157), что позволило бы оценить воспроизводимость опытов. Таким образом, часть 2-го защищаемого положения, относящаяся к низкокальциевым гранатам (0.3 мас. % CaO) полученным в результате взаимодействия серпентина и хромита, обосновано лишь тремя экспериментами: 4-5-12 при 4 ГПа и 1100 °C, 4-15-12 при 5.5 ГПа и 1200 °C и 4-46-12 при 5.5 ГПа и 1200 °C. Но если учитывать указанное в защищаемом положении давление 5 ГПа, то не остается ни одного!

Следующий раздел главы 4 посвящен экспериментальному исследованию кристаллизации хромистых гранатов с широкими вариациями содержаний CaO и Cr₂O₃ в модельной ультраосновной системе с Ca-содержащим водным флюидом. Обнадеживают заявленные три серии экспериментов, но в данном разделе отсутствует сводная таблица условий экспериментов, что затрудняет оценить фактический материал по данному исследованию. Следует отметить, что стартовые составы для экспериментов приведены в данном разделе, а не в главе 2, что удобно и более информативно. Мало СЭМ изображений образцов для экспериментальной работы (в данном разделе приведено всего одно изображение на стр. 180). О корректности выводов о взаимоотношениях фаз приходится судить лишь по описаниям фазовых отношений в тексте. Создается впечатление, что было проведено опять всего 3 эксперимента. В таблицах химического состава новообразованных фаз 4.7 – 4.11 на стр. 182-186 появляется строка «образец», но какими параметрами отличаются эти «образцы» из таблиц не ясно, особенно учитывая данные на стр. 176 «Эксперименты проводились при давлении 5 ГПа и температуре 1300°C ... Продолжительность опытов – 25 часов.» Отметим незначительные вариации

составов оливина, ортопироксена и клинопироксена с в рамках одной «серии». Не понятно, в чем заключалась необходимость проведения десяти опытов для каждой серии при одинаковых параметрах? Или строка «образец» подразумевает точку анализа? В последнем случае опять можно прийти к выводу о трех поставленных экспериментах с разным стартовым составом при одинаковых *PT*-параметрах. Эти вопросы не возникли, если бы диссертант привел сводную таблицу условий и результатов экспериментов.

Интересна формулировка защищаемых положений 2 и 3. Согласно второму защищаемому положению формирование как низкокальциевых, так и высококальциевых гранатов происходит в результате взаимодействия серпентинита и хромита (*возможно опечатка, и диссертант подразумевал «взаимодействие серпентина и хромита»*) и сопровождается образованием других минеральных фаз. В третьем защищаемом положении серпентин фигурирует уже как компонент исследуемой системы. Система серпентин-хромит-корунд трансформировалась в систему оливин-ортопироксен-хромит-корунд в присутствии водного флюида, что соответствует указанным *PT*-параметрам. Получается две формулировки одного и того же компонента в стартовых системах. Почему в таком случае в разделе 4.1.2 при обсуждении результатов взаимодействия серпентина и хромита о водной составляющей системы указывается лишь на стр. 170 «...разложения серпентина на оливин, ортопироксен и воду....», в дальнейшем ни роль воды, ни ее присутствие в системе не обсуждается? В то время как, в разделе 4.2.2 при обсуждении результатов с использованием систем серпентин-хромит±корунд±СаО водному флюиду отводится главная роль при транспорте петрогенных компонентов. В чем заключается отличие экспериментов серии С в разделе 4.2 от экспериментов в разделе 4.1 кроме дополнительного источника Са? Ведь эти результаты объединились во втором защищаемом положении. Результаты серии В подходят по составу и параметрам к 3му защищаемому положению. В таком случае, для чего проводилась серия А? По составу системы серия А не подходит ни под второе защищаемое положение, ни под третье, хотя получены гранаты близки по составу к гранатам полученными в системе серпентин-хромит из раздела 4.1.

Третий раздел главы 4 посвящен исследованию зональности высокохромистых гранатов, полученных в ультраосновной системе. Исходными материалами данной системы опять послужила система серпентин+хромит+корунд, используемая в экспериментах, описанных в разделе 4.1 и 4.2, отличие заключалось только в источнике дополнительного Са (для этого был добавлен карбонатит в количестве 0.5 или 1.5 вес.%). Отметим, что только в данном разделе приведена оценка содержания выделившегося водного флюида в системе при трансформации серпентина при *PT*-параметрах

эксперимента. Хоть основная идея данного раздела - изучение зональности новообразованных гранатов, выявленные особенности не вошли в защищаемое положение. Тем не менее, данные экспериментальные результаты стали основой для третьего защищаемого положения.

В целом вся глава 4 производит впечатление занятной «головоломки», разобраться в постановке экспериментальных задач, проведенных опытах и полученных выводах, сопоставить их с защищаемыми положениями оказалось не простой задачей.

Глава 5 «Экспериментальное изучение взаимодействия силикатных минералов с кимберлитовым расплавом» содержит экспериментальные данные по взаимодействию пиропового граната с кимберлитовым расплавом и кристаллизации высококальциевого граната, скорости растворения силикатных минералов в кимберлитовом расплаве, гравитационному фракционированию кристаллов силикатных минералов в кимберлитовом расплаве. На основе данного фактического материала выдвинуто и обосновано 4-е защищаемое положение.

4-е защищаемое Положение. При давлении 4 ГПа и температурах 1300-1500 °С экспериментально установлен ряд устойчивости силикатных минералов перидотитового парагенезиса в кимберлитовом расплаве, а именно оливин >> гранат > ортопироксен > клинопироксен, что указывает на возможный механизм обогащения расплава кремнеземом в мантийных условиях. При этом показана высокая скорость оседания кристаллов силикатных минералов в кимберлитовом расплаве, которая составляет порядка 1 м/час. Преобразование пиропа в пироп-гроссуляровый гранат с высоким содержанием CaO до 24 мас.% служит свидетельством роста природного алмаза с захватом включений субкальциевых гранатов в средах с очень низким содержанием кальция. Ксеногенность монокристаллов алмаза по отношению к кимберлиту подтверждается по данным атомно-силовой микроскопии наноморфологическими признаками растворения поверхности алмазов.

Первый раздел содержит экспериментальные данные по изучению изменения ксенокристов пиропового граната в кимберлитовом расплаве. В данном разделе, хоть он и оформлен по аналогии с разделами глав 3 и 4, наконец-то четко и понятно предоставлен фактический материал, что отражено в таблицах и иллюстрациях по условиям и результатам экспериментов. В результате показано, что «кимберлитовый расплав не мог являться основной средой кристаллизации природных пироповых гранатов». Этот «главный» вывод, на наш взгляд, является несколько странным. Пироповые гранаты, находящиеся в виде ксенокристаллов в кимберлитах, обычно являются продуктами дезинтеграции мантийных ксенолитов при их транспортировке к поверхности

кимберлитовой магмой. Никто и никогда и не утверждал, что гранаты кристаллизуются из кимберлитового расплава. Другое дело, что эти ксенокристаллы могут быть равновесны или неравновесны с магмой. Второй вариант наиболее вероятен. Полученные результаты фактически показывают, как ксенокристаллы должны изменяться, попадая в кимберлитовую магму, и не более того. Кроме того, выбор исходного граната также вызывает недоумение. Почему для экспериментов не был выбран гранат, характерный для гранатовых перидотитов – хромистый пироп, а были взяты «гранаты пиропового и пиропальмандинового состава» без хрома. Если такие гранаты и присутствуют среди ксенокристаллов в кимберлитах, то они являются продуктами распада коровых метаморфических пород (напр. Schulze, 2003). И какое они отношение имеют к кимберлиты, совершенно не понятно. Такие гранаты уж точно не могут кристаллизоваться из кимберлитовой магмы. Поэтому и смысл экспериментов и приведенный выше вывод теряется.

Особый интерес вызывает раздел 5.2, где представлены экспериментальные результаты по исследованию одновременного растворения оливина, граната и пироксенов в кимберлитовой магме. В результате установлена последовательность минералов по скорости их растворения в кимберлитовом расплаве. Главное, что настораживает в этих экспериментах – это их дизайн: одновременное присутствие всех минералов в одном опыте, причем рядом друг с другом. Поэтому возникает естественный вопрос о взаимном влиянии минералов на их растворимость (а точнее сказать, взаимодействие с расплавом) в кимберлитовом расплаве. Поэтому не исключено, что «лучшая» растворимость клинопироксена связана именно с присутствием рядом с ним ортопироксена, что выражается в установлении равновесия $\text{Di} + \text{MgCO}_3 = \text{En} + \text{CaCO}_3$ или $2\text{Di} + 4\text{MgCO}_3 = 2\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 + 2\text{En}$, где карбонатные компоненты – это компоненты расплава. Реакция, которая предлагается для объяснения «растворимости» клинопироксена представляется мало вероятной. Прежде всего, это связано с тем, что CO_2 при давлении 4 ГПа в кимберлитовом карбонатно-силикатном расплаве растворен, скорее всего, полностью и в виде CO_3^{2-} (напр. Moussallam et al., 2015), и активность молекулярного CO_2 в расплаве низка, чтобы произвести предлагаемую автором реакцию $\text{Di} + \text{CO}_2 = \text{En} + \text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2$. Факт повышения содержания SiO_2 в расплаве согласно этой реакции не подтвержден. Поэтому, если взаимодействие клинопироксена с кимберлитовым расплавом действительно вело к образованию ортопироксена, то, скорее всего, кроется именно в приведенных выше двух реакциях. Они не требуют ни CO_2 , ни SiO_2 в расплаве.

Вывод о том, что клинопироксен менее устойчив в кимберлитовом расплаве, даже менее, чем ортопироксен, противоречит многочисленным свидетельствам того, что

именно инконгруэнтное растворение ортопироксена является мощнейшим процессом, ведущим к обогащению кимберлитовых расплавов SiO_2 (Le Roex et al., 2003; Mitchell, 2006; Kopylova et al. 2007; Kamenetsky et al., 2009; Brett et al., 2009; Luth, 2009; Arndt et al. 2010), а также, возможно, к выделению CO_2 на небольших глубинах (напр. Russell et al., 2012; Kamenetsky and Yaxley, 2015; Sharygin et al., 2017). Согласно экспериментам и теоретическим оценкам, составы кимберлитовых расплавов близки к котектике оливин-клинопироксен (напр. Lee et al., 2000), так что клинопироксен должен чувствовать себя вполне хорошо в равновесии с таким расплавом, в отличие от ортопироксена.

Не совсем понятно утверждение автора о том, что «на растворимость ромбического пироксена накладывается его инконгруэнтное плавление». Хорошо известно, что энстатит в отсутствии воды в системе плавится конгруэнтно выше давления 5.4 кбар (Boyd et al., 1964), и лишь добавление воды смешает точку инконгруэнтного плавления до ~3 ГПа (Kushiro et al., 1968; Inoue, 1994). Вероятно, автор имел в виду не инконгруэнтное плавление, а перитектическую реакцию с расплавом.

В последнем разделе главы 5 представлены результаты по гравитационному фракционированию кристаллов силикатных минералов в кимберлитовом расплаве. Показана высокая скорость оседания ксенокристаллов в кимберлитовой магме. Хоть в названии раздела фигурируют лишь силикатные минералы, также проводились опыты и с кристаллами синтетических алмазов.

Результаты всех трех разделов главы 5 легли в основу четвертого защищаемого положения, а также результаты, описанные в разделе 3.3. Было бы логичнее оставить разделы 3.3 и 3.4 в пятой главе, что сохранило бы целостность и последовательность изложения экспериментального материала, на базе которого сформулированы защищаемые положения.

В автореферате сказано, что фактический материал базируется на 100 методических и более 400 исследовательских экспериментов в широком диапазоне давлений и температур. К сожалению, в рамках текста диссертационной рукописи соискателю не удалось в полной мере отразить весь заявленный экспериментальный объем, что влияет на общее впечатление от работы. В оправдание, можно принять тот факт, что действительно сложно найти форму изложения и представления материала, которая позволяет донести результаты многолетних экспериментальных исследований.

Согласно Постановлению Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. N 842 «О ПРИСУЖДЕНИИ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ», раздел III. «Представление и защита диссертаций», пункт 15. «...Диссертация оформляется в соответствии с требованиями, устанавливаемыми Министерством образования и науки Российской

Федерации. Диссертация и автореферат представляются в диссертационный совет на русском языке ...». Тем не менее, целый ряд рисунков и таблиц в тексте рукописи диссертации представлены на английском языке: стр. 20 Рис. 1.2, стр. 21 Рис. 1.3, стр. 28 Рис. 1.8, стр. 30 Рис. 1.9, стр. 32 Таблица 1.1, стр. 34 Таблица 1.2, стр. 39 Рис. 1.11, стр. 41 Рис. 1.12, стр. 42 Рис. 1.13, стр. 43 Рис. 1.14, стр. 44 Рис. 1.15, стр. 49 Рис. 1.21б, стр. 51 Рис. 1.21, стр. 68 Рис. 1.24, стр. 70 Рис. 1.25, стр. 71 Рис. 1.26, стр. 74 Рис. 1.27, стр. 76 Рис. 1.28, стр. 79 Рис. 1.29, стр. 81 Рис. 1.31. и т.д.

Текст автореферата полностью соответствует содержанию диссертационной работы.

В соответствии со всеми требованиями ВАК, и «Положением ВАК России» о докторских диссертациях, данная работа Чепурова Алексея Анатольевича «Экспериментальное исследование кристаллизации и преобразования силикатных и оксидных минералов мантийных парагенезисов, ассоциирующих с алмазом» является законченным трудом, докторской диссертацией. Алексей Анатольевич Чепуров достоин присуждения ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 25.00.05 – минералогия, кристаллография.

Отзыв рассмотрен и одобрен в качестве официального на заседании Ученого совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института экспериментальной минералогии имени академика Д.С. Коржинского Российской академии наук (ИЭМ РАН) №7 от 26 ноября 2018г.

Ученый секретарь Ученого совета ИЭМ РАН,
кандидат геолого-минералогических наук
тел. 8(496)5221666, e-mail: vfedkin@iem.ac.ru

В.В. Федькин

Зам.директора ИЭМ РАН по науке,
доктор химических наук
тел. 8(496)5225849, e-mail: euo@iem.ac.ru

Е.Г.Осадчий

Ведущий научный сотрудник лаборатории
флюидно-магматических процессов ИЭМ РАН,
доктор геолого-минералогических наук
тел. 8(496)5225876, e-mail: spivak@iem.ac.ru



Первое включение в реестр научных
фундаментальных, высокотехнологичных
и прикладных научных организаций
Федерации, учено-исследовательская организация
Фундаментальный научно-исследовательский институт
имени академика Д.С. Коржинского
Российской Федерации (ИЭМ РАН)