

## Отзыв

официального оппонента

на диссертационную работу 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»

Диссертационная работа А.А. Чепурова посвящена экспериментальному исследованию кристаллизации силикатных и оксидных минералов, типичных для мантийных алмазосодержащих парагенезисов, в том числе совместно с алмазом в металлическом расплаве, а также изучению взаимодействия силикатных минералов с кимберлитовым расплавом. В диссертации рассматривается целый ряд важнейших проблем, связанных с происхождением алмаза и его минеральных ассоциаций, включающий в себя установление роли металлических расплавов в кристаллизации алмазов и связанных с ними силикатных минералов, реконструкцию условий образования высокохромистых гранатов в мантии Земли, процессы эволюции кимберлитовых расплавов в условиях взаимодействия с мантийными ксенокристаллами. В настоящее время в мире проводится не так много экспериментальных исследований, направленных на решение этих проблем, поэтому *актуальность* диссертационной работы А.А. Чепурова не вызывает сомнения.

*В основе работы* лежат результаты многолетних (1995-2018) экспериментальных исследований автора при высоких давлениях и температурах (2-7 ГПа, 800-2200°C). В работе содержатся материалы по изучению природных и искусственных алмазов, синтезированных гранатов, оливина, пироксенов и шпинели, а также экспериментальные данные по оценке свойств кимберлитовых расплавов. В процессе работы автором были разработаны новые элементы ячеек высокого давления, усовершенствованы приемы подготовки ячеек и проведения экспериментов. При подготовке диссертации были использованы современные методы исследований, включающие в себя оптическую, сканирующую электронную и атомно-силовую микроскопии, микрозондовый химический анализ, видимую-ИК-спектроскопию, рентгенографию и газовую хромато-масс-спектрометрию.

А.А. Чепуровым сформулированы следующие главные задачи 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 P-T условиях, соответствующих верхней мантии Земли.
4. Экспериментальное исследование устойчивости силикатных минералов при взаимодействии с кимберлитовым расплавом при мантийных P-T параметрах.
5. НРНТ отжиг алмазов.

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.

Все задачи сформулированы четко и понятно и находятся в хорошем соответствии с общей логикой проведенных исследований.

*Научная новизна и практическая значимость работы* также не вызывают сомнений. Получен целый ряд новых результатов, среди которых можно особо выделить установление возможности кристаллизации алмазов в металлических средах совместно с силикатными и оксидными минералами, близкими по составу к одноименным природным фазам, экспериментальные данные по образованию субкальциевых высокохромистых гранатов и новая информация о скорости осаждения ксенокристаллов мантийных минералов в кимберлитовом расплаве. В ходе работы были усовершенствованы и запатентованы технологические приемы, используемые для выращивания и отжига кристаллов алмаза на аппарате высокого давления БАРС, была разработана и запатентована методика травления поверхности алмазов наночастицами железа, нашедшая применение в промышленных технологиях.

В целом, диссертация А.А. Чепурова состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитированной литературы из 524 наименований. Объем диссертации составляет 318 страниц, в том числе 106 рисунков и 43 таблицы.

Во **Введении** автор диссертации показывает актуальность работы, определяет ее цели и задачи, характеризует фактический материал и методы исследования, рассматривает научную и практическую значимость полученных результатов, приводит данные об апробации работы на различных международных и отечественных конференциях и в публикациях и указывает долю личного вклада в исследование. Далее во Введении формулируются четыре защищаемых положения, которые доказываются в последующих пяти главах:

1. При давлении 5.5 ГПа и температуре 1450 °С 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.

2. 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. При давлении 5 ГПа и температуре 1300°С в системе оливин-ортопироксенхромит-корунд в присутствии водного флюида и до 1.5 вес.% Са-содержащего субстрата происходит кристаллизация гранатов с содержанием Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 14.25 мас.% и СаО 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.

4. При давлении 4 ГПа и температурах 1300-1500°C 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 пироба в пироп-гроссуляровый гранат с высоким содержанием СаО 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.

Несмотря на то, что в целом все защищаемые положения можно считать обоснованными, к их формулировке имеется целый ряд замечаний.

*Первое и главное замечание связано с излишней конкретизацией P-T параметров опытов. Каждое защищаемое положение привязано к определенным сериям опытов, проведенным в очень узких диапазонах условий. Возникает вопрос, а что произойдет, если эти условия изменятся хотя бы незначительно. Если для кандидатской диссертации такого рода формулировки могли бы выглядеть вполне уместно, то докторская работа предусматривает более глубокое обобщение и анализ рассматриваемых процессов в преломлении на природные данные. Вместо узких диапазонов P-T условий автору следует оперировать конкретными участками мантии Земли. То же самое касается и составов выбранных для изучения систем – неплохо было привязать их к обобщенным составам мантийных пород.*

*Второе и третье защищаемые положения очень близки с точки зрения как составов изучаемых систем, так и параметров опытов, поэтому логичнее было бы их объединить.*

*Еще одно замечание, относящееся не только к защищаемым положениям, но и характеристике фактического материала работы. В самом начале работы делается заявление о более чем 400 индивидуальных опытах в широком диапазоне условий, которые легли в основу работы. Однако при прочтении работы создается впечатление, что за исключением экспериментальных серий, с которыми связано четвертое защищаемое положение, все остальные серии крайне малочисленны. Какие еще эксперименты вошли в эту общую цифру? Насколько подтверждены защищаемые положения результатами экспериментов?*

В Главе 1 приведен обзор литературных данных, посвященных фундаментальным основам образования природных алмазов и их минералов-спутников, а также обзор имеющихся в литературе сведений о постростовой истории мантийных минералов при транспортировке к поверхности Земли кимберлитовым магматизмом. Вполне логичным выглядит разделение этой главы на три части, связанные с тремя крупными блоками рассмотрения

экспериментальных результатов в работе: кристаллизация алмазов в природных условиях и эксперименте, образование субкальциевых хромистых гранатов в мантии Земли и современные взгляды на эволюцию кимберлитовых расплавов. При анализе этой главы видно, что автор неплохо владеет литературным материалом по излагаемым проблемам, однако несколько смущает избирательность в привлечении литературных источников. Так, при описании экспериментов по синтезу алмаза автор почему-то очень подробно рассматривает работы 1990-х годов, и совсем мало внимание уделяет более ранним, классическим и, наоборот, более поздним исследованиям. В частности, наиболее значимые исследования группы ИЭМ РАН под руководством Ю.А. Литвина 2000-2010 гг., имеющие прямое отношение к теме диссертации, никак не обсуждаются в этом разделе. Совершенно недопустимо использование таблиц и рисунков на английском языке – в главе 1 доля такого иллюстративного материала весьма значительна!

**Глава 2** посвящена характеристике экспериментальных и аналитических методов. В ней приводится подробная характеристика установки БАРС, рассматриваются различные схемы сборки ячеек, ориентированные на решение различных задач, обсуждаются вопросы калибровки и точность определения температуры и давления в экспериментах. Особое внимание уделено рассмотрению использованных в работе аналитических методов. Чувствуется высокая степень компетентности автора в обсуждаемых вопросах. Тем не менее, ряд важных вопросов, напрямую связанных с последующим анализом экспериментальной информации, не нашел отражения в этом разделе. С чем связано использование различных схем сборки ячеек в опытах, проведенных в металл-силикат-углеродной системе и насколько сопоставимы результаты, полученные с использованием различных схем? Какова воспроизводимость результатов экспериментов в этой и других сериях, особенно когда количество опытов невелико?

В **Главе 3** приведены результаты экспериментального исследования металл-силикат-углеродных систем, анализ которых позволил автору сформулировать первое защищаемое положение. Значительная часть обсуждения полученных результатов проводится в рамках модели преимущественной кристаллизации алмаза в металлических расплавах. Эта модель уже давно и активно развивается группой, членом которой является диссертант (например, [А.И. Чепуров и др., 1997] и целый ряд более поздних работ). Хочется отметить три новых аспекта, которые автор работы внес в развитие этой модели. Во-первых, экспериментально реализована совместная кристаллизация алмаза и силикатных минералов, магнезиальный состав которых оказался весьма близок к составу силикатных включений в природных алмазах. Варьируя стартовый состав силикатных компонентов, автор получил довольно широкий набор силикатных минералов, которые могут быть соотнесены с ультраосновными (богатыми оливином) и основными (гранат-клинопироксеновыми) ассоциациями природных алмазов. Во-вторых, в опытах показано конкретное влияние силикатных компонентов (в случае их большого количества) на морфологические особенности алмазов, вплоть до появления расщепленных кристаллов. В-третьих, в работе, на основе оценки экспериментальных результатов, впервые проведена оценка окислительно-восстановительных условий алмазообразования. По ассоциации высокомагнезиальных силикатов и металлических фаз, автором сделан вывод о

сильно восстановительных условиях. Несмотря на то, что к этому выводу и возможности его приложения к моделям образования природных алмазов пока следует относиться с большой осторожностью, считаю, что диссертант развивает очень важный аспект в исследованиях, которые необходимо продолжать. *В этой главе мне бы хотелось увидеть дискуссию автора по поводу альтернативных моделей состава среды природного алмазообразования, однако такой элемент в диссертации отсутствует. Есть и некоторые терминологические неточности. И в работе, и в автореферате автор упоминает о получении расплава, по химическому составу близкого к эклогитовому. Что это за расплав? Не лучше ли было о нем писать как о расплаве основного, базальтового состава?*

**В главе 4** автор обсуждает результаты опытов по синтезу субкальциевых хромистых гранатов и формулирует сразу два защищаемых положения, которые, как было показано выше, очень близки между собой. В первом разделе образование малокальциевых хромистых гранатов моделируется при 5 ГПа и температуре 1100-1300°C взаимодействием серпентинита с хромитом, которое происходит ступенчато, через дегидратацию серпентина с образованием оливина, ортопироксена и воды. Изученная система моделирует протолит с очень высоким отношением Cr/Al, так что кристаллизация высокохромистых гранатов вполне ожидаема. Привлечение второй системы «оливин-ортопироксен-хромит-корунд в присутствии водного флюида и до 1.5 вес.% Са-содержащего субстрата» вызывает целый ряд вопросов. *Причем здесь корунд? Понятно, что добавляя его в стартовый состав, автор пытается насытить систему алюминием, но введение корунда в название системы дает совершенно экзотическую минеральную ассоциацию, не имеющую отношения к природе! Кроме того, не считая корунда и «1.5 вес.% Са-содержащего субстрата», две изученные системы идентичны. На мой взгляд, результаты проведенных опытов во второй серии не являются свидетельством «принципиальной возможности образования субкальциевых хромистых пиропов мантийных парагенезисов путем метасоматических преобразований гарцбургитов».* Заключительный раздел этой главы, посвященный рассмотрению зональности синтезированных в опытах гранатов, представляется весьма интересным и перспективным для дальнейшего изучения.

**Глава 5** посвящена подробному обсуждению экспериментальных данных по взаимодействию пиропового граната с кимберлитовым расплавом, особенностям кристаллизации высококальциевого граната, оценкам скоростей осаждения и гравитационному фракционированию силикатных минералов в кимберлитовом расплаве. Сформулировано четвертое защищаемое положение, которое очень хорошо обосновано результатами экспериментов и содержит большой объем важной и интересной информации. Нужно отметить, что, например, данные по различным скоростям оседания кристаллов в зависимости от плотности могут найти неплохое приложение к интерпретации неравномерного распределения мантийных ксенокристаллов в некоторых кимберлитовых трубках. Не менее важны новые данные автора, позволившие ему представить ряд устойчивости мантийных минералов в кимберлитовом расплаве. Данная глава хорошо организована, содержит богатый иллюстративный материал, и поэтому существенных замечаний к ней не имеется.

В целом, следует отметить, что защищаемые положения хорошо обоснованы результатами проведенных автором исследований, а также глубоким

теоретическим анализом литературных данных. По теме диссертационной работы опубликована 31 статья в рецензируемых журналах из перечня ВАК и получено 4 патента на изобретение РФ. Апробация данной работы не вызывает сомнений, так же как и научная квалификация Чепурова А.А. Диссертация соответствует формуле специальности 25.00.05 по следующим пунктам: п.1. Состояния минерального вещества в различных термодинамических и геодинамических условиях; п.3. Физика минералов и современные методы исследования морфологии, внутреннего строения, структурного несовершенства, фазово-химической неоднородности и связанных с ними свойств реальных минералов, изучение их вариаций в зависимости от условий образования и изменения в природных и технологических процессах; п.4. Термодинамика минералов; п.11. Экспериментальная минералогия; п.18. Рентгеноструктурный анализ минералов и синтетических веществ, прецизионные методы анализа распределения электронной плотности в кристаллах.

Большинство сделанных в отзыве замечаний носит дискуссионный и рекомендательный характер и в целом не влияют на общее, весьма неплохое впечатление о работе. Считаю, что диссертационная работа «Экспериментальное исследование кристаллизации и преобразования силикатных и оксидных минералов мантийных парагенезисов, ассоциирующих с алмазом», соответствует всем критериям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор, Чепуров Алексей Анатольевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 25.00.05 - «минералогия, кристаллография».

Отзыв составил:

**Бобров Андрей Викторович** – профессор кафедры петрологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, доцент, доктор геолого-минералогических наук; адрес: 119991 Москва, Ленинские горы, д. 1, МГУ; тел. +7(495)939-49-29; e-mail: archi@geol.msu.ru

Я, Бобров Андрей Викторович, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой Диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

03.12.2018

