

Отзыв

на диссертацию Спивак Анны Валерьевны «Генезис сверхглубинного алмаза и первичных включений в веществе нижней мантии Земли (экспериментальные исследования)», представленную на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 25.00.05 – минералогия, кристаллография

Исследования А.В. Спивак посвящены одной из сложных проблем химической эволюции Земли, а именно, изучению тех минеральных сред в глубинах мантии планеты, в которых происходило алмазообразование. Интерес к алмазам – продуктами кристаллизации углерода при высоких давлениях, определяется не только хорошо известными исключительными физико-химическими свойствами этих глубинных кристаллов алмазов, которые используются для решения многих прикладных задач, но также и тем, что минеральные включения в алмазах открывают возможности для изучения фазового состояния и химической эволюции глубинных оболочек Земли. Исключительная устойчивость алмазов к воздействию на него природных геохимических процессов позволяет рассматривать этот минерал высоких давлений и те включения, которые имеются в нем, в качестве своеобразного «окна» в мантию и литосферные слои Земли.

Актуальность исследований определяется спорностью многих сторон тех геохимических процессов, которые сопровождали образование алмазов и минеральных включений в них. Одним из важнейших источников сведений о веществе алмазообразующей среды в условиях переходной зоны и нижней мантии являются первичные ростовые включения в сверхглубинных алмазах. В то время как возможная нижнemanтийная минералогия оценена по экспериментальным субсолидусным превращениям пиролита при соответствующих *PT*-условиях переходной зоны и нижней мантии при допущении изохимической модели первичного вещества мантии на всех глубинах. В то время как возможная нижнemanтийная минералогия оценена по экспериментальным субсолидусным превращениям пиролита при соответствующих *PT*-условиях переходной зоны и нижней мантии при допущении изохимической модели первичного вещества мантии на всех глубинах. Экспериментальные исследования А.В. Спивак являются актуальной и находится на острие современной науки. Они являются новым вкладом в изучение химического и фазового состава материнских сред

сверхглубинных алмазов. Следует также отметить, что эксперименты при параметрах нижней мантии, на которых основана диссертация, являются чрезвычайно сложными. В исследованиях А.В. Спивак широко использованы современные оригинальные методы исследований химических реакций при высоких давлениях, что делает заключения А.В. Спивак особенно ценными.

В первой (обзорной) главе приводится обстоятельное обсуждение предыдущих работ, связанных с выяснением среды алмазообразования, а также информативный обзор современных данных о включениях минеральных ассоциаций переходной зоны и нижней мантии Земли во включениях в глубинных алмазах. Анализ позволил докторанту убедительно обосновать новые экспериментальные задачи в этой области. Диссертация отличается ясностью в постановке задач исследований.

Глава 2 посвящена описанию использованных методов исследования. Приводится подробное описание экспериментальных установок и аналитических методов, которые соответствуют современному мировому уровню, в том числе многопуансонные аппараты до давления 26 ГПа, аппараты с алмазными наковальнями и лазерным нагревом до 80 ГПа и торOIDные камеры типа наковальня с лункой до 8 ГПа. Наиболее востребованными оказались микрорентгеноспектральные методы исследования сложных экспериментальных продуктов, а также методы Раман-микроспектроскопии и рентгенофазового анализа. Разнообразие использованной аппаратуры и методов является сильной стороной работы. Следует отметить, что докторант принимала непосредственное участие в ходе выполнения экспериментальных работ, освоила сложную современную аппаратуру высоких давлений и температур, а также выполнила ряд ключевых мероприятий по внедрению установки высокого давления с алмазными наковальнями и лазерным нагревом, вплоть до начала экспериментальных исследований в Институте экспериментальной минералогии РАН.

В третьей главе описаны результаты экспериментов по плавлению и разложению простых карбонатов при давлении до 80 ГПа с использованием ячеек с алмазными наковальнями и лазерным нагревом. Хотя поведение чистых карбонатов не имеет прямых приложений к проблемам минералообразования в мантии, изучение таких простых систем чрезвычайно важно в физико-химическом контексте последующих экспериментальных работ. До сих пор фазовые диаграммы CaCO_3 , MgCO_3 и Na_2CO_3 при высоких давлениях и температурах были изучены фрагментарно. В работе убедительно доказано конгруэнтное

плавление карбонатов при давлении по крайней мере до 80 ГПа и разложение расплавов при высоких температурах с образованием алмаза.

Результаты экспериментов с простыми карбонатами составляют содержание первого защищаемого положения. Это положение можно считать в основном обоснованным представленным экспериментальным материалом, *за исключением предположения о двухступенчатом разложении карбонатных расплавов при высоких температурах. Это предположение требует дополнительного экспериментального обоснования, возможно с привлечением спектроскопических исследований *in situ* при экспериментальных параметрах.*

Изучение сложных многокомпонентных карбонатных систем (базовых карбонатных составляющих материнских магм сверхглубинных алмазов на основе оценок по минералогии сингенетических включений в них) проводилось с использованием многопуансонного аппарата высокого давления до 23 ГПа. Показано, что фазовые отношения многокомпонентных карбонатных систем характеризуются эвтектическим типом плавления, расплавы многокомпонентных карбонатов также, как и простых, устойчивы при условиях переходной зоны и нижней мантии Земли. Как полные, так и частичные карбонатные расплавы стабильны, полностью смесимы и являются эффективными растворителями элементарного углерода, чем определяется сама возможность генезиса сверхглубинного алмаза. Показано, что температуры первичного плавления многокомпонентных систем карбонатных минералов ниже геотермальных для ПЗ и НМ, что свидетельствует о возможности генерации материнских сред сверхглубинных алмазов в данных условиях. Результаты этих экспериментов составляют содержания второго защищаемого положения. Оно представляется вполне обоснованным, *хотя желательным было бы более подробное экспериментальное изучение данных систем, в особенности, положения межфазовых границ.*

Четвертая глава посвящена экспериментальному изучению фазовых отношений при плавлении модельных многокомпонентных нижнemanтийных систем при давлениях до 26 ГПа. Последовательно составы систем усложнялись добавлением главных оксидных, силикатных и карбонатных компонентов до формирования многокомпонентной системы MgO-FeO-SiO₂-CaPrv-Carb*, в которой включены практически все главные компоненты материнских сред нижнemanтийных алмазообразующих очагов. В результате проведенных экспериментальных работ показано, что фазовые отношения при плавлении коренных нижнemanтийных систем MgO-FeO-SiO₂ и MgO-FeO-CaO-SiO₂ при условиях

нижней мантии характеризуются перитектической реакцией. При этом создаются физико-химические условия для образования в магматических условиях парадоксальной ассоциации Mg-Fe-оксидов и SiO_2 , невозможной в условиях верхней мантии и переходной зоны. Показана эффективность режима фракционной кристаллизации в формировании стилювита *in situ* в составе нижнemanтийной базитовой ассоциации, тогда как минералы неограниченных твердых растворов периклаз-вюстит ($\text{MgO}\cdot\text{FeO}$)_{ss} можно отнести к «сквозным» ультрабазит-базитовым. При этом фазовые отношения при плавлении оксид-силикат-карбонатных материнских сред сверхглубинных алмазов при 24-26 ГПа также характеризуются перитектической реакцией. В результате создаются физико-химические условия для образования парадоксальной ассоциации Mg-Fe-оксидов и SiO_2 совместно с Ca-перовскитом CaSiO_3 и твердыми растворами карбонатов Mg, Fe, Na и Ca. Образование стилювита в ассоциации с $(\text{Mg},\text{Fe})\text{O}$ в материнских расплавах может произойти исключительно в режиме фракционной кристаллизации. При изучении нижнemanтийных систем использованы экспериментальные методы в сочетании с теоретическими методами физической химии многокомпонентных многофазовых систем. Это привело к построению фазового комплекса исследуемой системы с использованием симплексиальной триангуляции многокомпонентной диаграммы составов. Построены также фазовые диаграммы двухмерных полiterмических сечений многокомпонентных систем с применением правила фаз Райнза и др. Основные элементы диаграмм установлены на основании анализа экспериментальных данных и обоснованы достаточно убедительно.

Полученные результаты составляют основу третьего и четвертого защищаемых положений, на первый взгляд подобных. Различие третьего и четвертого защищаемого положения существенно. В третьем защищаемом положении сформулирован характер физико-химического механизма контролирующего оксид-силикатную магматическую эволюцию коренного нижнemanтийного вещества. Четвертое защищаемое положение обосновывает составы оксид-силикат-карбонатных материнских сред сверхглубинных алмазов, на основании которых рассмотрен физико-химический механизм оксид-силикат-карбонатной эволюции алмазообразующих расплавов в нижнemanтийном очаге. Оба защищаемых положения представляются обоснованным. Относительно четвертого положения было бы интересным иметь аналитические данные о последовательном изменении концентраций характеристических элементов, прежде всего Mg и Fe по мере углубления процесса ультрабазит-базитовой эволюции алмазообразующих расплавов. Полезно было бы сопоставить полученные результаты с данными для первичных включений.

В пятой главе излагаются результаты экспериментов по образованию алмаза в карбонат-углеродных, карбонат-оксид-углеродных и карбонат-оксид-силикат-углеродных системах при давлении 8.5–80 ГПа. Показано, что простые CaCO_3 , MgCO_3 , Na_2CO_3 и многокомпонентные Mg–Fe–Na и Ca–Mg–Fe–Na карбонатные расплавы являются эффективными алмазообразующими средами при РТ-условиях переходной зоны и нижней мантии. Нуклеация и кристаллизация алмаза в расплавах гетерогенных оксид-силикат-карбонат-углеродных систем осуществлена при давлениях до 26 ГПа. Значимым результатом является экспериментальное доказательство реализации физико-химического механизма формирования ультрабазитовой и базитовой ассоциаций минералов (сингенитических включений в сверхглубинных алмазах) в материнских алмазообразующих расплавах нижнemanтийной оксид-силикат-карбонат-углеродной $(\text{Mg},\text{Fe})\text{O} - (\text{Mg},\text{Fe})\text{SiO}_3 - \text{SiO}_2 - \text{CaSiO}_3 - (\text{MgCO}_3\text{-FeCO}_3\text{-CaCO}_3\text{-Na}_2\text{CO}_3) - \text{C}$ системы при 26 ГПа. Показано, что результаты соответствуют требованиям критерия сингенезиса в том, что осуществляется сингенетическое формирование алмаза и полного набора главных парагенных нижнemanтийных минералов. Для изучаемой нижнemanтийной материнской системы определен концентрационный барьер нуклеации (КБНА), значение которого составляет 65–70 масс.% оксид-силикатных компонентов в алмазообразующей системе при 26 ГПа. Пятое положение можно считать обоснованным.

При разработке генетической классификации минеральных включений в сверх глубинных алмазах (глава VI) использован новый прием, когда соединены граничные составы алмазообразующих систем и поле материнских расплавов в единой наглядной диаграмме составов. *При этом в классификации использованы группы однородных минералов и компонентов. Видимо, неплохо было бы дополнить предложенную диаграмму таблицами с подробным перечнем индивидуальных минеральных фаз по каждому классификационному разделу.*

Сильной стороной работы является большой объем нового экспериментального материала по фазовым отношениям как простых модельных, так и многофазовых и многокомпонентных систем при давлениях до 80 ГПа. Результаты статических экспериментов при таких условиях вносят значительный вклад в создание экспериментальной основы для понимания процессов в условиях нижней мантии и переходной зоны. Чрезвычайно интересные и важные данные были получены по фазовым отношениям при плавлении нижнemanтийных и алмазообразующих систем, в составах которых воспроизводится реальное вещество нижней мантии, и по нуклеации

и кристаллизации алмаза в условиях переходной зоны и нижней мантии. Эти результаты позволили сформулировать шесть защищаемых положений, которые считаю обоснованными. Диссертационная работа является решением крупной научной проблемы генезиса сверхглубинного алмаза и первичных включений в веществе нижней мантии Земли.

Исследования А.В. Спивак минеральных сред в глубинах мантии планеты, в которых происходило алмазообразование, заслуживают высокой оценки. Они найдут широкое применение при изучении минерального состава глубинных зон Земли и при выяснении путей химической дифференциации ее мантии. Результаты экспериментов опубликованы в ведущих российских и международных журналах. Защищаемые положения полностью отражены в журнальных публикациях. А.В. Спивак заслуживает присуждения искомой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 25.00.05 «минералогия, кристаллография». Публикации и автореферат диссертации в достаточной степени отражают основное содержание и выводы работы.

Арнольд Арнольдович Кадик,

Профессор, доктор геолого-минералогических наук,

25.00.09 Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых,
зав. лабораторией геохимии мантии Земли Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Институт геохимии
и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН),
119991, ГСП-1, Москва В-334, ул. Косыгина, 19.

Тел.: 8(495)137-44-72

e-mail: kadik@geokhi.ru

