

ОТЗЫВ

на диссертационную работу 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

В диссертационной работе СПИВАК А.В. выполнено комплексное исследование происхождения алмаза в гетерогенном веществе нижней мантии Земли с акцентом на экспериментальные физико-химические исследования многокомпонентных многофазных алмазообразующих систем при высоких давлениях и температурах, соответствующих таким глубинам. Граничные составы изучавшихся систем оценены наиболее достоверным образом на основе литературных данных по анализу минеральных включений, захваченных растущими алмазами. По существу, диссертационная работа является первым экспериментальным исследованием фазовых превращений в реальном веществе нижней мантии, поскольку выноса коренного вещества нижней мантии (породы и ассоциации минералов) с глубин более 670 км на поверхности Земли пока не обнаружено. Учтены также результаты известных экспериментов по субсолидусным превращениям модельного верхне-мантийного «пиролита» в *РТ*-условиях нижней мантии. Это позволило в рамках модели изохимического состава мантии на всех глубинах раскрыть возможную минералогию нижней мантии и ключевое значение в ее формировании реакции распада рингвудита (полиморфа верхне-мантийного оливина $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$) на периклаз $(\text{Mg,Fe})\text{O}$ и бриджменит $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$. Однако минералогия первичных включений в алмазах нижней мантии оказалась богаче, причем среди главных минералов включений обнаруживается стишовит SiO_2 , что во многом определило конкретные задачи диссертационного исследования.

Задачи, решаемые в диссертационной работе СПИВАК А.В., находятся на острие современной экспериментальной минералогии, и сама их постановка стала возможной только благодаря последним достижениям в развитии

экспериментальных методов исследований при сверхвысоких статических давлениях. Все задачи поставлены впервые в мировой практике и направлены на решение наиболее актуальных проблем геофизики и геохимии, связанных с совместным генезисом сверхглубинного алмаза и ассоциированных с ним минералов. К таким проблемам относятся: (1) химический и фазовый составы ростовых сред алмазов и включений, (2) физико-химический механизм нуклеации и кристаллизации алмазов; (3) физико-химические условия эволюции магматических расплавов коренных пород нижней мантии, а также ростовых расплавов алмазов и включений; (4) генетическая классификация гетерогенных минералов первичных включений, захваченных сверхглубинными алмазами.

Из большого числа новых и интересных результатов, полученных в диссертационной работе СПИВАК А.В., наиболее важными мне представляются следующие:

1) Экспериментально показано, что плавление простых карбонатных соединений CaCO_3 , MgCO_3 и Na_2CO_3 является конгруэнтным в очень широком интервале давлений 10–80 ГПа и температур 1700–3000°C) и определены высокотемпературные границы областей однородных расплавов. Эти результаты имеют существенное значение для обоснования химической природы ключевых компонентов карбонат-содержащих ростовых сред сверхглубинных алмазов.

2) Экспериментально исследованы фазовые отношения при плавлении многокомпонентной карбонатной системы $\text{MgCO}_3\text{--FeCO}_3\text{--CaCO}_3\text{--Na}_2\text{CO}_3$, состав которой максимально приближен к карбонатной составляющей ростовых сред сверхглубинных алмазов. Получены экспериментальные доказательства ее эвтектического плавления (фазовый состав 4-фазной эвтектики: $\text{Mg-Fe-карбонат} + \text{Ca-Na-Fe-Mg-карбонат} + \text{Na-Ca-Fe-Mg-карбонат} + \text{L}$); определена последовательность кристаллизации карбонатных минеральных фаз с понижением температуры (первичная фаза – Mg-Fe-карбонат), а также обосновано наличие однофазного поля многокомпонентного карбонатного расплава. Самый важный результат проведенного исследования – впервые показано, что температуры эвтектического плавления системы $\text{MgCO}_3\text{--FeCO}_3\text{--CaCO}_3\text{--Na}_2\text{CO}_3$ значительно – на 500–700 °C – ниже геотермальных. Это

однозначно доказывает возможность формирования карбонатных расплавов (в том числе, алмазообразующих расплавов) в условиях нижней мантии.

3) Экспериментально изучены фазовые отношения при плавлении системы MgO-FeO-SiO_2 , ответственной за образование определяющих минералов нижней мантии – ферропериклаза $(\text{Mg,Fe})\text{O}$, бриджменита $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$, магнезиевюстита $(\text{Fe,Mg})\text{O}$ и стишовита SiO_2 . Получены экспериментальные доказательства реакции бриджменита с расплавом с образованием «парадоксальной» ассоциации фаз «периклаз-вюститовые твердые растворы $(\text{MgO-FeO})_{\text{ss}}$ + стишовит SiO_2 », которая запрещена в условиях верхней мантии из-за химического взаимодействия между оксидами с образованием промежуточных силикатных соединений. Установлено наличие квазинонвариантной перитектической точки «бриджменит + расплав = ферропериклаз/Мг-вюстит + стишовит» и определены равновесные составы фаз. Этот результат имеет принципиальное значение для решения «стишовитного парадокса», так как обнаруженная перитектическая точка в общей структуре ди-, моно- и невариантных элементов поверхности ликвидуса системы MgO-FeO-SiO_2 обеспечивает возможность изменения состава магматического расплава от ультрабазитового (из него кристаллизуются ферропериклаз и бриджменит) до базитового (из которого кристаллизуются магнезиевюстит и стишовит) в процессе фракционной кристаллизации.

4) Изучены фазовые превращения при давлении 26 ГПа и температурах 1300–2200 °С вблизи геотермы в более сложных многокомпонентных системах – ниже-мантийной « $\text{MgO-FeO-SiO}_2\text{-Ca-перовскит } \text{CaSiO}_3$ ») и алмазообразующей « $\text{MgO-FeO-SiO}_2\text{-CaSiO}_3\text{-(Mg-Fe-Ca-Na-карбонат)-углерод}$ ». Убедительно показано, что в этих системах, как и в системе MgO-FeO-SiO_2 , имеется перитектика, допускающая ультрабазит-базитовую эволюцию расплавов при фракционной кристаллизации и, в частности, совместное выпадение кристаллов стишовита и магнезиевюстита, недопустимое в условиях верхней мантии.

5) Экспериментально исследована совместная кристаллизация алмазов с минералами всех трех основных ассоциаций, обнаруживаемых в первичных включениях в сверхглубинных алмазах нижней мантии, а именно: i)

ультрабазитовой ассоциации «ферропериклаз + бриджменит»; ii) промежуточной «перитектической» ассоциации «ферропериклаз/магнезиовюстит + бриджменит + стишовит» и iii) базитовой ассоциации «магнезиовюстит + стишовит». Определены физико-химические условия образования каждой из природных ассоциаций из природной ростовой среды. Эти результаты являются принципиально важным вкладом в генетическую минералогию алмаза.

Необходимо также отметить целеустремленность и хорошие деловые и организаторские качества диссертанта. Значительную часть результатов, легших в основу диссертации, СПИВАК А.В. получила, работая в Университете Байройта – Баварском геоинституте по выигранным ею молодежным грантов Президента РФ и РФФИ. Баварский институт – один из лучших мировых центров по экспериментальным исследованиям в алмазных наковальнях с лазерным нагревом при рекордных значениях давления и температуры. Приобретенный там опыт СПИВАК А.В. весьма эффективно использовала для развития новых методик в ее родном Институте экспериментальной минералогии РАН, внося большой вклад в создание на базе ИЭМ РАН первого отечественного комплекса аппаратуры с алмазными наковальнями, лазерным нагревом и *in situ* Рамановской микроспектроскопией. В 2015 году на этом комплексе началось проведение минералогических, петрологических и геохимических исследований.

Не вызывает сомнений достоверность экспериментальных результатов, полученных в диссертационной работе с использованием лучшей аппаратуры мировых исследовательских центров. Проведенный диссертантом анализ полученных данных и основные выводы о фазовых равновесиях в изучавшихся многокомпонентных системах и допустимых траекториях фракционной кристаллизации расплавов полностью согласуются с правилами геометрической термодинамики.

Мои критические замечания по диссертации носят непринципиальный характер и относятся только к интерпретации и форме представления полученных экспериментальных результатов.

1) Вывод диссертанта о двухступенчатом характере реакции разложения карбонатов $MgCO_3$, $CaCO_3$ и Na_2CO_3 в условиях переходной зоны и нижней

мантии (стр. 7) с образованием CO_2 на промежуточной стадии согласуется с правилом фаз Райнза, но нуждается в дополнительном экспериментальном подтверждении.

2) В качестве одной из вершин концентрационного треугольника на рис. 5.14 (стр. 181) выбран эвтектический состав смеси $(\text{MgO})_x(\text{FeO})_y(\text{SiO}_2)_z$. Этот необычный выбор не указан в тексте диссертации, а эвтектическая температура названа температурой плавления граничного состава $(\text{MgO})(\text{FeO})(\text{SiO}_2)$, что эффективно препятствует пониманию читателями приведенной на рис. 5.14 фазовой диаграммы.

3) На политермических сечениях рис. 4.2 (стр. 126), рис. 4.9 (стр. 134) и рис. 4.13 (стр. 143) три фазовых поля смыкаются в точке на вюститной стороне диаграммы, а на рис. 4.17 (стр. 148) таких полей даже четыре. С точки зрения термодинамики, это допустимая, но очень маловероятная ситуация. Для более корректного представления необходимо «раздвинуть» эти точки в короткие отрезки. Желательно также придать определенные наклоны горизонтальным линиям, ограничивающим некоторые солидусные фазовые поля на рис. 4.3 (стр. 126), рис. 4.9, 4.13, 4.17 и нескольких других политермических сечениях, чтобы не создавать у читателей впечатление, что эти линии описывают инвариантные равновесия.

Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки проведенного исследования. Диссертация А.В. Спивак представляет собой цельную и законченную научно-исследовательскую работу, которую можно характеризовать как крупное достижение в развитии минералогии и петрологии нижней мантии Земли.

Несомненна научная новизна положений, защищаемых в диссертационной работе СПИВАК А.В. В их основе – впервые полученные ею результаты ключевого значения в решении крупной научной проблемы генезиса сверхглубинного алмаза и первичных включений в веществе нижней мантии Земли.

Материалы диссертации надежно апробированы – докладывались на 29 российских и международных конференциях и опубликованы в 22 статьях в реферируемых журналах. Представленная диссертация достаточно полно

отражает выносимые на защиту результаты. Текст автореферата полностью соответствует содержанию диссертационной работы.

По объему и оригинальности полученных результатов, их достоверности, научной и практической ценности диссертационная работа «Генезис сверхглубинного алмаза и первичных включений в веществе нижней мантии Земли (экспериментальные исследования)» удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК к докторским диссертациям. СПИВАК А.В. получила новые экспериментальные результаты, принципиально важные для решения ряда актуальных проблем генетической минералогии «сверхглубинного» алмаза нижней мантии Земли. В работе использованы самые современные методики экспериментальных исследований в рекордно широком диапазоне давлений и температур. Предложенная интерпретация полученных данных хорошо обоснована и демонстрирует глубокие познания автора в термодинамике многокомпонентных систем. Все это характеризует СПИВАК А.В. как сложившегося высококвалифицированного исследователя, заслуживающего присуждения ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 25.00.05 – минералогия, кристаллография.

Антонов Владимир Евгеньевич

Доктор физико-математических наук.

Заведующий лабораторией Физики высоких давлений Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики твердого тела Российской академии наук (ИФТТ РАН)

142432, г.Черноголовка, ул. Ак.Осипьяна, д.2.

Тел.: 8 (496) 522-40-27

e-mail: antonov@issp.ac.ru

Подпись В.Е. Антонова заверяю:

Ученый секретарь

Института физики твердого тела Р

доктор физ.-мат.наук (Г.Е. Аб

Отзыв наугне 17.02.2016

С отг... 18.02.2016г.