

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ МУЗЕЙ им. А.Е.ФЕРСМАНА
Российской академии наук (ФАНО)
Ленинский пр-т, дом 18, корпус 2, Москва, 119071
Телефон (495) 952-00-67; факс (495) 952-48-50. E-mail: mineral@fmm.ru

№ 1 /

15.01. 2016 г.

Утверждаю

Врио Директора
ФГБУН Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН,
кандидат геол.-мин. наук В.Ю. Карпенко



ОТЗЫВ

ведущей организации 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**

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

Актуальность данной работы обусловлена весьма высоким интересом к глубинам Земли, особенно к мантии. Это определяется и оригинальными находками природного алмаза и включений в нем с глубин 150-700 км, а также работами по синтезу алмаза в широком диапазоне температур и давлений. Отсюда и попытки осмысления новых данных, и попытки обобщения, и предложения новых генетических моделей образования алмаза на больших глубинах Земли. В этом ракурсе, конечно, весьма интересна и данная работа Спивак А.В. по «Генезису сверхглубинного алмаза с включениями по результатам экспериментальных работ», основанная на экспериментальных работах и исследованиях.

Цели и задачи вполне понятны. Главная цель – разобраться с химическим и фазовым составом материнских сред сверхглубинных алмазов и физико-химическими механизмами формирования первичных включений в парагенезисе с алмазами. Это самый сложный комплекс проблем, решений и гипотез. Здесь необходимо было разобраться как с физико-химическими

условиями плавления и эволюции ультрабазит-базитовых исходных оксид-силикатных пород нижней мантии, так и оксид-силикат-карбонатных алмазообразующих материнских расплавов.

Отсюда и **шесть задач**, которые и необходимо было решать в процессе выполнения данной работы.

1. Это изучение фазовых отношений при плавлении простых карбонатов Mg, Ca и Na, а также многокомпонентных карбонатитовых составов системы $\text{MgCO}_3 - \text{FeCO}_3 - \text{CaCO}_3 - \text{Na}_2\text{CO}_3$.
2. Изучение фазовых отношений при плавлении исходного оксид-силикатного вещества НМ с оценкой физико-химических механизмов его ультрабазит-базитовой эволюции.
3. Изучение фазовых отношений при плавлении оксид-силикат-карбонатитовой системы материнских сред алмазов и включений периклаз MgO – вюстит FeO – стишовит SiO_2 – бриджменит $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$ – Са-перовскит (CaSiO_3) – карбонатит $(\text{MgCO}_3 - \text{FeCO}_3 - \text{CaCO}_3 - \text{Na}_2\text{CO}_3)$ с оценкой физико-химических механизмов ее ультрабазит-базитовой эволюции.
4. Экспериментальное моделирование образования нижнемантийных сверхглубинных алмазов в парагенезисе с ультрабазитовыми и базитовыми минералами первичных включений.
5. Изучение роли ультрабазит-базитовой магматической эволюции оксид-силикатной нижней мантии, а также в очагах алмазообразующих расплавов.
6. И, наконец, разработка генетической классификации первичных включений в сверхглубинных алмазах нижней мантии и построение обобщенной диаграммы материнских сред сверхглубинных алмазов и первичных включений в них.

Впечатляет большой объем выполненных экспериментальных работ. При этом большинство из них оригинальные и пионерские, *in situ*, с комплексным применением соответствующих исследовательских методов (например, Раман-спектроскопии) при больших давлениях и температурах.

И в этой части Спивак Анна Валерьевна показала себя тонким исследователем, интерпретатором, заложив хорошую базу для последующих обобщений и выводов.

Сразу можно перейти к **оценке научной новизны работы**. Большая часть выполненных экспериментальных работ при сверхвысоких давлениях не имеет аналогов и проводилась впервые! И в автореферате и в работе все это детально расписано и вызывает только положительное восприятие. Главное, что **«на основе результатов физико-химического эксперимента и аналитической минералогии включений разработана модель алмазообразования в условиях переходной зоны и нижней мантии»**.

Логично просматривается и **практическая значимость**.

Но здесь есть замечание. В практической значимости много из того, что имеет отношение к научной новизне! Это легко видно. Например: «Разработана генетическая классификация первичных гетерогенных включений в глубинных алмазах». Слово в слово из научной новизны.

Или: Полученные результаты могут быть использованы при разработке методов поиска сверхглубинных алмазов и ксенолитов коренных пород переходной зоны и нижней мантии. Интересно спросить А.В. Спивак: а как она видит это использование?

Несомненно, необходимо отметить широкую апробацию работы на различных конференциях, семинарах. Большой список работ А.В. Спивак впечатляет. Несомненно, А.В. Спивак вполне сложившийся специалист высокого уровня.

Перейдем к анализу самой работы.

Глава I. Химический состав и минералогия переходной зоны и нижней мантии Земли: обзор аналитических и экспериментальных данных

Очень хорошая глава, профессионально выполнен обзор известных данных о минералогии переходной зоны мантии и нижней мантии. Очень четко и логично выстроена и очевидно, что это своя минералогия, во многом пока неизвестная, и видна важнейшая роль экспериментальных работ при анализе гипотез о составе и строении мантии. Что импонирует. Это то, что в конце всего этого полного анализа А.В. Спивак ставит задачи экспериментальных исследований в четкой последовательности. Она ясно понимает, что и в какой последовательности она должна делать, и как проводить экспериментальные работы.

Глава II. Методика экспериментальных исследований.

Эта Глава очень сильная. Особо подчеркнем, что многие методики поставлены впервые и многие эксперименты пионерские.

Выдвинуто **шесть защищаемых положений**. Тенденция увеличения количества защищаемых положений у диссертантов в последнее время несколько тревожит, скоро возможно подойдем до десяти! А недавно только было три – четыре защищаемых положений. Это небольшой общий комментарий.

В главах III, IV и V приведен фактический материал, на основе которого выдвинуты и обоснованы 4 защищаемых положения из шести.

Посмотрим внимательно и проанализируем каждое из выдвинутых положений.

Глава III. Экспериментальное изучение плавления карбонатов и стабильности карбонатных расплавов в PT-условиях ПЗ и НМ.

1-ое Положение. Простые карбонаты магнезит $MgCO_3$, арагонит $CaCO_3$ и Na_2CO_3 плавятся конгруэнтно при PT-условиях ПЗ и НМ с образованием однофазовых полей стабильных

карбонатных расплавов при РТ-условиях переходной зоны и верхней мантии (11-73 ГПа/1700-3000°С, 12-80 ГПа/1800-2600°С и 11-46 ГПа/2400-1700°С, соответственно). Высокотемпературные границы фазовых полей карбонатных расплавов CaCO_3 , MgCO_3 и Na_2CO_3 определяются двухступенчатыми реакциями разложения: карбонатный расплав = оксид + CO_2 и $\text{CO}_2 = \text{O}_2 + \text{C}$.

Материал данного положения описан в разделе 3.1

И здесь необходимо высказать общее замечание ко всем разделам. Речь идет о выборе интервалов давлений и температур для экспериментальных исследований. Где-то сразу указываются (пастулируются) эти интервалы, где-то ссылаются на данные изучения природных объектов («на основе оценок по минералогии сингенетических включений в них»). Выбор интервала должен быть четко обоснован.

Относительно приведенного материала в данном разделе можно уверенно заключить, что получены доказательства конгруэнтного плавления карбонатов кальция, магния и натрия при соответствующих РТ параметрах, а выделяющийся свободный CO_2 разлагается на кислород и алмаз. Это отражено в защищаемом положении.

2-ое Положение. На РТ-диаграмме многокомпонентной системы $\text{MgCO}_3\text{--FeCO}_3\text{--CaCO}_3\text{--Na}_2\text{CO}_3$, включающей главные карбонатные компоненты материнских магм сверхглубинных алмазов ПЗ и НМ, определены эвтектический солидус при 12-23 ГПа/900-1100 °С и ликвидус - при 12-23 ГПа /1300-1600 °С. При полном частичном плавлении ее равновесные отношения определяются фазами полностью смесимых расплавов и твердых растворов $(\text{Mg,Fe})\text{CO}_3$, $(\text{Mg,Ca,Na}_2\text{Fe})\text{CO}_3$ и $\text{Na}_2(\text{Ca,Mg,Fe})(\text{CO}_3)_2$. Температуры первичного плавления $\text{Mg} - \text{Fe} - \text{Ca} - \text{Na}$ – карбонатной системы на солидусе ниже геотермальных для ПЗ и НМ, что обеспечивает физико-химические условия генерации оксид-силикат-карбонатных материнских сред сверхглубинных алмазов при данных РТ-параметрах.

К защищаемому положению одно замечание. В работе в разделе 3.2., из которого и вытекает 2-е положение, речь идет об изучении фазовых отношений при плавлении многокомпонентных систем. «Данные эксперимента при высоких давлениях и температурах демонстрируют, что расплавы многокомпонентных карбонатов так же, 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». А какие это среды: оксид-карбонатные, или силикат-карбонатные, или оксид-силикат-карбонатные, здесь в этом разделе не обсуждается. Это в следующих главах, или разделах. Эта фраза в защищаемом положении должны быть сформулирована иначе. Кстати, в первых вариантах так и было, и это было более правильно сформулировано.

Теперь перейдем к рассмотрению Главы IV. Экспериментальное изучение фазовых отношений при плавлении нижнемантийной системы периклаз (MgO) – вюстит (FeO) – стишовит (SiO_2) – Са-перовскит (CaSiO_3) – карбонатит ($\text{MgCO}_3 - \text{FeCO}_3 - \text{CaCO}_3 - \text{Na}_2\text{CO}_3$).

Здесь также два раздела (как и в Главе I), и в каждом из них соответствующий материал для последующих двух защищаемых положений.

Конечно, очень интересен раздел 4.1., в котором приведенный материал и все обсуждения показали, что «стишовитовый парадокс» не только объясним экспериментально, но и предложен изящный выход из ситуации, при которой стишовит не может быть стабилен в равновесных условиях в нижней мантии. А вот в режиме фракционной кристаллизации расплавов он не только

существует, но и формируются ассоциации стишовита с фазами твердых растворов (PerWus_{ss}) в НЗ.

3-е положение вполне и убедительно защищено всем приведенным экспериментальным материалом и грамотными и профессиональными суждениями. Само защищаемое положение несколько тяжеловато, можно было бы его сформулировать более короче и изящнее. В предложенном варианте защищаемого положения больше видна попытка объяснения фазовых отношений и невозможности образования в магматических условиях парадоксальной ассоциации Mg-Fe-осидов и SiO_2 . А это не совсем защищаемое положение.

Перейдем к разделу 4.2., в котором обсуждаются результаты экспериментального изучения фазовых отношений при плавлении нижнемантийной системы периклаз (MgO) – вюстит (FeO) – стишовит (SiO_2) – Са-перовскит (CaSiO_3) при 26 ГПа. Очень сложная система! Но здесь нет еще карбонатной составляющей. Это дальше в разделе 4.4.

А в разделе 4.3 рассматривается материал изучения фазовых отношений при плавлении нижнемантийной системы периклаз (MgO) – вюстит (FeO) – стишовит (SiO_2) – карбонатит ($\text{MgCO}_3 - \text{FeCO}_3 - \text{CaCO}_3 - \text{Na}_2\text{CO}_3$) при 26 ГПа. Затем добавляется Са-перовскит (CaSiO_3). Это раздел 4.4.

Экспериментальный материал прекрасный, анализ тщательный и показывает лучшую сторону А.В. Спивак – умение интерпретировать и останавливаться на главном во всех этих экспериментах.

При этом нам кажется, что можно было бы из двух защищаемых положений 3 и 4 сформулировать одно. Ведь итоговые фразы и в 3-ем и в 4-ом практически одни и те же. Это формирование стишовита путем фракционной кристаллизации, а твердые растворы периклаз-вюстит можно отнести к «сквозным» ультрабазит-базитовым. Вот главное!, что убедительно и показала А.В. Спивак.

И здесь еще раз хочется отметить достоинство этой работы – возможность экспериментальных работ со сложными системами и грамотная интерпретация полученных результатов. Это сильная сторона А.В. Спивак и как экспериментатора и как интерпретатора. Материалы разделов 4.2 и 4.3 лежат в основе Защищаемого положения 4 и выше мы высказали мнение, что и третье и четвертое защищаемые положения можно объединить в одно.

Следующая Глава V. Экспериментальное изучение алмазообразующей эффективности простых и многокомпонентных карбонат-углеродных расплавов и расплавов гетерогенных оксид-силикат-карбонат-углеродных систем при 8.5 – 26 ГПа.

Напомним, что в Главе III были рассмотрены вопросы экспериментального изучения плавления карбонатов и стабильности карбонатных расплавов в РТ-условиях ПЗ и НМ. И там было показано, что при разложении карбонатных расплавов возможно образование алмаза за счет углерода карбоната.

В данном разделе ситуация описана более сложная. Здесь добавлена углеродная система и рассмотрены возможные условия нуклеации алмаза в данной сложной системе с возникновением барьера на пути нуклеации со стороны силикатной составляющей при ее увеличении в системе. При этом, несмотря на три раздела, А.В. Спивак выдвинула одно защищаемое положение, а не два или три, как в предыдущих главах III и IV. И это совершенно правильно.

Что же в этой главе обсуждается. Раздел 5.1. Простые и многокомпонентные карбонат-углеродные системы. Прежде всего, в результате проведенных экспериментов установлена высокая алмазообразующая эффективность простых карбонатных систем при

высоких *PT*-условиях (18-25 ГПа и температурах до 2200°C). Кристаллизация «сверхглубинного» алмаза НМ осуществлена в Mg-Fe-Ca-Na-карбонатных расплавах-растворах углерода систем $\text{MgCO}_3\text{-FeCO}_3\text{-Na}_2\text{CO}_3\text{-C}$ и $\text{MgCO}_3\text{-FeCO}_3\text{-CaCO}_3\text{-Na}_2\text{CO}_3\text{-C}$ при 24-26 ГПа, когда многокомпонентная системы находились в состоянии полного плавления. В этих условиях происходила интенсивная спонтанная нуклеация алмаза, который был изучен всеми возможными методами несмотря на малые размеры до 10 мкм.

Затем система была усложнена. В разделе 5.2. рассмотрены оксид-силикат-карбонат-углеродные системы, а в разделе 5.3. уже проблемы концентрационного барьера нуклеации нижнемантийных алмазов. Силикатные компоненты могут значительно повлиять (замедлять) процессы нуклеации при их увеличении в расплаве. Концентрационный барьер нуклеации алмаза (КБНА) является важной характеристикой алмазообразующей эффективности карбонат-силикатных материнских сред алмаза. А.В. Спивак достаточно детально и подробно рассмотрела все варианты нуклеации этих сложных систем. Подробно проанализировала схему ликвидуса системы $(\text{MgO})_x(\text{FeO})_y(\text{SiO}_2)_z\text{-Carb}^*\text{-D}$, иллюстрирующая алмазообразующую эффективность нижнемантийной карбонат-оксид-силикат-углеродной системы. И показала, что при достижении в расплавах нижнемантийной системы концентрации силикатных компонентов около 65 масс. % концентрация пересыщения растворенного углерода в расплаве переходит из лабильного в метастабильное состояния. Это означает потерю системой способности к спонтанной нуклеации алмаза с уменьшением степени пересыщения. Таким образом, нуклеация алмазной фазы осуществлена для содержаний силикатной составляющей в материнских расплавах до 65 масс. % в системе $(\text{MgO})(\text{FeO})(\text{SiO}_2)\text{-Carb-C}$ при 26 ГПа и 1700°C. Четко и ясно.

5-ое защищаемое положение вполне принимается.

И, наконец, последняя VI Глава. **Генетическая классификация первичных гетерогенных включений в глубинных алмазах, модель алмазообразования в условиях ПЗ и НМ.** Эта глава заключительная и в ней предпринята попытка на основе данных по физико-химическому экспериментальному изучению алмазообразующих нижнемантийных систем и минералогических данных в отношении первичных включений в алмазах ПЗ и НМ дать некую обобщенную диаграмму состава многокомпонентной материнской среды для алмаза. **В нашем понимании это не генетическая классификация первичных гетерогенных включений в глубинных алмазах, а схематическая характеристика физико-химических условий сингенезиса сверхглубинных алмазов и первичных включений в рамках материнских оксид-силикат-карбонатных магм с переменным содержанием ультрабазитовых и базитовых компонентов.**

Тем не менее, эта Глава дает основу для теоретической интерпретации тех экспериментальных исследований, которые на высоком уровне провела Анна Валерьевна.

По ее мнению:

1. Многокомпонентная материнская среда может быть определена как изменчивый полностью смесимый оксид-силикат-карбонатный расплав с растворенным углеродом.

2. Как и в случае образования алмаза в условиях верхней мантии (Litvin et al., 2012), все минеральные фазы, включенные в нижнемантийные алмазы, могут быть генетически классифицированы как основные и примесные (растворимые и нерастворимые в алмазообразующих расплавах).

3. Экспериментальные исследования позволяют считать что кальций, магний, железо и натрий – карбонаты, твердые растворы периклаза и вюстита, бриджменит и Са-перовскит, стишовит, углерод являются компонентами сложной материнской среды алмазообразования.

Разработана и предложена обобщенная диаграмма состава многокомпонентной материнской среды для алмаза и гетерогенного вещества сингенетичных включений в условиях нижней мантии Земли. Конечно, это некая модель (схема), но те процессы, которые заложены в этой схеме, вполне реалистичны для нижнемантийных глубин до 700 км, с которых и была транспортировка основной части сверхглубинных алмазов.

Проблема очень сложная, и мы только на пути к истинной реальной цели познания реальных процессов эволюции Земли. Но мы в пути.

Обобщая все вышесказанное, можно уверенно сказать, что новая, современная докторская диссертация. Это новое достижение экспериментальной минералогии и петрологии мантии Земли. Прекрасный литературный язык, логика, стиль – все это также показывает А.В. Спивак с самой лучшей стороны.

В соответствии со всеми требованиями ВАК,а, «Положением ВАК России» о докторских диссертациях, несомненно данная работа Спивак Анны Валерьевны «Генезис сверхглубинного алмаза и первичных включений в веществе нижней мантии Земли (экспериментальные исследования)» полностью является законченным трудом, истинно докторской диссертацией. А Анна Валерьевна Спивак достойна присуждения ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 25.00.05 – минералогия, кристаллография.

Академик РАЕН, профессор,
Доктор геолого-минералогических наук,
Ведущий научный сотрудник,
Лауреат Премии Правительства России в области науки и техники и
Премии им.А.Е. Ферсмана РАН

В.К. Гаранин

Отзыв ведущей организации утвержден на Ученом Совете Минмузея
протокол № 1 « 15 » января 2016 г.

Ученый секретарь Совета,
кандидат геол.-мин. наук
Е.Н. Матвиенко

Подписи заверяю, зам. Директора по научно работе, кандидат геол-мин.наук

А.А. Агаханов

16.02.2016г.