

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Антона Фарисовича Шацкого «Условия образования карбонатов и механизм миграции карбонатных расплавов в мантии Земли», представленную на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 25.00.05 – минералогия, кристаллография.

Работа актуальна и выполнена на большом экспериментальном материале с привлечением огромного фактического и литературного материала по составу включений в алмазе из кимберлитов и алмазосодержащих метаморфических пород. И прежде всего, хочется подчеркнуть, что в основе работы лежит огромный экспериментально полученный материал, который позволил автору данной работы сформулировать ряд важнейших защищаемых положений.

Прежде всего, необходимо отметить, что автором работы А.Ф. Шацким был выполнен глубокий анализ тех современных литературных и оригинальных данных, которые указывают на то, что карбонаты являются важнейшими минералами-концентраторами углерода в окисленных мантийных областях, что карбонаты устойчивы вплоть до Р-Т параметров нижней мантии. Также отмечено, что имеется тесная генетическая связь мантийных карбонатных расплавов с глубинным кимберлитовым магматизмом.

При этом А.Ф. Шацкий обратил внимание на то, что вопросы состава кристаллических карбонатных фаз, участвующих в реакциях плавления в мантии, во многом открыты и не до конца разработаны, также не до конца исследованы Т-Х диаграммы состояния бинарных и тройных карбонатных систем при высоких давлениях. Кроме того, на сегодня открыты и вопросы сегрегации карбонатных расплавов в мантии, вопросы механизма, движущих силах и скорости сегрегации этих расплавов в мантии, да и вообще вопросы разработки механизмов и моделей миграции карбонатных расплавов в мантии. Все эти достаточно сложные вопросы А.Ф. Шацким обстоятельно и детально рассмотрены в первых двух главах. При этом в Главе 1 рассмотрены состав и структура карбонатных минералов, способных контролировать температуры солидуса мантийных пород, их устойчивость при высоких Р-Т параметров, и показано, что эти карбонатные минералы еще недостаточно изучены с точки зрения их устойчивости при параметрах мантии, особенно в более сложных щелочно-щелочноземельных карбонатных системах. **Здесь есть небольшое замечание: хотелось бы в обзоре хотя бы кратко рассмотреть и другие подходы к кристаллизации алмаза в промежуточной и нижней мантии. Ведь у Ю.Н. Пальянова, например, да и других исследователей рассматриваются возможности кристаллизации алмаза из восстановленных железо-карбонатных и других систем.** А в Главе 2 проведен анализ моделей миграции насыщенного раствора в кристаллической породе, моделей деформации породы в присутствии межзернового раствора. Все эти вопросы напрямую связаны с процессами консолидации карбонатных расплавов, их движения, вопросами деформации пород при движении, вопросами диффузии силикатных компонент в карбонатном и водокarbonатном расплаве при мантийных Р-Т параметрах.

При этом хочется обратить особое внимание на то, что материалы в первых двух Главах не только детально рассмотрены, но и во многом дали возможность диссертанту сформулировать цели и задачи данной капитальной работы.

Цели поставлены четко и грамотно: выявить возможные ассоциации карбонатных фаз, контролирующих начало плавления, определить составы карбонатных расплавов и механизмы их миграции в мантии.

Обширен круг задач, большинство из которых необходимо было решать экспериментально. Это экспериментальное исследование фазовых взаимоотношений с построением Т-Х диаграмм состояния бинарных карбонатных систем (их повторять здесь не будем, в работе они указаны) при давлении 6 ГПа. Также экспериментальное определение фазовых взаимоотношений в псевдобинарных системах с построением Т-Х диаграммы состояния тройных карбонатных систем при давлении 6 ГПа. Интересна задача разработки серии экспериментов и методических подходов для моделирования миграции карбонатного расплава и определения коэффициентов диффузии силикатных компонентов в карбонатном расплаве при давлении до 24 ГПа и температуре до 1700⁰С. И, наконец, рассмотреть диффузию силикатных компонентов в карбонатных расплавах при параметрах переходной зоны и нижней мантии. Все это исключительно важные вопросы, связанные с генетическими вопросами кристаллизации алмаза в разных зонах мантии от верхней до нижней.

Эксперименты проведены на высоком методическом уровне. Это отличало всегда школу новосибирских экспериментаторов. Значителен круг примененной исследовательской лабораторной базы. Все, и это следует особо подчеркнуть, на высоком уровне и методическом и исследовательском.

Впечатляет объем представленной работы – 359 стр., включая список литературы из 590 наименований. Это не только материал проведенной исследовательской работы, но и пример работы с литературными источниками. Работа состоит из введения, шести глав и заключения.

Серьезное отношение к работе позволило А.Ф. Шацкому выдвинуть **четыре** глубоких по смыслу защищаемых положения.

Автором подчеркнуто, и мы это признаем, что научная новизна по существу не имеет аналогов в научной литературе. В практическом плане значимость работы основана на доказанной автором огромной роли карбонатных систем (расплавов) в мантийных процессах, приводящих к кристаллизации алмазов и к образованию протокимберлитовых расплавов.

И теперь по существу работы и сути защищаемых положений. Хотя при этом замечу, что и некоторые новые методические разработки в технологии эксперимента, в экспериментальной базе, тоже могли бы дать основу для еще одного защищаемого положения.

Глава 4 – основа первых двух защищаемых положений.

В первом защищаемом положении выдвигается тезис о том, что двойные системы (они в положении все перечислены и их 6) при 6 ГПа и 900-1300⁰С характеризуются наличием промежуточных соединений (двойных карбонатов). Их число возрастает с уменьшением температуры, увеличением давления (от 0.1 до 6 ГПа), а также при смене катионного состава от Fe и Mg к Са. Двойные карбонаты являются потенциальными концентраторами К, Na, Са в мантии на глубинах 180-210 км при температурах не превышающих 1200-1300⁰С.

При внимательном анализе материала к этому положению (да и к другим) хочется отметить тщательность анализа продуктов эксперимента и фазовых Т-Х диаграмм для всех бинарных систем. Самое главное, что во всех этих экспериментах на бинарных системах обнаруживаются промежуточные соединения (двойные карбонаты) при достаточно высоких Р-Т параметрах, что может косвенно свидетельствовать о сложности составов карбонатных соединений в мантийных условиях. Очень умело и смело А. Шацкий пользуется рамановской спектроскопией для анализа синтезированных минералов. Установление эвтектик в разных бинарных системах при их плавлении предполагает наличие промежуточных соединений, а это в свою очередь предполагает обнаружение этих соединений в природных образцах, например, во включениях карбонатов в алмазе.

В качестве небольших замечаний можно высказать следующее: почему очерчен параметр 6 ГПа, а не 5 или 7, 10, чем это обосновано. И второе, откуда взят в защищаемом

положении диапазон давления от 0.1 до 6 ГПа, хотя в самой работе и в первой строчке первого положения строго указана цифра при 6 ГПа.

А в остальном первое защищаемое положение весьма убедительно доказано и принимается.

Теперь перейдем к анализу более сложных тройных систем, рассмотрение которых в том числе и экспериментальной плоскости дало возможность А. Шацкому сформулировать второе защищаемое положение: в тройных системах карбонатов Ca, Mg, Ca и Na, Mg, Ca при 6 ГПа частичной плавление происходит при температурах на 100 и 200⁰С ниже континентальной геотермы. В К-содержащей системе плавление субсолидусной ассоциации магнезит + арагонит + $K_2Ca_{0.1}Mg_{0.9}(CO_3)_2$ реализуется при 1000⁰С и сопровождается образованием К-Са-доломитового расплава. В Na-содержащей системе плавление субсолидусной ассоциации магнезит + $Na_2(Ca_{0.9}Mg_{0.1}(CO_3)_2 + Na_2Ca_{0.1}Mg_{0.9}(CO_3)_2$ реализуется при 1050⁰С и сопровождается образованием Na-Са-доломитового расплава. Закономерности определяют частичное плавление мантийного вещества и образование высоко-щелочных карбонатных расплавов в основании кратонов на глубинах 180-210 км.

Здесь можно сказать следующее. Весь большой экспериментальный материал в Главе 4 по сложным тройным системам полностью убедительно свидетельствует о данных плавления и полученных данных о карбонатных расплавах, но говоря о частичном плавлении мантийного вещества с образованием высоко-щелочных карбонатных расплавов в основании кратонов на глубинах 180-210 км надо было в конце Главы 4 уделить этому большее внимание. **Это вывод, и должна быть приведена кратко доказательная база этому. Что за мантийное вещество, почему с образованием именно высоко-щелочных карбонатных расплавов, а не силикатно-карбонатных и именно на этих глубинах. А если глубины порядка 300 км или 150 км, там что? Обращаю внимание А. Шацкого на то, что все безупречные выводы к Главе 4 касаются экспериментальных результатов, а перехода от них к рассуждениям о приложении этих результатов к тому, что в мантии может быть реализовано нет. А в защищаемом положении четко обозначен этот переход в заключительной строке. Эта заключительная фраза не меняет сути положения, которое доказано всем большим экспериментальным материалом. Оно в главном доказано.**

Перейдем к следующему положению. Оно достаточно длинное и нет смысла его приводить полностью в данном отзыве. Речь идет о том, что экспериментально А. Шацкий показал и доказал, что коэффициенты диффузии силикатных компонент при параметрах переходной зоны и верхней части нижней мантии через карбонатные системы (расплавы) на несколько порядков превышают эти параметры диффузии в породообразующих мантийных минералах и это повышает скорость подъема восходящих мантийных потоков. Это очень важный аспект понимания процесса образования и подъема протокимберлитовых расплавов.

Что здесь важно отметить, что А. Шацкий где-то даже впервые провел серию оригинальных экспериментов по установлению скоростей массопереноса силикатных компонент через расплавы КМС и КМСН при высоких Р-Т параметрах. При этом очень важно, что были определены принципы определения коэффициента диффузии растворенных веществ в расплавах и флюидах при высоком давлении, отработана методика анализа экспериментальных образцов, выбор модельных систем, были выполнены эксперименты по измерению скорости массопереноса силикатных компонентов в карбонатном расплаве и т.д. И все это дало возможность рассчитать коэффициенты диффузии силикатных систем в карбонатных системах. Еще хочу обратить внимание еще на один очень важный вывод: «Пластическое течение пород в присутствие расплава контролируется диффузией через карбонатный расплав...». Здесь соединяется проблема катаклаза мантийных пород и образование, накапливание, миграция карбонатного расплава через мантийные породы. Важное защищаемое положение, корректное, имеющее большое значение для понимания сложных процессов, идущих в мантии под влиянием плюмов.

И, наконец, последнее четвертое защищаемое положение. Все эксперименты были выполнены А.Ф. Шацким в приложении к мантии. Там, по сути, идут те сложные процессы,

которые приводит к кристаллизации алмаза, алмазоносных пород, к изменению, замещению, образованию целого ряда сложных ассоциаций уже следующего этапа, но еще мантийного, здесь же начинаются сложнейшие процессы образования и эволюции протокимберлитовых расплавов, которые двигаются вверх под влиянием флюидов, газовых эмонаций и т.д. В чем сложность раскрытия генезиса и процессов, в том, что мы это не видим. Это все там, в глубине мантии, и мы где-то должны предлагать и выстраивать гипотезы, и во многом, под влиянием экспериментальных данных. Здесь в чем-то наша ущербность.

Но, тем не менее, мы обязаны в обобщении высказать свою точку зрения на те процессы, которые происходят там в мантии, и А.Ф. Шацкий делает это также профессионально, как и в рассмотрении и анализе материала в первых пяти главах.

Рассмотрим материал к последнему (четвертому) положению. Я здесь приведу самую главную фразу этого большого положения: На глубинах свыше 150 км миграция включений карбонатного расплава реализуется путем растворения силиката на фронте движения, диффузии растворенного силиката через расплав и его кристаллизации. Очень емко и очень точно. Материалом для этого последнего защищаемого положения являются и по существу литературные и оригинальные экспериментальные данные всех пяти глав. Вот их анализ и дает основание А.Ф. Шацкому для глубоко анализа **происхождения мантийных карбонатных расплавов**, что он и делает с успехом в заключительной Главе 6.

Сразу обращаю внимание **на наше замечание ко второму, оно касается, по существу, и первого положения, а именно, заключительных фраз, относящихся к теоретическим, генетическим, вопросам происхождения карбонатных расплавов на основе выполненных экспериментальных данных. Их доказательная база приведена здесь в Главе 6. Нарушена, по нашему мнению, логика, т.к. для части положения (заключительная фраза), например, второго, надо обратиться к заключительной главе и там искать материалы.** Здесь могут быть два варианта: или эти рассуждения перенести в соответствующие разделы главы 4, или наоборот эти фразы свести воедино в последнем положении, тогда бы была выстроена логика изложения материала. Но это наше мнение и оно исходит из наших ощущений. Но мы не работали над этим большим материалом, мы как бы смотрим на этот процесс со стороны, и это не значит, что нам видится лучше, чем автору работы. Тем не менее, нам кажется, так было бы логичнее.

Теперь по существу. Глава сильная и материал, представленный в Главе интересный, большой, насыщенный. В ней рассмотрено большое разнообразие теоретических вопросов касательно карбонатизированных мантийных пород. Мы не видим здесь существенных ошибок, как и во всей работе в целом. И, кроме того, мы видим тщательный анализ и логику рассуждений. Совершенно справедливо и верно замечено, что состав карбонатов зависит от конкретного типа породы: перидотитовой, эклогитовой или метапелитовой. И далее по порядку А. Шацкий рассматривает плавление в разных карбонатизированных системах по порядку. Так плавление в системе эклогит- CO_2 в присутствии натрия контролируется натрием. Понижение температур солидуса карбонатизированного эклогита коррелирует с увеличением $\text{Na}_2\text{O} / (\text{Na}_2\text{O} + \text{CO}_2)$. Если рассматривается плавление в системе лерцолит- CO_2 в присутствии натрия, то отмечается и обращается внимание на то, что солидус Na-содержащего карбонатизированного лерцолита на 100°C ниже температуры образования соответствующего расплава в системе $(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Fe}) \text{CO}_3$. При этом в расплавах решающая роль принадлежит магнезиту. Превосходно даны анализы температурных трендов изменения состава расплавов при частичном плавлении Na-содержащего карбонатизированного эклогита и лерцолита. Они не только разные, но и закономерно разные. При частичном плавлении Na-содержащего карбонатизированного эклогита состав частичного расплава меняется от Na-Ca-доломитового при 1050°C до Ca-доломитового при 1400°C .

При частичном плавлении Na-содержащего карбонатизированного перидотита состав частичного расплава меняется от Na-Ca-доломитового при 1200°C до Mg-доломитового при 1400°C (см. рис. 14 автореферата). Подробно рассмотрены вопросы плавления системы

лерцолит- CO_2 в присутствии калия, а также плавления карбонатизированного пелита в присутствии калия.

Показано, что состав субсолидусного расплава в перидотитовой и пелитовой системах определяется ее карбонатной составляющей, моделируемой системой $\text{K}_2\text{CO}_3\text{-CaCO}_3\text{-MgCO}_3$ при существенной роли магнезита.

Логично после рассмотрения материалов по частичному плавлению перидотитовых и эклогитовых систем в присутствии калия и натрия автор переходит к рассмотрению вопросов механизма и скорости миграции карбонатных расплавов в мантии, моделей инфильтрации натрокарбонатного расплава в мантийную породу, что напрямую увязано с масштабом магматических камер. Исключительно важен вопрос миграции расплава в поле температурного градиента и в поле механических напряжений. Эти вопросы увязаны и реализованы в предлагаемый механизм растворения-переосаждения карбонатных расплавов, который объясняет сегрегацию мантийных расплавов на ранней стадии на глубинах более 150 км. Конечно, здесь важен вопрос и пластической деформации пород и вопросы механизма пластического движения в породах. И все это Антон Шацкий рассматривает комплексно, понимая, что любой мантийный процесс – это сложный комплексный механизм, который может не только привести к сегрегации мантийных магм с глубины 150 км, но и к их движению к поверхности Земли. И речь здесь идет в первую очередь о кимберлитовых расплавах. Прекрасная содержательная Глава с убедительным защищаемым положением.

Оценивая диссертационную работу в целом, можно сказать следующее. Работа в полной мере отвечает всем требованиям ВАК, а, предъявляемым к научным диссертациям на звание доктора геолого-минералогических наук по специальности 25.00.05 – минералогия, кристаллография. Ее отличает оригинальность подхода к решению поставленных задач, новаторство в области экспериментальных исследований, широкий диапазон научных результатов, научная новизна и практический выход. Автореферат полностью соответствует материалу диссертационной работы. Данная диссертация – это работа высокого минералогического и экспериментального уровня. Это существенный шаг вперед на пути познания глубинных процессов мантии, генезиса алмаза и генезиса кимберлитовых расплавов.

Несомненно, Антон Фарисович Шацкий достоин присуждения искомой степени доктора геолого-минералогических наук и на сегодня – это один из лучших молодых специалистов в России, способных решать крупные научные задачи в области экспериментальной минералогии.

Доктор геолого-минералогических наук, профессор,
Лауреат Премии Правительства России в области науки и техники,
Лауреат Премии им. Академика А.Е. Ферсмана РАН

Виктор Константинович Гаранин



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ МУЗЕЙ им. А.Е.ФЕРСМАНА
Российской академии наук
Директор

Ленинский пр-т, дом 18, корпус 2, Москва, 119071
Телефон (495) 952-00-67; факс (495) 952-48-50. E-mail: vgaranin@mail.ru

10.10.2014

Подпись В.К. Гаранина
Генеральный директор
Музея им. А.Е. Ферсмана РАН



Васильченко О.В.