



ФАНО России

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт экспериментальной минералогии Российской академии наук
(ИЭМ РАН)

Академика Осипьяна ул., 4, Черноголовка г, Ногинский р-н, Московская обл., 142432

Телефон/факс: 8(49652)49-687

<http://www.iem.ac.ru>

ОКПО 02699808, ОГРН 1035006109984

ИНН/КПП 5031007090/503101001

№ 18105-3414/2014

от 10 ноября 2014 г



Член-корреспондент РАН

Шаповалов Ю.Б.

**Официальный отзыв ведущей организации
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института
экспериментальной минералогии Российской академии наук
(ИЭМ РАН)**

**на диссертационную работу Шацкого Антона Фарисовича
«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».**

Диссертационная работа А.Ф. Шацкого посвящена одной из наиболее острых проблем современной петрологии – поведению карбонатных компонентов при мантийном магмообразовании и метасоматозе. Многочисленные петрологические и геохимические данные, подкрепленные экспериментальными исследованиями с конца 1970-х годов, показывают, что карбонат содержащие перидотиты и эклогиты верхней мантии, а возможно, и более глубоких ее областей могут быть источниками широкого спектра магм, включая нефелинитовые, мелилититовые и кимберлитовые составы. Эти магмы тесно связаны с карбонатными и карбонатитовыми расплавами, формирующихся вблизи солидусов карбонат содержащих перидотитов и эклогитов. Однако фазовые соотношения карбонатов в условиях мантии Земли изучены явно недостаточно. Это касается как «обычных» карбонатов Ca, Mg, Fe, так и щелочных карбонатов. Карбонаты являются ведущим источником углерода для алмазов, а их расплавы играют принципиальную роль в росте алмазов. Карбонаты служат источником CO₂ для глубоких флюидов, мигрирующих из мантии в кору, что зафиксировано минеральными ассоциациями ниже коровых метаморфических пород. Поэтому актуальность проблемы стабильности и фазовых соотношений карбонатов в условиях мантии не вызывает никакого сомнения. Эта тематика находится на передовых рубежах мантийной петрологии и геохимии.

о находках карбонатов в мантийных перидотитах и эклогитах. Задача второго раздела работы - экспериментальное исследование механизмов миграции и сегрегации карбонатных расплавов в глубокой мантии, включая исследования диффузии компонентов в этих расплавах. Результаты исследований по этим разделам основаны на огромном экспериментальном материале, полученном автором в течение 8 лет работы, с использованием оригинальных методик и детальных аналитических исследованиях. Особо необходимо отметить, что в процессе работы автором разработаны новые ячейки высокого давления и созданы специальные методы проведения экспериментов при высоких давлениях.

Основными научными достижениями диссертационной работы А.Ф. Шацкого, часть из которых составляет защищаемые положения, являются следующие исследования, результаты и выводы:

- (1) Экспериментально исследованы фазовые взаимоотношения и построены Т-Х диаграммы состояния для бинарных и тройных карбонатных систем, включающих K_2CO_3 , $CaCO_3$, Na_2CO_3 , $MgCO_3$, $FeCO_3$ при мантийном давлении (6 ГПа). Если по некоторым из этих бинарных систем имелись экспериментальные данные (главным образом, для низких давлений), то часть этих систем изучены впервые в данной диссертации.
- (2) Получены новые данные о влиянии давления и катионного состава на стехиометрию и структуру простых и бинарных карбонатных соединений, получены рамановские спектры некоторых новых карбонатных соединений.
- (3) Однозначно было подтверждено, что двойные карбонаты являются потенциальными концентраторами щелочей и углерода в мантии на глубинах 180-210 км при температурах до 1200-1300°C, а также способны образовывать щелочные карбонатные расплавы при температурах на 100-200°C ниже континентальной геотермы.
- (4) Впервые определены коэффициенты диффузии силикатных компонентов в карбонатных расплавах при параметрах переходной зоны и верхов нижней мантии.
- (5) Механизм растворения-осаждения обоснован как главный механизм миграции и сегрегации карбонатных расплавов в мантии и рассчитаны вероятные скорости такой миграции.

Все эти результаты представляют несомненный интерес для исследователей в областях не только мантийной петрологии и минералогии, но и кристаллохимии и кристаллографии, физической химии, материаловедения.

Диссертация А.Ф. Шацкого состоит из Введения, 6 глав, Заключение, а также включает список литературы (590 наименования), 143 иллюстрации и 42 таблицы. Общий объем диссертации составляет 359 страниц. Текст диссертации содержит подробный анализ литературных данных, обоснование задач исследований и выбора экспериментальных систем. В работе приводятся сведения об использованных экспериментальных и аналитических методах. Все фотографии, диаграммы и таблицы наглядно иллюстрируют полученные результаты, а список литературы полно отражает эрудицию автора.

Во Введении автор традиционно для диссертаций на соискание степени доктора наук освещает актуальность работы, ее цель и задачи, фактический материал и методы исследования, использованный в работе, характеризуется практическая значимость работы, ее апробация и личный вклад автора. На наш взгляд **цель работы сформулирована неудачно**: “Выявить возможные ассоциации карбонатных фаз, контролирующих начало плавления, определить составы субсолидусных карбонатных расплавов и механизм их миграции в мантии”. Если подходить к такой формулировке формально, то она не имеет физико-химического смысла, так как субсолидус – это Т-Х область, где отсутствует расплав. На наш взгляд правильная формулировка могла бы быть, например, такой: “Выявить возможные ассоциации карбонатных фаз, контролирующих начало плавления, определить составы карбонатных расплавов при параметрах субсолидуса силикатных мантийных пород и механизм миграции карбонатных расплавов в мантии”.

Во Введении автор формулирует 4 защищаемых положения. В целом они полностью отражают суть работы. Однако у нас возникли следующие **замечания к защищаемым положениям**.

(1) На наш взгляд, утверждение в первом защищаемом положении о том, что «двойные карбонаты являются потенциальными концентраторами К, Na и С» необходимо дополнить не только интервалами температуры и глубины, но и тем, что это возможно в условиях низких активностей воды. Особенно это относится к калию, поскольку в присутствии H_2O калий будет куда охотнее входить во флогопит. Это подтверждается многочисленными экспериментами по плавлению калийсодержащих карбонатизированных перидотитов (Wendlandt, Egglar, 1980; Thibault et al., 1992; Ulmer, Sweeney, 2002; Enggist et al., 2011).

(1) Во втором защищаемом положении совершенно не понятно, о каких закономерностях идет речь. На наш взгляд характеристика расплавов как «К-Са-доломитового» или «Na-Са-доломитового» не корректна. Эти названия встречаются повсеместно в работе. Необходимо было бы либо просто привести составы расплавов (что более корректно), либо назвать расплавы как «калий содержащий доломитовый» или «натрий содержащий доломитовый».

(2) В защищаемых положениях работы не нашли свое место новые аппаратурно-методические достижения автора. Мы считаем, что наряду с научными результатами, методические разработки составляют важнейшую часть проведенной А.Ф. Шацким работы и их следовало бы оформить в виде отдельного защищаемого положения или хотя бы отдельного положения о новизне исследований.

В Главе 1 диссертации приводится обзор литературных данных о находках кристаллических карбонатных фаз в породах мантии, включений карбонатных расплавов и флюидов в алмазах, петрологии кимберлитов и другие сведения. На основе обзора этих данных А.Ф. Шацкий приходит к выводу об определяющей роли карбонатных компонентов в процессах мантийного магмообразования. Кроме того, в этой главе приводится обстоятельный обзор экспериментальных данных по пределам стабильности различных карбонатов и по изучению бинарных и более сложных карбонатных систем. К обзору природных и экспериментальных данных, представленному в главе 1, у нас возникли следующие замечания.

(1) На наш взгляд обзор природных данных о находках и присутствии карбонатных фаз в мантийных парагенезисах очень скуп. В целом автор ограничивается перечислением ссылок на некоторые работы, без *необходимого аналитического* обзора. Он не рассматривает ассоциации, в которых были выявлены карбонаты, не проясняет в каких парагенезисах – эклогитовом и перидотитовом - выявлены те или иные карбонатные фазы, не указывает, что же предполагается по поводу происхождения карбонатов в этих ассоциациях. Приводя данные о карбонатных фазах в породах метаморфических комплексов высокого давления, автор никак не связывает их с мантийными процессами, и данный небольшой раздел на стр. 15 «повисает в воздухе». Вскользь указывая о находках карбонатных фаз в алмазах «сверхглубинного» происхождения автор избегает упоминания об их ассоциациях. Можно было бы дать хотя бы таблицу, где указать, где и в каких ассоциациях найдены карбонаты. Автор не упоминает о находках включений кристаллических карбонатов в других минералах кимберлитов, не только в алмазах (McGetchin, Besancon, 1973; Hervig, Smith, 1981; Berg, 1986; Smith, 1987), о находках включений закаленных карбонатных расплавов в ультраосновных и эклогитовых нодулях (van Achterbergh et al., 2004; Kogarko et al., 1995; Ionov et al., 1996; Pyle, Haggerty, 1994), о карбонатах в метасоматизированных эклогитовых ксенолитах (Misra et al., 2004; Shatsky et al., 2008). Тем самым автор упускает анализ разнообразия проявлений карбонатов в ассоциациях мантийных пород. В главе не обсуждаются свидетельства о наличие щелочных кристаллических карбонатов в мантии. Говоря о находках «продуктов раскристаллизации щелочного карбонатитового расплава», включенные в минералы кимберлитов, автор почему-то избегает упоминания в кимберлитах каких провинций и трубок такие находки известны (упоминается лишь трубка Удачная).

(2) В литературном обзоре в разделе 1.2.1 не рассмотрены некоторые новые работы, например: Персиков Э.С., Бухтияров П.Г. (2013). Особенности механизмов плавления карбонатов при высоких давлениях флюида системы С–О–Н–Ar. Экспериментальная геохимия, Т. 1, № 2. стр. 73-75. (http://exp-geochem.ru/JPdf/02_2013/RUS/21_02_2013_Rus.pdf) в которых существенно откорректированы данные работы (Huang, Wyllie, 1976) и (Irving,

Wyllie, 1975) (представлены на рисунках 1.2.2 и 1.2.8 диссертации) по плавлению кальцита и доломита при давлении 0.1 ГПа.

(3) В обзоре экспериментальных данных не затрагиваются данные о влиянии других летучих, особенно воды, на фазовые равновесия в карбонатных системах. Это было бы полезно, поскольку далее автор приводит результаты изучения водосодержащих карбонатных систем. Здесь также было бы уместно также упомянуть о влиянии таких компонентов как F и Cl (Jago, Gittins, 1991; Mitchell, Kjarsgaard, 2008).

В **Главе 2** анализируются модели миграции растворов и расплавов в кристаллических матрицах и модели деформаций породы в присутствии межзерновых растворов (расплавов). Автор приходит к важному для дальнейших рассуждений выводу о том, что миграция расплавов и насыщенных силикатными компонентами растворов в силикатных породах при высоких давлениях происходит согласно механизму растворения-переотложения и контролируется скоростями диффузии силикатных компонентов в межзерновом расплаве (растворе). *В качестве комментария и замечания к этой главе укажем следующее.* На стр. 48 автор оправданно отмечает, что модели, предлагаемые для механизмов миграции расплавов в мантии, основаны на экспериментах при относительно низких давлениях, и их результаты трудно экстраполировать на высокие давления из-за различий физико-химических свойств расплавов. Особенно это касается карбонатных расплавов, поскольку их свойства, а точнее их взаимоотношения с силикатным материалом, сильно зависят от давления. Это касается таких свойств, как растворимость силикатных компонентов в карбонатных расплавах, возможность декарбонатизации (особенно в эцлогитовых системах; напр. Knoche, 1999), возможность жидкостной несмесимости (особенно в богатых щелочам системах). Автор диссертации достаточно подробно разбирает результаты экспериментов Т. Хаммуды и Д. Лапорте (Hammouda, Laporte, 2000) при 1 ГПа, но почему-то совсем не упоминает эксперименты В. Минарика (Minarik, 1998) при 1.5 ГПа, который указал на важную роль жидкостной несмесимости в миграции расплавов в карбонатно-силикатных системах. Более того, на стр. 242 автор указывает, что и в его экспериментах даже при 16.5 ГПа эффекты жидкостной несмесимости между щелочной карбонатной и силикатной жидкостями наблюдались и упоминает, что такие эффекты возможны и при 7 ГПа.

Глава 3 диссертации посвящена детальному описанию методов экспериментов и технических особенностей многопуансонного оборудования высокого давления, использованного в работе. В целом глава написана четко и аргументированно. Здесь укажем главные достижения автора в разработке новых ячеек высокого давления и новых методик проведения экспериментов при сверхвысоких давлениях.

(1) Разработаны новые методики проведения экспериментов в большом объеме при давлениях до 24 ГПа и опытов по фазовым отношениям в карбонатных системах при высоких давлениях с использованием конфигурации, позволяющей одновременную загрузку до 42 капсул с исследуемым веществом.

(2) На основе убедительных методических исследований автором впервые обоснованы рекомендации по выбору оптимальных материалов рабочих ячеек, уплотняющих прокладок, соотношений размеров октаэдрических ячеек и рабочих пуансонов, величин теплоизолирующих слоев из ZrO_2 для рабочих ячеек из MgO и других характеристик.

(3) Впервые разработаны оригинальные методики определения коэффициентов диффузии силикатных компонентов в карбонатном расплаве при давлениях до 24 ГПа и температурах до $1700^{\circ}C$.

Главным замечанием к главе 3 является то, что за редким исключением (напр., погрешность холодной калибровки аппаратов типа Каваи), здесь не приводятся **итоговые погрешности измерений и калибровок давления и температуры.**

В **Главе 4** рассматриваются результаты экспериментального изучения бинарных и отдельных внутренних сечений в тройных карбонатных системах, включающих $CaCO_3$, $MgCO_3$, $FeCO_3$, Na_2CO_3 , K_2CO_3 при 6 ГПа. Кроме того, изучены две карбонатные системы, включающие H_2O (K_2CO_3 -гидромагнезит и Na_2CO_3 -гидромагнезит). Для каждой системы построены Т-Х сечения. Эксперименты сопровождаются рентгенографическими и рамановскими исследованиями некоторых новых карбонатных фаз, главным образом двойных

карбонатов. Часть экспериментов по идентификации высокобарических фаз проведена с использованием синхротронного излучения. Нет никакого сомнения, что представленные в главе результаты являются примером высококлассного экспериментального исследования, сопровождающегося высокоточными аналитическими данными. Приведенные ниже *замечания к Главе 4* никоим образом не влияют на интерпретацию автором топологии отдельных систем и на выводы, сделанные на ее основе.

(1) Система $\text{MgCO}_3\text{-FeCO}_3$. Хотя на стр. 129 указывается, что сидерит плавится инконгруэнтно по схеме $\text{FeCO}_3 = \text{L}$ (обогащенный FeO или Fe_3O_4) + CO_2 , эта особенность не отражена на Т-Х диаграмме 4.1.2 (далее на рис. 4.3.1. область CO_2+L все ж показана). Предположение об инконгруэнтном плавлении сидерита не согласуется с данными таблицы 4.1.1., где при составе 93 мол. % сидерита состав жидкости точно соответствует этому валовому составу. Мы согласны, что оценить эффект разложения $\text{FeCO}_3 = \text{FeO} + \text{CO}_2$ из микронзондового анализа довольно трудно. Но следовало бы хотя бы указать это в таблице. Надо отметить, что при 84 мол. % сидерита, состав расплава на 3 мол. % отличается от валового состава системы. Связано ли то с инконгруэнтным плавлением? С какой целью было сделано такое огромное количество экспериментов в субсолидусе данной системы? Вероятно, автор хотел выяснить, есть ли распад твердого раствора $\text{MgCO}_3\text{-FeCO}_3$.

(2) Система $\text{CaCO}_3\text{-FeCO}_3$. На рисунках 4.2.1g-i в продуктах закалки карбонатного расплава четко видны светлые дендритные кристаллики, представляющие, по-видимому, оксид Fe (подобно тому, что изображено на рисунках 4.2.2a-c). Так ли это? Если так, то появление оксида при 1300°C может означать, что анкеритовый твердый раствор в широком интервале составов плавится инконгруэнтно. Отсутствие явных пузырей CO_2 может указывать на то, что при относительно низких температурах флюид хорошо растворим в расплаве (см. стр. 142).

(3) Кривая плавления K_2CO_3 . На наш взгляд кривая фазового перехода $\alpha\text{-K}_2\text{CO}_3$ в $\beta\text{-K}_2\text{CO}_3$ неплохо экстраполируется в тройную точку, изображенную на рис. 4.4.4.

(4) Система $\text{K}_2\text{CO}_3\text{-Mg}_5(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Не понятно, что автор подразумевает под твердым раствором H_2O в K_2CO_3 . Возможно, что образуется некое гидратированное соединение типа $\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$.

(5) Система $\text{K}_2\text{CO}_3\text{-FeCO}_3$. Не понятно, откуда автор взял Т-Х координаты эвтектик, приведенные на стр. 170: 74/1200 и 48/1250. Согласно диаграмме на рис. 4.7.2 координаты этих точек 65/~1100 и 45/1150.

(6) Система $\text{K}_2\text{CO}_3\text{-FeCO}_3\text{-MgCO}_3$. Почему сечение $\text{K}_2\text{Fe}(\text{CO}_3)_2\text{-K}_2\text{Mg}(\text{CO}_3)_2$ по мнению автора является псевдобинарным? В нем же нет никаких фаз, лежащих вне этого сечения (что и является признаком псевдобинарности). Согласно рис. 4.8.1 это сечение является истинно бинарным с непрерывными твердыми растворами.

(7) Система $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{-FeCO}_3$. На странице 214 автор особо обращает внимание, что в экспериментах не наблюдалось разложение сидерита на кристаллический оксид и CO_2 . Тем не менее, на рис. 4.13.1h показан Fe_3O_4 . Дендритообразные выделения оксида, по-видимому, присутствуют и в продуктах закалки расплава (рис. 4.13.1i, j, l). Кроме того, в таблице 4.13.1 оксиды железа указаны как продукты опытов. Причем при одной и той же температуре (1100°C) при близких составах (60 и 50 мол. % Na_2CO_3) кристаллизуются разные оксиды, FeO и Fe_3O_4 . С чем связано появление этих оксидов? Судя по изложению предыдущих разделов, появление оксидов связано именно с разложением карбоната Fe.

В *Главе 5* характеризуются результаты экспериментальных исследований скоростей диффузии силикатных компонентов в щелочных сухих и водосодержащих карбонатных расплавах и в водно-силикатном расплаве. Без сомнения, это самая оригинальная глава диссертации, материалы которой основаны на собственной уникальной методике автора, которая пока отсутствует в других лабораториях мира. В этой главе очень привлекает детальность описания экспериментов, особенно методик анализа, выбора систем, анализа экспериментальных допущений, выяснения режима (конвекция или диффузия) в условиях опытов. Автором получены вполне реалистичные коэффициенты диффузии силикатных компонентов, которые возрастают от сухого карбонатного расплава через водосодержащий

карбонатный расплав к водно-силикатному расплаву (флюиду). В ходе чтения главы 5 у нас возникли следующие вопросы и замечания.

(1) Насколько корректны расчеты плотности расплавов $K_2Mg(CO_3)_2 \pm H_2O + MgSiO_3$ из данных о плотности расплавов $MgSiO_3 \pm H_2O$ и флюида CO_2 , ведь в этом случае система преобразуется в $MgCO_3 \pm H_2O + MgSiO_3$, а плотности расплавов $MgCO_3$ и $K_2Mg(CO_3)_2$, вероятно, разные. Почему не были взяты данные по плотности расплава K_2CO_3 (хотя бы при 4 ГПа) (Dobson et al., 1996) для этих расчетов? Кстати, таблица 5.4.1, где должны быть приведены оценки плотности, отсутствует в диссертации.

(2) Из зарисовок 5.5.1 и 5.5.3 четко видно, что в ходе опыта граница источник-раствор смещается из зоны LT в зону HT. Особенно это очевидно для системы $MgSiO_3 + H_2O$ (рис. 5.5.3). Насколько это смещение, а, значит, переменная температура на границе (в пределах градиента в 50°) может повлиять на массоперенос?

В **Главе 6** автор прилагает полученные экспериментальные данные по фазовым равновесиям в карбонатных системах при 6 ГПа и по коэффициентам диффузии силикатных компонентов в карбонатных расплавах к моделям образования (раздел 6.1) и миграции (раздел 6.2) таких расплавов в мантии. В разделе 6.1 автор попытался показать, что вне зависимости от карбонатсодержащего субстрата (перидотитовый, эклогитовый или пелитовый) его начальное плавление контролируется фазовыми соотношениями между субсолидусными карбонатными фазами. В целом этот раздел написан обоснованно с привлечением хорошо известных экспериментальных данных по плавлению карбонатсодержащих эклогитов, перидотитов и пелитов. Тем не менее, к нему у нас возникли *следующие возражения и замечания*.

(1) В этом разделе автор наиболее обширно использует термины «субсолидусный расплав» и «частичный расплав», которые, по нашему мнению, не имеют физико-химического смысла (см. выше).

(2) Аргументируя выводы о плавлении карбонат содержащих эклогитов, автор указывает, что «карбонаты, эксгумированные с мантийных глубин, представлены доломитом». Однако, это не совсем корректно, поскольку в комплексах высокого давления (например, Кокчетавском) встречены породы, содержащие не только доломит, но и кальцит, магнезиальный кальцит и изредка магнезит.

(3) Терминология автора «система эклогит- CO_2 в присутствии натрия», «Na-содержащий карбонатизированный эклогит» также не корректна, поскольку эклогит - это порода, изначально обогащенная натрием в виде жадеитового минала в клинопироксене.

(4) То, что плавление богатого натрием карбонат содержащего эклогита контролируется плавлением системы $Na_2CO_3 - CaCO_3 - MgCO_3$ вызывает сомнения, особенно принимая во внимание составы близосолидусных расплавов из экспериментов Г. Яксли и Г. Брая (Yaxley, Grey, 2004) и Т. Хаммуды (Hammouda, 2003), приведенные в таблице 6.1.2. Даже при высоком содержании Na_2O в эклогите Т. Хаммуды (2.91 мас. %), близосолидусный кальциевый карбонатный расплав содержит всего 0.06 мас. % Na_2O (кстати об этом автор упоминает на стр. 267). Это означает, что клинопироксен держит Na намного сильнее, не давая ему уходить в расплав. Такие концентрации Na_2O в расплаве не сопоставимы с составом эвтектического расплава, $48Na_2CO_3 \cdot 52(Ca_{0.63}Mg_{0.37})CO_3$, в системе $Na_2CO_3 - CaCO_3 - MgCO_3$, установленным автором диссертации. И эти несоответствия, кстати, в данном случае нельзя объяснить «проблемами микрозондового анализа состава расплава» вблизи солидуса (стр. 267). Кроме того отметим, что температуры солидуса карбонат содержащего эклогита в экспериментах Т. Хаммуды в интервале 6.0-6.5 ГПа сильно зависят от давления: при 6.5 ГПа эта температура действительно составляет около $980^\circ C$, но при 6 ГПа она резко возрастает до $1200-1250^\circ C$, что связано с карбонатно-силикатными реакциями. Поэтому прямое сравнение результатов экспериментов по плавлению карбонат содержащих эклогитов с результатами экспериментов автора диссертации в чисто карбонатных системах, на наш взгляд, не всегда оправдано, поскольку оно не учитывает влияние карбонатно-силикатных реакций, которые имеют, видимо, важное значение при давлениях порядка 6 ГПа (в отличие от перидотитовых) именно в эклогитовых системах (напр., Knoche, 1999).

(5) На наш взгляд, два вывода, сформулированные автором на стр. 268, не вполне корректны, поскольку они отражают закономерности изменения соотношений Ca, Mg и Na карбонатных компонентов в расплавах, возникающих при прогрессивном плавлении карбонат содержащих эклогитов и перидотитов, но не состав расплавов. **Говоря об эволюции состава расплава в этих системах с температурой в целом, прежде всего необходимо указывать вариации SiO₂.**

(6) Характеризуя клинопироксен, как концентратор калия в верхней мантии, можно сослаться на работы О.Г. Сафонова с соавторами, которые изучали взаимоотношения калийсодержащего клинопироксена в силикатных и карбонатно-силикатных системах. Говоря о фазах, потенциальных концентраторах калия в мантийных условиях, можно сослаться на работу Harlow, Davies (2004), где приводится аналитический обзор таких фаз.

(7) Поле стабильности фазы X в калий карбонат содержащем перидотите расширяется в область более низких давлений в железосодержащей системе, особенно при вхождении в эту фазу Fe³⁺ (Bindi et al., 2007; Бобров, Литвин, 2009).

Раздел 6.2 содержит приложения данных автора по измерению коэффициентов диффузии силикатных компонентов через карбонатитовые и водно-силикатные расплавы к проблеме механизмов и скорости миграции этих расплавов в глубокой мантии. А.Ф. Шацкий приходит к выводу о том, что наиболее вероятный механизм миграции карбонатитовых расплавов является механизм растворения - переотложения, лимитируемый диффузией силикатных компонентов в поле максимальных механических напряжений, которые могут реализовываться на границах глубинных плюмов. Сравнивая скорости перемещения этих плюмов в мантии со скоростями диффузии, автор приходит к интересному выводу о том, что карбонатитовые и сопутствующие расплавы должны скапливаться на фронте плюмов (в их апикальной части). По нашему мнению, этот вывод вполне обоснован автором. Однако к разделу 6.2 возникли *следующие замечания*.

(1) Автору следовало бы более подробно остановиться на том, как рассчитывались диаграммы на рисунках 6.2.4, 6.2.5, 6.2.7. Например, диаграмма на рис. 6.2.7 очевидно построена с использованием уравнений 6.2.1 и 6.2.2. Однако для этих уравнений в тексте не приведены обозначения параметров.

(2) При рассмотрении интересной и оригинальной модели миграции включений карбонатного расплава через мантийные породы не учитываются и даже не обсуждаются возможные субсолидусные реакции декарбонатизации при взаимодействии силикатов и карбонатов в случае наличия их непосредственных контактов в мантии.

(3) Вывод о концентрации карбонатитовых расплавов в «головах» мантийных плюмов, на наш взгляд, необходимо было проиллюстрировать геологическими данными об эволюции карбонатит-кимберлитового магматизма.

(4) Отсутствует заключение к Главе 6, как это сделано для других глав.

В Заключении А.Ф. Шацкий кратко суммирует главные результаты и выводы работы. **В качестве замечания** укажем то, что в общем заключении этой чрезвычайно важной и актуальной работы автор почему-то совсем не упоминает свои новые и принципиально важные результаты аппаратурно-методических разработок.

Помимо приведенных выше замечаний, приведем несколько редакционных замечаний, которые, на наш взгляд, следует учесть автору при дальнейшей работе.

(1) Автор постоянно использует термин «частичный расплав» (напр., стр. 21, 46, 49, 149, 261, 265 и другие), который, мягко говоря, не имеет смысла. Похоже, что этот термин пришел в диссертацию из англоязычной литературы и является прямым переводом термина “partial melt”. Очевидно, что прямой перевод на русский язык не отражает смысл этого термина, который должен бы быть переведен как «расплав, образовавшийся в ходе частичного плавления». Длинно, но зато корректно!

(2) Есть небрежности в оформлении рисунков и подписей под ними. Например, подпись к рисунку 1.1.1. во многом не соответствует самому рисунку: в подписи упомянуты целый ряд обозначений, которые отсутствуют на рисунке. В подписи к рисунку 3.5.5. указано, что на рисунке показано распределение давления, тогда как на рисунке представлено распределение температуры.

Достоверность экспериментальных результатов, изложенных в защищаемых положениях не вызывает сомнений. Полученные результаты имеют международное признание, что подтверждается публикациями в ведущих международных рецензируемых журналах (рекомендуемых ВАК РФ) и докладами на отечественных и международных конференциях высокого уровня. Возможности использования результатов диссертационной работы связаны с приложением полученных экспериментальных данных к развитию моделей кимберлит - карбонатитового магматизма, мантийного метасоматоза и алмазообразования. Полученные автором новые структурные рентгенографические характеристики и рамановские спектры двойных карбонатных соединений, температуры плавления простых и двойных карбонатов, коэффициенты диффузии компонентов в расплавах войдут в физико-химические справочники и базы данных. Оригинальные методические разработки автора, без сомнения, найдут широкое применение в практике экспериментов при высоких давлениях. Материалы диссертационной работы А.Ф. Шацкого представляют также большой интерес для использования в учебных курсах петрологии, геохимии, минералогии, физической химии, кристаллохимии и кристаллографии, материаловедения.

Подводя итог, следует подчеркнуть, что диссертация А.Ф. Шацкого в целом производит хорошее впечатление. Отмеченные в отзыве недостатки свидетельствуют лишь о чрезвычайной сложности решаемых задач и множественностью подходов к интерпретации экспериментальных данных. Замечания не влияют на общую положительную оценку работы. Диссертация А.Ф. Шацкого является законченной научно-исследовательской работой, основанной на большом объеме новых экспериментальных результатов, полученных на высочайшем научно-методическом уровне, и разноплановых аналитических данных, что можно квалифицировать **как решение крупной научной проблемы**. Уровень исследований и защищаемых положений, а также практическая значимость работы заслуживают высокой оценки. Выполненная А.Ф. Шацким диссертационная работа свидетельствует о его широкой научной эрудиции, высоком профессионализме в области экспериментальной минералогии, кристаллографии, петрологии и геохимии, владении им всем комплексом современных аналитических и экспериментальных методов, умении приложить полученные результаты к актуальным проблемам минералогии, петрологии и геохимии мантии. Автореферат вполне соответствует содержанию диссертации и отражает основную логику всей работы. **Диссертация «УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ КАРБОНАТОВ И МЕХАНИЗМ МИГРАЦИИ КАРБОНАТНЫХ РАСПЛАВОВ В МАНТИИ ЗЕМЛИ», соответствует требованиям Положения ВАК о присуждении ученых степеней, а её автор Шацкий Антон Фарисович, несомненно, достоин присуждения ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 25.00.05 «минералогия, кристаллография».**

Заведующий лабораторией литосферы
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Института
экспериментальной минералогии РАН,
доктор геолого-минералогических наук

Олег Геннадьевич Сафонов

Главный научный сотрудник лаборатории
термодинамики минералов Федерального
государственного бюджетного учреждения
науки Института экспериментальной
минералогии РАН, доктор геолого-
минералогических наук

Эдуард Сергеевич Персиков

Отзыв заслушан и утвержден на заседании Ученого Совета ИЭМ РАН 10 ноября 2014 г. (выписка из протокола прилагается).

Подписи О.Г. Сафонова и Э.С. Персикова удостоверяются

*дав высказавшейся член РАН в. Пископов
(Е.С. Персиков)*



ВЫПИСКА

Из протокола заседания Ученого Совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института экспериментальной минералогии РАН (ИЭМ РАН)

№ 8

г. Черноголовка

10 ноября 2014 г.

Присутствовали:

Ю.Б. Шаповалов – член-корр. РАН, Е.Г. Осадчий – д.х.н.,
В.В. Федькин – к.г.-м.н., В.С. Балицкий – д.г.-м.н., профессор,
Н.И. Безмен – д.г.-м.н., Г.В. Бондаренко – к.ф.м.н.,
А.Р. Котельников – д.г.-м.н., Ю.А. Литвин – д.г.-м.н., профессор,
Э.С. Персигов – д.г.-м.н., О.Г. Сафонов – д.г.-м.н.,
В.В. Поляков, д.х.н., А.Ф. Редькин – к.г.-м.н.,
А.Г. Симакин – д.ф.м.н., В.Ю. Чевычелов – д.г.-м.н.,
А.В. Спивак – к.г.-м.н., К.И. Шмулович – д.г.-м.н.

СЛУШАЛИ: Официальный отзыв ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института экспериментальной минералогии Российской академии наук (ИЭМ РАН) на диссертационную работу Шацкого Антона Фарисовича «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».

Докладчики: О.Г. Сафонов – д.г.-м.н. и Э.С. Персигов – д.г.-м.н.

В обсуждении отзыва приняли участие Ю.Б. Шаповалов – член-корр. РАН, Е.Г. Осадчий – д.х.н., А.Р. Котельников – д.г.-м.н., Ю.А. Литвин – д.г.-м.н., профессор, В.В. Поляков, д.х.н., А.Ф. Редькин – к.г.-м.н., А.Г. Симакин – д.ф.м.н.

Постановили: Одобрить представленный О.Г. Сафоновым – д.г.-м.н. и Э.С. Персиковым – д.г.-м.н. положительный отзыв ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института экспериментальной минералогии Российской академии наук (ИЭМ РАН) на диссертационную работу Шацкого Антона Фарисовича «УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ КАРБОНАТОВ И МЕХАНИЗМ МИГРАЦИИ КАРБОНАТНЫХ РАСПЛАВОВ В МАНТИИ ЗЕМЛИ».

Председатель Ученого Совета ИЭМ РАН
Член-корр. РАН



Шаповалов Ю.Б.

Секретарь Ученого Совета ИЭМ РАН
К.г.-м.н.

Федькин В.В.