

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

№ \_\_\_\_\_

20.12.2016

## **ОТЗЫВ**

**официального оппонента на диссертацию Круга Алексея Николаевича  
«УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ КИМБЕРЛИТОПОДОБНЫХ МАГМ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ  
КАРБОНАТНЫХ РАСПЛАВОВ С ЛИТОСФЕРНЫМИ ПЕРИДОТИТАМИ:  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ»,  
представленную на соискание ученой степени  
доктора геолого-минералогических наук по специальности 25.00.05 – минералогия,  
кристаллография**

Представленная работа исключительно актуальна, поскольку кимберлитовые расплавы, как известно, образованы наиболее глубинными мантийными магмами и являются транспортерами алмазов к земной поверхности. Зарождение кимберлитовых магм на сегодня связывают либо с плавлением карбонатизированного лерцолита, либо с взаимодействием глубинных летучих с породами литосферной мантии. Здесь много противоречий и нерешенных вопросов в сегодняшних представлениях о генерации кимберлитовых магм. Это касается, прежде всего, температурных и флюидных режимов этого процесса. Слабо изучена ранняя метасоматическая стадия проработки потенциальных протолитов кимберлитов с участием карбонатных расплавов и водных флюидов. Механизм и продукты реакционного взаимодействия карбонатных расплавов с мантийными перидотитами изучены недостаточно. А кимберлитовые магмы и расплавы – это не только и не столько простой транспортер, но сложнейшая природная система, прямо связанная с эволюцией алмазного вещества.

Цель работы заключалась в экспериментальном моделировании минералообразующих процессов, которые осуществляются при взаимодействии щелочных карбонатных расплавов с мантийными перидотитами, а также в

реконструкции температурного и флюидного режимов генерации кимберлитоподобных расплавов в условиях основания континентальной литосферы (в качестве эталонного объекта автором работы был выбран кимберлит известной алмазоносной трубки Удачная).

Основные задачи сводились, прежде всего, к анализу предшествующих исследований, посвященных проблеме карбонатного метасоматоза пород литосферной мантии и генезиса кимберлитов (это логично). Далее ставилась задача экспериментально изучить закономерности взаимодействия карбонатных расплавов с перидотитами, при этом выявить основные реакции и тренды изменения состава расплава, силикатных и карбонатных фаз. В постановке экспериментов необходимо было обратить внимание на исследование специфики фазовых отношений вблизи ликвидуса кимберлита тр. Удачная в зависимости от содержания  $H_2O$ , выявить состав равновесных с расплавом силикатных фаз и определить границы области мультифазного насыщения расплава. И, конечно, на основании полученных данных предложить возможные условия генерации кимберлитовой магмы. Естественно и логично затем в итоговом обобщении и анализе сопоставить полученные экспериментальные данные с современными представлениями о процессах мантийного метасоматоза и генезисе кимберлитовых магм. Все задачи серьезные, многоплановые и что мне импонирует – не оторваны от природных реальных процессов.

Фактический материал достаточно большой и вполне обосновывает полученные результаты и защищаемые положения.

Научная новизна на высоком уровне. Впервые экспериментально при P-T параметрах основания континентальной литосферы изучена специфика реакционного взаимодействия щелочных карбонатных расплавов с гарцбургитом и лерцолитом, установлены особенности составов равновесных расплавов, силикатных фаз перидотита, определены границы стабильности магнезита. Экспериментально воспроизведены основные закономерности эволюции состава гранатов из метасоматизированных перидотитов кимберлитовой трубки Удачная. Автором работы показано, что равновесные с перидотитом

карбонатные расплавы по составу схожи с высокомагнезиальной серией карбонатных включений в кристаллах алмаза с волокнистым строением. Впервые при мантийных давлениях и высоких концентрациях воды изучены фазовые отношения вблизи ликвидуса кимберлита трубки Удачная. По мнению автора, установлены зоны мультифазного насыщения и обосновано, что их границы зависят как от концентрации основных петрогенных компонентов, так и концентрации  $H_2O$  в стартовом составе. На основании полученных данных сформулирован вывод о важной роли как предварительной метасоматической переработки протолитов, так и повышенных концентраций воды при генерации кимберлитовых магм I группы.

**Небольшое замечание касается выделения кимберлитовых магм I группы.** Хорошо было здесь указать, что характерно в основном для кимберлитовых магм I группы, если уж пошла речь о них. (Например, со ссылкой согласно классификации [Smith et al., 1985]). Вот как, например, в разделе 1.3 «согласно классификации [Smith et al., 1985]»

Практическая значимость работы ясна, т.к. полученные результаты могут быть и должны быть учтены при построении петролого-геохимических моделей генерации алмазоносных кимберлитовых магм, которые могут быть полезны при разработке новых более совершенных критериев поиска алмазоносных кимберлитов.

Автором работы вынесены и сформулированы три защищаемых положения. И я их вынужден здесь привести полностью, чтобы в последующем провести их анализ на представленном материале.

**1. Взаимодействие карбонатных расплавов с гарцбургитом или лерцолитом при P-T параметрах основания литосферной мантии главным образом осуществляется посредством Mg-Ca обмена и приводит образованию богатого щелочами и бедного  $SiO_2$  ( $\leq 7$  мас.%) карбонатного расплава,  $Ca\#$  которого контролируется минеральным составом перидотита. При  $1200^\circ C$  реакция приводит к верлитизации и карбонатизации гарцбургита за счет расходования ортопироксена, кристаллизации клинопироксена и магнезита.**

2. В результате взаимодействия между карбонатными расплавами и гарцбургитом при температуре 1200-1350°C кристаллизуются гранаты, вариации содержания CaO и Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в которых, воспроизводят основные закономерности эволюции состава гранатов из некоторых ксенолитов метасоматизированных перидотитов кимберлита трубки Удачная. Карбонатные расплавы, равновесные с перидотитами, близки по составу только к богатым магнием карбонатным включениям в алмазах.

3. При давлении 6.3 ГПа расплав кимберлита тр. Удачная вблизи ликвидуса равновесен с оливином, гранатом и клинопироксеном только при содержании воды от 6 до 8 мас.%, а при давлении 7.5 ГПа – более 9 мас.% H<sub>2</sub>O. Сопоставление имеющихся экспериментальных данных и результатов реконструкций состава первичных магм свидетельствует о том, что потенциальный гарцбургитовый протолит богатых кальцием кимберлитовых магм был существенно верлитизирован.

Конечно, мы будем рассматривать работу в первую очередь на предмет обоснования выдвинутых защищаемых положений.

**Одно небольшое замечание к используемым терминам глубинных пород. Где-то используются «гарцбургиты или лерцолиты» (см. защищаемое положение 1), где-то гарцбургиты, где-то, и в основном, перидотиты. Не всегда с первого раза понятно, что же все-таки использовалось в том или ином эксперименте.**

Структура и объем работы стандартные: введение, 5 глав и заключение. Список литературы достаточно большой.

Необходимо отметить одно большое достоинство автора – им опубликовано 8 статей в крупных реферируемых научных журналах, также он активно участвовал в научных конференциях.

### **Глава 1. Проблемы мантийного кимберлитобразования: анализ предшествующих исследований.**

Это глава необходима, т.к. надо было провести анализ работ других исследователей, более ранних работ и сформировать и сформулировать те

проблемы, которые не нашли свое отражение в предшествующих исследованиях, или слабо освещены в них. Это достаточно большой и полный анализ. В нем рассмотрены вопросы определения физико-химических условий, необходимых для генерации кимберлитов, составов первичных магм и мантийных протолитов. Показано, что имеющиеся геохимические данные свидетельствуют о многостадийности формирования кимберлитовых расплавов, что на сегодняшний момент слабо изученными остаются как механизмы метасоматической трансформации потенциальных литосферных протолитов кимберлитов, так и физико-химические условия генерации самих сверхглубинных магм. Подчеркнуто, что в решении этих сложных вопросов экспериментальные исследования процессов генерирования кимберлитовых магм – необходимое условие понимания петрологических и геохимических процессов в глубинах мантии. Пока мы еще не имеем возможности реально заглянуть в эти глубины, да и все эти процессы проходили много сотен миллионов лет назад.

## **Глава 2. Методика исследований.**

Большая и тщательно проработанная глава. В ней рассмотрены условия эксперимента, сам аппарат высокого с ячейкой высокого давления, подготовка образцов с использованием сэндвич-метода, режимы экспериментов, исследование фазовых отношений вблизи ликвидуса водосодержащего кимберлита тр. Удачная при давлениях 6,3-7,5 ГПа и  $T=1300-1670$  о С. Все исследования полученных фаз проводились на современных оптических микроскопах и электронно-зондовых микроанализаторах. Материал этой главы дает четкое и ясное представление о всех этапах экспериментальных исследований от аппаратуры до методов анализа продуктов эксперимента.

Теперь перейдем к основным главам (их три), в которых и приведены результаты проведенных работ и исследований.

Отмечу, что работа не очень простая для анализа результатов исследования и выдвинутых положений. Когда, скажем, глава по материалу отвечает конкретному защищаемому положению, это вариант наиболее легкий и приемлемый для работы оппонента. Но в данном случае все сложнее. Анализ

полученных экспериментальных данных не разбит по главам, а дан в конце диссертации в заключительной 5 главе. По этой причине, чтобы дать полный анализ скажем Первому защищаемому положению, необходимо пройти самым внимательным образом по всей работе. Это же касается и других защищаемых положений. Это, конечно, весьма усложняет работу оппонента, но тем интереснее с данной работой знакомиться, не просто знакомиться, а в буквальном смысле тщательно проштудировать.

### **Глава 3. Результаты экспериментов по моделированию процессов взаимодействия карбонатных расплавов с перидотитами при 5.5-7.0 ГПа и 1200-1350° °С.**

Необходимо особо отметить как достоинство данной работы, что для изучения взаимодействия карбонатных расплавов с перидотитами автором данной работы выбран подход, предусматривающий проведение максимально возможно длительных экспериментов (до 150 часов). И при этом, что очень важно, надо было удержать равновесность изученных систем. Подчеркнем, что эксперименты с такой и большей длительностью являются уникальными и были реализованы, как отмечает Алексей Крук, ранее лишь в работе [Yaxley and Brey, 2004]. Это, конечно, большое достоинство работы.

Особое внимание в работе в этой части уделялось анализу строения сложной матрицы сэндвич-образцов. В работе этому уделяется большое внимание. Главное это то, что сэндвич-образцы после экспериментов сохраняли послойное строение. Примеры текстуры образцов в работе сопровождаются качественными микрофотографиями и в отраженных электронах и в рентгеновских лучах соответствующих элементов.

Детально рассмотрен состав расплава с обсуждением состава силикатных и карбонатных фаз. Также достаточно детально обсуждены составы силикатных и карбонатных фаз, образованных после эксперимента. Не буду здесь детально рассматривать составы всех минералов (оливин, гранат, клино- и ортопироксен, магнезит). Скажу главное, составы мультифазно насыщенных расплавов в основном определяются составом стартового карбонатного расплава и в меньшей степени составом перидотита или параметрами эксперимента. Как

правило, концентрации CaO и MgO в расплаве не показывают систематических изменений при увеличении температуры от 1200 до 1350 °C.

Еще очень интересный вывод: анализ составов силикатных фаз, полученных экспериментально при взаимодействии карбонатного расплава и перидотита показывает, что они, как правило, имеют составы сходные с составами мантийных минералов высокотемпературных перидотитов.

Обращает на себя внимание то, что характерной чертой синтезированных при взаимодействии карбонатных расплавов с перидотитами жидкостей является то, что, несмотря на широкий диапазон вариаций исходных составов, концентрация CaO и MgO в расплавах, полученных и при 1200 и при 1350 °C варьировала в узких пределах. При этом содержание SiO<sub>2</sub> в них при 1350 °C ( $\leq 7$  мас.%) было лишь незначительно выше, чем при 1200 °C ( $\leq 5$  мас.%) и, фактически, расплавы оставались существенно карбонатными.

**Это полностью доказывает выдвинутое защищаемое положение 1 в части особенности карбонатного расплава, Ca# которого контролируется минеральным составом перидотита.**

**Ассоциации фаз, образовавшиеся при взаимодействии карбонатных расплавов с перидотитами в диапазоне давлений 5,5-7,0 ГПа при температурах 1200 и 1350° C, заметно различаются. После экспериментов при 1200°С образуется перидотитовая матрица, содержащая незначительное количество ортопироксена (вплоть до полного отсутствия), большое количество клинопироксена и до 16% магнезита.**

**Автором работы было установлено, что при 1200°С реакция приводит к верлитизации и карбонатизации гарцбургита за счет расходования ортопироксена, кристаллизации клинопироксена и магнезита. При температуре 1350°С концентрация клинопироксена и магнезита в матрице резко падает (до его полного исчезновения), а содержание ортопироксена растет.**

**Вот здесь у меня одно замечание к положению 1, А. Крук в положение записал важное обстоятельство – при 1200°С происходит верлитизация и**

карбонатизация гарцбургита. Это, конечно, необходимо отметить. Но не менее важно, по нашему мнению, и то, что происходит при температуре 1350<sup>0</sup>С, то, что растет содержание ортопироксена, а клинопироксена и магнезита резко падает вплоть до полного исчезновения последнего. И это новое обстоятельство, полученное в экспериментах А. Крука, можно было бы отразить в Защищаемом положении. В этом случае оно было бы полным до конца.

**Тем не менее защищаемое положение 1 принимается.**

На основании полученных данных А. Крук делает важный вывод, что карбонатные расплавы с массовым отношением MgO/CaO >0.3, возникшие в результате плавления карбонатизированных перидотитов при 6-10 ГПа, при проникновении из более горячей астеносферы (~1400° С) в более холодную (~1200 ° С) континентальную литосферную мантию могут метасоматически превращать гарцбургиты в магнезитсодержащие лерцолиты или верлиты.

Проникновение обогащенных калием и кальцием карбонатных расплавов, образующихся при высоких давлениях и меньших температурах ≤1100° С в результате плавления субдуцированных карбонатизированных пелитов, при взаимодействии с перидотитами, напротив, приводят к образованию безмагнезитовых, обогащенных клинопироксеном лерцолитов или верлитов. Очень важный вывод, имеющий определенные научные последствия.

**Теперь перейдем ко второму положению.** *В результате взаимодействия между карбонатными расплавами и гарцбургитом при температуре 1200-1350°С кристаллизуются гранаты, вариации содержания CaO и Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в которых, воспроизводят основные закономерности эволюции состава гранатов из некоторых ксенолитов метасоматизированных перидотитов кимберлита трубки Удачная. Карбонатные расплавы, равновесные с перидотитами, близки по составу только к богатым магнием карбонатным включениям в алмазах.*

Здесь уже акцент делается не на карбонатные расплавы, а на гранаты, на особенности их составов при кристаллизации при взаимодействии карбонатных расплавов и гарцбургитов. Почему гранат – это понятно. Но я хотел бы вот на



что обратить внимание. Очень тщательно Алексей Николаевич в Главах 3 и 4 описывает составы силикатных фаз (оливин, гранат, клино-, и ортопироксен) после экспериментов. Это совершенно правильно. И при этом в тексте, который, например, относится к клинопироксенам, указывается, что состав клинопироксенов оказался также чувствителен к условиям экспериментов. **А в разделе 5.2. Реконструкция характерных особенностей карбонатного метасоматоза речь идет только о гранате. Но если (как справедливо пишет А. Крук) состав клинопироксена также чувствителен к условиям эксперимента, то в этом случае можно было бы и это обсудить в разделе 5.2.**

Так что же нам показал анализ состава граната, который кристаллизовался при взаимодействии карбонатных расплавов и гарцбургита. По мнению А. Крука подобный гранат представляет собой наиболее чуткий и лучший минерал для реконструкции условий кристаллизации мантийных парагенезисов и для реконструкции характерных особенностей карбонатного метасоматоза. Это, кстати, показано и в самой диссертационной работе и в статьях Алексея Крука и других исследователей метасоматизированных перидотитов из ксенолитов. Что важно и на что следует обратить внимание.

Выявленные тенденции изменения содержания  $\text{CaO}$  и  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в гранатах в результате воздействия карбонатного расплава на гарцбургит при  $1200^\circ\text{C}$  и затем при  $1350^\circ\text{C}$ , которые обсуждает А. Крук, фактически воспроизводят основные этапы эволюции состава некоторых гранатов из метасоматизированных перидотитовых ксенолитов из литосферной мантии под кимберлитовой трубкой Удачная. Второй очень важный вывод из материала ко второму защищаемому положению состоит в том, что богатый щелочами карбонатный расплав является эффективной средой роста алмаза

*Так вот карбонатные расплавы, равновесные с перидотитами, совпадают по составу только с полями высокомагнезиальной серии карбонатных включений в алмазах с фибриллярным строением.*

*В защищаемом положении 2 у А. Крука выдвинуто: Карбонатные расплавы, равновесные с перидотитами, близки по составу только к богатым*

*магнем карбонатным включениям в алмазах. Я бы не стал так широко подходить к алмазу, а все-таки в положении сделал бы уточнение: в алмазах с фибриллярным строением.*

Но это нисколько не мешает считать второе защищаемое положение доказанным.

И теперь перейдем к анализу защищаемого положения 3. При давлении 6,3 ГПа расплав кимберлита тр. Удачная вблизи ликвидуса равновесен с оливином, гранатом и клинопироксеном только при содержании воды от 6 до 8 мас.%, а при 7,5 ГПа – более 9 мас.% H<sub>2</sub>O. Сопоставление имеющихся экспериментальных данных и результатов реконструкций первичных магм свидетельствует о том, что потенциальный гарцбургитовый протолит богатых кальцием кимберлитовых магм был существенно верлитизирован.

Выдвинутое положение состоит как бы из двух частей: первая касается расплава кимберлита, что он вблизи ликвидуса равновесен с оливином, гранатом и клинопироксеном только при содержании воды от 6 до 8% при 6,3 ГПа, а при 7,5 ГПа – более 9 мас.% H<sub>2</sub>O. А вторая часть касается потенциального гарцбургитового протолита кимберлитовых магм, богатых Са, что он был существенно верлитизирован.

**Одно небольшое замечание: в положении отмечено, что при 7,5 ГПа расплав кимберлита вблизи ликвидуса равновесен с оливином, гранатом, клинопироксеном при содержании воды более 9 мас.% H<sub>2</sub>O. Но это и 10 мас.%, и 15мас.% и т.д. И где же верхний предел? Напомним, что при 6,3 ГПа установлено от 6 до 8 мас.% H<sub>2</sub>O.**

**И второе, как нам представляется, необходимо было указать и диапазон температур. В работе это все есть и достаточно полно.**

Весь имеющийся материал в диссертации, который касается расплава кимберлита при заданных параметрах, его равновесия с перидотитом, изменения перидотитового источника при увеличении магниальности расплава, вполне доказывает саму идею (концепцию) защищаемого положения 3 и можно вполне считать это положение доказанным.

Апробация работы вполне отвечает всем требованиям ВАК,а. Работа логично построена, интересна и несет научную новизну. Все задачи логично сформулированы, четкие и отражают существо работы. Диссертация полностью соответствует разделу 4 паспорта научной специальности 25.00.05.

Таким образом, в целом, работу можно признать весьма актуальным, имеющим генетическое значение и практическую значимость, исследованием. Представленная диссертация соответствует требованиям ВАК, а, предъявляемым к работам, представленным на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. Достаточный список опубликованных работ, в том числе и в реферируемых научных журналах. Автореферат полностью отражает суть представленной работы. Работа написана ясным и понятным русским языком.

Автор данной работы, Алексей Николаевич Крук, сложившийся специалист в области экспериментальной минералогии, несомненно, заслуживает присвоения ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.05 – минералогия, кристаллография.

Научный руководитель Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана,  
Лауреат Премии Правительства в области науки и техники,  
Лауреат Премии им. А.Е. Ферсмана РАН,  
профессор, доктор геол.-мин. наук

Виктор Константинович Гаранин

Отзыв утвержден на Заседании Ученого Совета Минмузея

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



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

Ленинский пр-т, дом 18, корпус 2, Москва, 119071

Телефон (495) 952-00-67; факс (495) 952-48-50. E-mail: [mineral@fmm.ru](mailto:mineral@fmm.ru); [vgaranin@mail.ru](mailto:vgaranin@mail.ru)