

Отзыв официального оппонента на диссертацию Митяева Александра Сергеевича «Флюидно-магматическое взаимодействие гранулитового комплекса и кратона на примере комплекса Лимпопо и кратона Каапвааль, ЮАР», представленную на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.3 Петрология, вулканология

Образование древних кратонов и гранулитовых поясов является одной из центральных проблем современной петрологии. В представленной работе рассматривается один из важных аспектов проблемы – роль карбонатов и углекислых флюидов в образовании гранитных магм и преобразовании пород на разных коровых уровнях, а также определение возможных условий и механизмов образования таких флюидов. Выбор темы представляется удачным, поскольку влияние CO_2 в ходе гранулитового метаморфизма признается большинством исследователей на основании исследования минералогии пород и включений в минералах. При этом большинство экспериментальных работ по образованию и кристаллизации гранитов проводились в системах с чисто водным флюидом. Поэтому систематическое исследование влияния CO_2 на гранитообразование является актуальным и важным для построения моделей образования континентальной коры. Выбор объекта обоснован тем, что в гранитоидах комплекса Лимпопо влияние CO_2 проявлено особенно отчетливо в минералогии и геохимии пород.

Работа А.С. Митяева является комплексным исследованием проблемы на основании применения ряда современных методик анализа вещества, экспериментального моделирования и термодинамического расчета фазовых равновесий. Диссертация состоит из введения, 7 глав и заключения.

В первой главе обсуждаются основные проблемы и модели образования гранулитов. Рассматриваются признаки присутствия CO_2 , включая образование богатых CO_2 флюидов и дочерних карбонатов во включениях. Приводится обзор экспериментов по плавлению в кислых системах в присутствии H_2O и CO_2 . Глава содержит много информации, необходимой для обоснования постановки проблемы и выбора применяемых подходов, и

написана в целом хорошо. Иногда следовало бы более строго подходить к терминологии. Так, термины «позитивный» и «негативный» для оценки роли CO_2 при образовании гранитных расплавов не однозначны. Если имеется в виду понижение и повышение температуры плавления, то надо так и писать. Отмечу также, что очень низкая растворимость CO_2 в гранитном расплаве не оказывает влияние на гранитообразование. Из-за очень низкой растворимости присутствие CO_2 практически не влияет на плавление и кристаллизацию гранита в системе, где CO_2 – единственный летучий компонент. При этом, его влияние в системе с H_2O может быть значительным из-за понижения активности H_2O .

Вторая глава посвящена характеристике используемых материалов и методов. В работе использовался широкий спектр подходов. Наиболее подробно описана экспериментальная аппаратура. Аналитические методы рассмотрены кратко; в частности, не приводятся точности анализов. Из мелких замечаний отмечу, что продувка инертным газом при заварке золотых ампул не служит для предотвращения окисления металла, поскольку золото не окисляется на воздухе.

В третьей главе детально описан базовый район исследования – контакт гранулитового комплекса Лимпопо и кратона Каапвааль. Для уточнения параметров метаморфизма проведено минералогическое исследование с использованием современных методов термобарометрии, основанных на минимизации энергии Гиббса при заданном валовом составе породы. Для ряда гранатсодержащих и безгранатовых пород были получены параметры пика метаморфизма, которые оказались значительно ниже температур солидуса гранитов при данных давлениях. Это позволило сделать вывод о том, что данные породы не могли быть источником гранитных расплавов, но при этом справедливо оговаривается, что имеется в виду только изученный срез, в то время как в более глубоких недоступных для изучения частях комплекса условия образования гранитных расплавов могли достигаться. В качестве замечания к этой и следующим главам отмечу, что приведенные в диссертации

псевдосечения нуждаются в более обстоятельных пояснениях. Не обозначены ассоциации, наблюдаемые в образцах, значение некоторых линий не объяснено.

Для проверки условий образования гранитных расплавов проведены эксперименты по частичному плавлению бесплагноклазового двуслюдяного метапелита при 6-15 кбар. В качестве интересных особенностей плавления бесплагноклазовых ассоциаций относятся то, что поведение Са в большой степени зависит от растворения в расплаве апатита, а низкое содержание Na приводит к образованию ультра-калиевых расплавов. Приведенные в работе электронные изображения продуктов опытов (в этой главе и далее) в большинстве крупномасштабные и мало информативны для понимания происходящих в опытах реакций. При этом ясно видно, что в исходных смесях присутствуют зерна размером более 50 мкм, и распределение более мелких зерен также неоднородное. Поэтому равновесие в пределах всего образца могло не достигаться, и реакции можно намечать только по локальным реакционным структурам. Расплав образует достаточно крупные выделения и также распределен неоднородно. Поэтому к оценкам степени плавления надо относиться осторожно. Полученные результаты экспериментов, приведенные в табл. 1 не дают достаточных оснований для определения наклона солидуса. Можно только сделать вывод о том, что солидус располагается между 750 и 800°C при 6 и 10 кбар и ниже 850°C при 15 кбар. Таким образом, солидусу при желании можно приписать как положительный, так и отрицательный наклон, и приведенное его положение на рис. 18 гипотетично.

Четвертая глава посвящена роли CO_2 в формировании гранитоидов комплекса Лимпопо. Присутствие заметных количеств CO_2 во флюиде подтверждается необычным минеральным составом гранитов и присутствием флюидных включений, состоящих в основном из CO_2 . Изотопный состав углерода подтверждает внешний источник флюида. Условия кристаллизации гранитоидов определено с использованием программного комплекса PERPLE_X, который позволил воспроизвести наблюдаемую ассоциацию при кристаллизации в присутствии богатого CO_2 флюида. К этому разделу есть замечания.

Неясно, почему многие флюидные включения считаются псевдотричными (напр. рис. 20в). Я не отрицаю возможности такой интерпретации, но она должна быть обоснована. Сложный состав водно-солевых включений (присутствие LiCl, MgCl₂, CaCl₂, KCl) не может быть установлен на основании одной температуры плавления, можно только определить, что система отличалась от системы NaCl-H₂O и обозначить возможную дополнительную фазу.

Большое внимание в работе уделено полифазным включениям в гранатах, содержащих большое количество карбонатных фаз и низкотемпературных силикатов (пирофиллит). Переменное количество карбонатных и силикатных минералов не позволяет рассматривать их продуктом кристаллизации исходно гомогенной среды. Происхождение подобных включений представляет большую проблему, так как часто они не только полифазные, но и полистадийные. В работе упоминаются эксперименты по гомогенизации таких включений, но результаты таких опытов не приведены.

В пятой главе приводятся данные изотопного анализа карбонатов, как показатели источников флюида в гранулитах Лимпопо. Полученные результаты свидетельствуют о неоднородном источнике CO₂ в гранулитах, включая как глубинный флюид, так и осадочный карбонат.

Шестая глава посвящена экспериментальному и термодинамическому моделированию карбонатсодержащих метаморфических пород. Рассматривается один из главных вопросов работы – при каких условиях могут образоваться гранитные расплавы при плавлении карбонат-содержащих пород и какова их специфика? Расчеты показывают, что выделение флюидных компонентов из карбонатизированных метаультрамафитов происходит при температурах выше, чем параметры пика метаморфизма. Для проверки этого результата проведено экспериментальное исследование соответствующих пород при 600-800°C. Начало выделения флюида в опытах наблюдалось при температуре, превышающей параметры пика метаморфизма. Но реальные условия пика могли быть выше оценок по минеральным

ассоциациям, т.к. наиболее высокотемпературные ассоциации могли не сохраниться при ретроградных изменениях.

Эксперименты по частичному плавлению карбонатсодержащего биотитового гнейса проводились при 6, 10 и 15 кбар. Во всех опытах наблюдался расплав при 800 или 850°C (при 15 кбар), сосуществующий с флюидной фазой. Особенно важны с точки зрения задач исследования составы полученных расплавов. Анализы показывают, что вблизи солидуса образуются недосыщенные щелочные расплавы, а при увеличении температуры составы смещаются в поле гранитов. Надо отметить, что выбранная для экспериментов система очень сложная, и полученные результаты можно рассматривать как основу для более систематического исследования. Образование реакционных структур и некоторые особенности состава минералов указывают на то, что в опытах могло достигаться только локальное равновесие. В частности, образование волластонита и высококальциевых клинопироксенов при 800°C и 6 кбар могло быть следствием разложения кальцита и локального развития метастабильных фаз. Результаты анализа близосолидусных расплавов надо воспринимать с осторожностью. Во-первых, анализ тонких пленок на зонде может приводить к захвату соседних фаз (в частности, это может быть причиной очень высокого содержания Al в анализах – до 30 мас %). Во-вторых, в расплавах с низкими содержаниями SiO₂ могут проявляться закалочные эффекты, приводящие к изменению состава стекла вблизи кристаллических фаз. В-третьих, близосолидусные расплавы в карбонат- и водосодержащих материалах могут иметь карбонатно-силикатный состав. К сожалению, составы расплавов в таблице приведенные к суммам 100%, и содержание летучих в расплаве даже приблизительно не известно. Не удивительно, поэтому, что термодинамические расчеты не воспроизводят образование низко-Si расплава вблизи солидуса.

В небольшой по объему главе 7 рассматривается в основном возможность образования двупироксеновых гранитов и роли углекислоты в этом процессе. Используя полученные экспериментальные данные, а также результаты других исследователей, автор

приходит к выводу, что магмы пироксенсодержащих гранитоидов комплекса Лимпопо могли формироваться за счет плавления сравнительно богатого SiO_2 карбонатсодержащего источника. Геологические данные не противоречат такому предположению, хотя, конечно, не исключены другие варианты (включая процессы гибридизма).

Наиболее важные результаты исследований обобщены в выводах и четырех защищаемых положениях. Первое защищаемое положение и соответствующий вывод является наиболее уязвимым. В принципе, возможно образование полифазных карбонатно-силикатных включений вследствие взаимодействия флюидов с гранатом, но в рассматриваемом случае механизм образования остается неясным. Прямая кристаллизация из захваченного флюида вряд ли возможны из-за низкой растворимости силикатных компонентов в богатом CO_2 флюиде. Взаимодействие гомогенного граната с флюидом и расплавом скорее всего даст изменения по краям зерен и вдоль трещин. Образование изолированных включений требует присутствия каких-то исходных кристаллических включений, подвергавшихся переработке под действием флюида. Остальные защищаемые положения и выводы не вызывают возражения.

Оценивая работу, как квалификационную, следует отметить что А.С. Митяев продемонстрировал владение на высоком уровне разнообразными современными подходами к исследованию петрологических объектов. Широкий спектр применяемых методов вызывает уважение. Помимо традиционных геологических, петрографических и минералогических исследований, автор применяет методы изучения включений в минералах, высокобарический эксперимент, термодинамические расчеты на основании современных программ минимизации свободной энергии. Надо сказать, что многие из высказанных выше замечаний и недостатков связаны с широтой исследования. Трудно за короткое время вникнуть во все тонкости применяемых подходов, а также исчерпывающе изложить их в диссертации. Поэтому некоторые разделы представляются поверхностными. В частности, автор практически не обсуждает точность получаемых данных и оценок, а в научном

исследовании оценки точности зачастую составляют одну из главных задач. Рассматривая научную сторону исследования, можно заключить, что представленная работа является законченным научным исследованием, результаты которого важны для развития геохимии и петрологии магматизма и метаморфизма и вносят значительный вклад в решение актуальной научной проблемы. Высказанные замечания носят во многом рекомендательный характер не снижают общей высокой оценки исследования. Работа А.С. Митяева отвечает всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, и автор, несомненно, достоин присуждения искомой степени по специальности 1.6.3 Петрология, вулканология. Опубликованные работы и автореферат диссертации в достаточной степени отражают содержание работы.

Главный научный сотрудник
Института геологии рудных месторождений,
петрографии, минералогии и геохимии РАН
доктор геолого-минералогических наук

Гирнис Андрей
Владиславович

119017 Москва, Старомонетный пер. 35
тел. (499)2308415
e-mail: girnis@igem.ru; girnis@bk.ru
12 апреля 2023г.

