

**ОТЗЫВ официального оппонента**  
**на диссертацию на соискание ученой степени**  
**кандидата геолого-минералогических наук**  
**Бенделиани Александры Алексеевны**  
**на тему: «Взаимодействие перидотита и материала океанической коры в**  
**условиях мантии Земли: результаты экспериментов»**  
**по специальности 1.6.3 – «Петрология, вулканология»**

Диссертационная работа Александры Алексеевны Бенделиани посвящена установлению фазовых отношений и межфазового распределения элементов в многокомпонентных системах при давлениях и температурах моделирующих субдуцирование океанических осадков на мантийные глубины, а также воспроизводящих условия взаимодействия транспортируемого слэбом осадка и мантийного перидотита. Задачами основной части работы является установление особенностей реакций образования водосодержащих фаз, границ их стабильности, а также выявление минералов-индикаторов корово-мантийного взаимодействия в условиях мантии Земли. Вторая часть работы посвящена экспериментальному моделированию условий образования высокобарных слюд в ходе реакционного взаимодействия между перидотитом/базальтом и богатым калием водно-карбонатным расплавом при P-T параметрах верхней мантии Земли. Задачами этой части является определение возможности реконструкции минеральных парагенезисов и источника метасоматического агента по концентрациям и особенностям кристаллохимии примесей хрома и титана в слюдах.

Актуальность цели и задач работы не вызывает сомнений, поскольку они направлены на решение важнейших проблем мантийной петрологии и геохимии - создания количественной модели корово-мантийного взаимодействия и реконструкции глубинных циклов летучих. Основные

задачи работы чётко сформулированы и непосредственно связаны с поставленной целью.

Экспериментальный и аналитический материал, полученный в рамках решения каждой из задач, послужил основанием для формулировки положений, выносимых на защиту. В защищаемом положении 1 обоснована последовательность фазовых превращений в ходе взаимодействия мантийного вещества с материалом субдуцированного на мантийные глубины океанического осадка. С увеличением давления такое взаимодействие должно приводить к исчезновению полиморфов  $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$  и образованию серии глиноземистых водосодержащих фаз, емкость по содержанию воды которых растет с ростом давления. В защищаемом положении 2 обосновано, что составы высокобарных фаз могут являться индикаторами состава протолита. На наличие коровой составляющей в мантийных породах может указывать низкое отношение  $\text{Cr/Ti}$  и компонентный состав бриджманита, граната, пироксена, фазы D и Egg. В защищаемом положении 3 на базе анализа механизмов вхождения во флогопит ионов  $\text{Ti}^{4+}$  и  $\text{Cr}^{3+}$  дается обоснование того, что содержание примесей хрома и титана в высокобарных слюдах должны определяться долей корового вещества в областях развития метасоматоза в верхней мантии. Резкое увеличение доли корового материала в таких областях может препятствовать образованию флогопита. Все защищаемые положения обладают научной новизной и обоснованы полученными данными.

Список публикаций по теме диссертации содержит 7 статей в ведущих международных и отечественных рецензируемых журналах, индексируемых в интернет-ресурсах Web of Science и Scopus и имеющих высокий импакт-фактор. Таким образом, качество и количество публикаций автора по теме работы соответствует требованиям, предъявляемые к кандидатской диссертации.

В главе 1 приведен обзор литературных данных, касающихся как анализа признаков корового материала в алмазах (образовавшихся в



диапазоне глубин от астеносферы до нижней мантии), так и результатов экспериментов в модельных водосодержащих системах, направленных на реконструкцию процессов корово-мантийного взаимодействия. Обзор очень подробный. Возможно, его объем (с 9 по 30 страницу) чрезмерно велик в сравнении с размером всей работы (106 страниц). В качестве замечания хотелось бы отметить следующее. На мой взгляд в обзоре недостаточно внимания уделено анализу информации о термических режимах как в зонах субдукции, так и в прилегающей мантии.

В главе 2 приведены данные о методиках эксперимента и анализа полученных образцов. Наиболее детально раскрыта методика экспериментов с использованием многопуансонных аппаратов высокого давления типа Kawai Orange. Заметно менее детально рассмотрена методика экспериментов на установке высокого давления НЛ-13Т типа «наковальня с лункой». Описаны подходы, использованные при подготовке стартовых составов и методики изучения экспериментальных образцов. При прочтении этой главы остались не раскрыты некоторые важные детали использованных методик. В экспериментах на аппарате Kawai Orange использовали ампулы из Re. В тексте нет обоснования почему был сделан такой выбор. Рений очень тугоплавкий металл, к тому же его твёрдость сильно возрастает из-за наклёпа. Он может окисляться при взаимодействии с образцами. Фиксировали ли в экспериментах  $\text{ReO}_2$ ? Нет информации каким образом Re ампулы герметизировались. Делалась ли калибровка давления в аппарате «наковальня с лункой» при высокой температуре? Отсутствуют данные о том, в какие ампулы помещали образцы для экспериментов на этом аппарате. Водосодержащие образцы размещались непосредственно в полость в центре графитового нагревателя? Если это так, то необходим анализ как менялась активность воды в водосодержащих флюидах/расплавах в процессе эксперимента.

В главе 3 приведены данные по экспериментальному моделированию взаимодействия в системах GLOSS и GLOSS–перидотит в диапазоне

давлений 7-24 ГПа и температур 900-1400 °С. Глава, в целом, очень детальная, хорошо иллюстрированная и с большим количеством уникального фактического материала. В ней рассмотрены фазовые отношения в изученных системах, приведены данные об особенностях состава полученных фаз. Проанализирован характер химической зональности, возникающей при взаимодействии GLOSS–перидотит. Хотелось бы особенно отметить прекрасный уровень анализа состава синтезированных фаз, характерный, в целом, для всей работы.

Приведенный материал дает достаточно полную картину взаимодействия в изученных системах. Тем не менее, у меня есть ряд вопросов и замечаний. В главе не хватает анализа степени равновесности фазовых ассоциаций, полученных в системе GLOSS. Этот вопрос актуален, поскольку длительность экспериментов не превышала 3 часа, что при температуре 900-1200 °С может быть недостаточно для установления равновесия. Это важно, поскольку полученные в системе GLOSS ассоциации, в последующем используются в качестве базовых для сравнения с результатами реакционного взаимодействия в системе GLOSS-перидотит. Для полноты информации о фазовых ассоциациях в системах необходимо не выделение набора закалочных фаз (как, например, это сделано в Таблице 6), а именно фиксация набора стабильных при P-T параметрах эксперимента твердых фаз и расплава/флюида. Было бы очень интересно реконструировать состав расплава, который при закалке превратился в закалочный агрегат. В тексте встречаются термины - матрикс, матрица и закаленная масса, богатый летучими агрегат, но их значение остается не ясным. Также не ясно участвовал ли расплав или флюид в реакционном взаимодействии между слоями в сэндвич-образцах при давлении более 7 ГПа. Судя по Рис. 7 его в большей части образцов не было. Этот вопрос очень важен как в плане определения потенциальной возможности генерации кимберлитоподобных расплавов в таких обстановках, так и возможного возникновения барьера для глубинной субдукции углерода (например, как предполагается в работе



(Thomson et al., 2016). В конце раздела 3.1 и в разделе 3.3 есть упоминание о просачивании богатого кальцием карбонатного расплава из зоны осадка в перидотитовую часть образцов 2166-2 и 3429-2. Однако систематического обсуждения этих данных нет.

В главе 4 приведены данные по экспериментальному и теоретическому моделированию условий образования флогопита с примесями хрома и титана. Экспериментальная часть выполнена при давлении 7 ГПа и 900–1200 °С в системах перидотит +  $K_2CO_3$  +  $Cr_2O_3$  +  $H_2O$  и базальт +  $K_2CO_3$  +  $TiO_2$  +  $H_2O$ . В этой главе также не хватает анализа степени равновесности полученных образцов. Это на мой взгляд очень важно, так как длительность экспериментов при температурах 900-1200 °С не превышала 60 минут. В таблице 8 закаленный расплав уже есть в фазовых ассоциациях. Однако, в тексте не достаёт анализа различий между закалочными и стабильными при параметрах экспериментов флогопитами. Представленные на рисунке 12 BSE изображения, по-видимому, свидетельствуют о сложной мозаике из закалочных и стабильных при P-T параметрах экспериментов флогопитах. При P-T параметрах близких к использованным автором, размер кристаллов флогопита, образующихся при закалке водосодержащего карбонатно-силикатного расплава, может достигать 100 мкм (Sokol et al., 2017).

Вторая часть главы посвящена анализу результатов атомистического моделирования кристаллических структур Ti и Cr- содержащих флогопитов. Замечаний к этому разделу нет в силу того, что он находился вне пределов моей компетенции.

В главе 5 приведен детальный анализ результатов проведенных исследований. Из принципиально важных выводов можно отметить следующие. По мнению автора изучение модельной системы GLOSS–перидотит позволило оценить потенциально возможные минеральные ассоциации (с плотными водосодержащими магнезиальными силикатами), характерные для корово-мантийного взаимодействия в условиях предельно возможных количеств воды, транспортируемых на уровни верхней, нижней

мантии и переходной зоны. На основе полученных данных выявлены особенности наследования водосодержащими минералами геохимических признаков перидотитового протолита и корового вещества. Глубина и детальность проработки полученного материала оставляет очень хорошее впечатление. Новые результаты в достаточной мере сопоставлены с опубликованными данными.

К этой главе если и возникают замечания, то только в силу того, что полученные данные весьма актуальны и интересны. На мой взгляд в главе 5 не хватает анализа того как изменяться минеральные ассоциации, если корово-мантийное взаимодействие будет осуществляться при меньшем количестве транспортируемой слэбом воды. При температурных режимах, использованных в работе, осадок в ходе субдукции может проходить несколько пиков дегидратации. Первый из них приходится на глубины около 100 км, а второй - 200-250 км. Фактически второй пик дегидратации, автор и зафиксировал в системе GLOSS при 7 ГПа и 900 °С, не обнаружив в образце среди стабильных фаз фенгита. Если образовавшийся при этих параметрах сверхкритический флюид покинет слэб, то его верхняя, наиболее горячая часть, окажется полностью безводной. Недостаточно места в главе 5 уделено анализу состава расплава/флюида, который может образоваться при корово-мантийном взаимодействии в условиях верхней, нижней мантии и переходной зоны. Возникает ряд вопросов, по-видимому, уже для будущих работ автора. Где находится область стабильности карбонатных расплавов в таких условиях? Стабильны ли DHMS фазы в присутствие карбонатных расплавов?

В целом, замечания к работе не умаляют значимости диссертационного исследования, выполненного на высоком научном уровне. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.6.3 – «Петрология, вулканология» (по геолого-минералогическим наукам), а также



критериям, определенным пп. 2.1–2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, и оформлена согласно приложениям № 8, 9 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Бенделиани Александра Алексеевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.3 – «Петрология, вулканология».

**Официальный оппонент:**

доктор геолого-минералогических наук,  
главный научный сотрудник  
ФГБУН Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского  
отделения Российской академии наук

СОКОЛ Александр Григорьевич



подпись

подписания

26.04.2023

Контактные данные:

тел.: +7(383) 330-75-01, e-mail: sokola@igm.nsc.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация:

25.00.05 – минералогия, кристаллография

Адрес места работы:

630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, ИГМ СО РАН

Тел.: +7(383) 330-75-01; e-mail: sokola@igm.nsc.ru

Подпись сотрудника ...  
ОРГАНИЗАЦИИ И.О. Фамилия  
руководитель/кадровый раб

*Сокора А.Г.*



И.О. Фамилия

дата 26.04.2023