

Отзыв официального оппонента на диссертацию **Асафова Евгения Владимировича "Условия образования и кристаллизации коматиитов"**, представленную на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.09 – геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых

Условия образования коматиитов – одна из наиболее интригующих проблем петрологии и геохимии мантийного магмообразования. Несмотря на то, что эти необычные высокомагнезиальные вулканиты вот уже 50 лет являются объектом пристального внимания геологов, многие вопросы генезиса и эволюции первичных магм остаются спорными. Это касается состава первичных магм и источников, глубины и температурного режима выплавления, содержания летучих компонентов и др. Среди этих вопросов, режим летучих компонентов является в настоящее время, пожалуй, наиболее важной проблемой, имеющей прямое отношение к моделированию эволюции термального режима мантии Земли, оценке однородности мантийных источников и образованию архейской коры. Поэтому исследование расплавных включений в минералах коматиитов из разных регионов, предпринятое Е.В. Асафовым, является в высокой степени актуальным. Применение современных методов физико-химического исследования позволило автору рассмотреть вопросы происхождения коматиитовых расплавов на количественной основе и выделить специфические особенности коматиитовых разного возраста и географического положения. Практическая значимость работы связана с тем, что коматиитовые магмы могут переносить значительные количества ценных элементов (Ni, Cr и др.), вплоть до образования рудных месторождений.

Диссертация состоит из Введения (оно же – первая глава) и 8 глав, в которых приводятся основные результаты исследований природных образцов и рассматриваются модели образования и эволюции коматиитовых магм. Структура работы хорошо продуманна, методы и результаты изложены четко и подробно, диссертация снабжена обстоятельным литературным обзором. Во вводной главе ставится задача исследований и кратко очерчена научная новизна и наиболее существенные достижения.

Во второй главе приводится обзор предшествующих исследований. Рассматриваются в первую очередь минералогические и геохимические данные, имеющие непосредственное отношение к проблемам, рассматриваемым в работе. Обзор свидетельствует о достаточно глубоком знакомстве с литературой по коматиитам. С большинством выводов, приведенных в этой главе, можно согласиться. Но обобщение опубликованных материалов по минералогии и геохимии коматиитов может привести к еще одному важному предположению. Имеющиеся данные согласуются с возможностью широких вариаций условий генерации первичных магм и

содержаний воды в первичных коматиитовых магмах. Это предположение подчеркивает потенциальную значимость исследования коматиитов разного возраста и географического положения в рамках единого набора аналитических и теоретических методов.

Есть некоторые замечания к данной главе. Спинифекс – это структура, а не текстура. При определении границ состава коматиитов ( $>18$  мас % MgO) обязательно надо указывать, что имеется в виду состав, пересчитанный на остаток без летучих. Линии оливинового контроля (рис. 7) не являются прямолинейными, поскольку состав выделяющегося оливина меняется при кристаллизации. Поэтому пересечения прямолинейных аппроксимаций с составами оливина на рис. 7 отражают некоторый средний состав оливина, а не самый магнезиальный.

Третья глава посвящена методам исследования. Проводилось выделение мономинеральных проб слабо измененных кристаллов оливина, в которых были обнаружены расплавные включения. Надо сказать, что ненарушенные расплавные включения в оливине коматиитов встречаются крайне редко, поэтому выделение большого количества зерен оливина с включениями является выдающимся достижением и требовало кропотливой работы. Важной особенностью применяемого подхода является гомогенизация включений при высокой температуре. Это существенно, поскольку природная закалка включений приводит обычно к химической гетерогенности материала и систематическим ошибкам при определении состава захваченного расплава. В целом экспериментальные и аналитические методы описаны достаточно полно. Можно отметить некоторые неточности в описании. Снижение давления во включениях является следствием не более высокой плотности оливина, а, в первую очередь, кристаллизации оливина на стенках включений, поскольку эта реакция имеет отрицательный объемный эффект. В отсутствие кристаллизации оливина, давление внутри включения контролируется сжимаемостью и коэффициентом термического расширения расплава и оливина. При небольшом количестве измерений доверительный интервал может быть шире, чем два стандартных отклонения при 95% уровне вероятности. Поэтому приводимые погрешности микрозондового анализа (напр., стр. 53) представляются излишне оптимистичными. Это же касается и оценки погрешностей анализа включений методом LA ICP MS. Аналитические ошибки для стекол включений не могут быть такими же, как погрешности анализа аттестованных стандартных стекол.

Основные результаты исследований коматиитов из зеленокаменных поясов Белингве (2.7 млрд. лет), Абитиби (2.7 млрд. лет) и Барбертон (3.3 млрд. лет) представлены, соответственно, в главах 4–6. Объектами исследования служили специально обобранные наиболее свежие образцы коматиитов. Описание результатов построено однотипно. Вначале приводится краткая геологическая характеристика зеленокаменных поясов и коматиитовых тел на основании литературных данных. Далее следует описание петрографии и минералогии пород, причем

особое внимание уделяется реликтовым магматическим оливинам и шпинели. Эти данные сочетают литературные сведения и наблюдения автора. Далее следуют оригинальные результаты исследования включений в оливине, на основании чего проводятся оценки содержаний летучих компонентов в расплавах, а также температуры, летучести кислорода и давления при кристаллизации расплавов.

Эти данные являются основной ценностью работы и определяют ее уникальное положение среди исследований включений в магматических минералах коматиитов. Впервые получен столь большой и представительный массив данных по составам законсервированных расплавов из коматиитов, включая содержания летучих компонентов. Отметим некоторые наиболее интересные и неожиданные результаты. Мольная доля форстерита в оливинах из коматиитов пояса Барбертон достигает 0.955. При этом высокие концентрации Са и Сг в оливине исключают метаморфическое изменение состава оливина. Насколько мне известно, это наиболее магнезиальные магматические оливины, обнаруженные в коматиитах к настоящему времени. Особенно ценно, что эти составы сочетаются с измеренными составами расплавов, из которых кристаллизовались оливины. Обращает на себя внимание сравнительно низкие содержания MgO в расплавах при таких высоких магнезиальностях оливина. Это является следствием невысокого содержания FeO в расплавах. Это обстоятельство заслуживает внимание, поскольку существует положительная корреляция между содержанием FeO в расплаве и условиями генерации расплава. Ковариации главных элементов с MgO согласуются с ведущей ролью кристаллизации оливина при эволюции состава расплава (оливиновый контроль). Необычный состав имеют расплавы из включений в наиболее древних коматиитах Барбертона. Из литературы известно присутствие Al-обедненных коматиитов в этом зеленокаменном поясе, но проанализированные включения являются Al-обогащенными, судя по отношению  $Al_2O_3/TiO_2$ . Содержания воды в расплавных включениях существенны, но в большинстве случаев не превышают 1 мас %. Для первичных расплавов получены следующие содержания воды: ~0.2 мас % для коматиитов Белингве и Барбертона и 0.6 мас % для коматиитов Абитиби. Этот результат очень важен. С одной стороны, он согласуется с гипотезой горячих коматиитовых магм, поскольку нет никаких свидетельств присутствия расплавов с содержанием  $H_2O$  порядка нескольких процентов. С другой стороны, несмотря на сходство геохимических характеристик, установлены значительные вариации содержаний  $H_2O$  и отношений  $H_2O$  к другим некогерентным элементам (напр.,  $H_2O/Se$  меняется от 1018 для Белингве до 6500 для Абитиби). Это означает, что гипотеза существования "мокрых и холодных" коматиитовых расплавов не может быть отвергнута, поскольку вполне вероятно, что существовали коматиитовые расплавы с еще более высоким содержанием  $H_2O$ . Для всех коматиитов получены невысокие давления кристаллизации, соответствующие первым сотням

бар. Надо сказать, что переход от этих давлений к глубинам представляется недостаточно продуманным, поскольку излияния расплавов могли происходить в глубоководных условиях (100 бар соответствует глубине воды ~1 км).

Переходя к замечаниям, отмечу, чего не хватает в описании результатов. Во-первых, в работе приводится мало фотографий расплавных включений. Учитывая редкость таких объектов, а также то, что большинство исследователей коматиитов слабо представляют себе, как выглядит первичное расплавное включение, было бы полезно привести больше иллюстраций. Во-вторых, при обсуждении вариаций главных элементов по какой-то причине игнорируется железо. Между тем, поведение железа в коматиитах достаточно информативно, в частности, для оценки характера кристаллизационной дифференциации. Кроме того, имеются два общих замечания к применяемому автором подходу для оценки составов и условий кристаллизации магм. Оба связаны с тем, что проводимые оценки, как правило, явно или неявно основаны на предположении о равновесии расплава с минералом-хозяином в отношении главных и редких элементов. Для быстро кристаллизующихся магм это условие требует обоснования. Это же относится к расчетам давления кристаллизации на основании флюидных систем. При быстрой кристаллизации дегазация может быть неполной вследствие конечных скоростей нуклеации и роста пузырей флюида. В таком случае, оценки давления могут быть завышены. С другой стороны, короткое время опытов (5 мин) может быть недостаточным для установления химического равновесия расплава во включении с минералом-хозяином. Автор отмечает возможность неполного растворения дочерней шпинели во включениях, но дочерний оливин на стенках включений также мог растворяться не полностью. В результате магнизиальность расплава может оказаться заниженной, и состав закаленного расплава внутри включений может быть неоднородным. Возможно, влияние этих факторов не существенно, но эти проблемы следовало обсудить.

Глава 7 посвящена результатам определения изотопного состава водорода в расплавных включениях. Такие данные получены для расплавных включений в коматиитах впервые. Выявлено сложное поведение изотопной системы, в частности фракционирование при диффузии водорода через стенки включений. Это потребовало корректировки для определения первичного изотопного состава. Полученные  $\delta D$  значения характеризуются значительной неопределенностью, но в то же время позволяют предполагать глубинный (мантийный) источник воды в коматиитовых расплавах.

Восьмая глава — Обсуждение — посвящена разным аспектам интерпретации полученных данных и определения количественных характеристик коматиитового магматизма. Обсуждается возможность контаминации расплавов, оценивается влияние этого процесса на составы включений и необходимость внесения соответствующих поправок при оценке составов

первичных расплавов. Такие оценки проведены для всех исследованных комплексов, используя составы включений в наиболее магнезиальных оливинах. (По какой-то причине в диссертации нет таблицы сопоставления составов рассчитанных первичных расплавов, поэтому приходится ориентироваться на текст и рисунки.) Установлены заметные различия в составах первичных расплавов по MgO и содержаниям летучих компонентов. Надо отметить, что различия первичных расплавов по содержанию MgO (от 28 мас % для Белингве до 33 мас % для Барбертона) основываются на разных составах наиболее магнезиальных оливинов. Нельзя исключить, что наиболее магнезиальные оливины в коматиитах Белингве не сохранились или не содержат расплавные включения. Более интересны различия трендов дифференциации для ряда элементов, включая SiO<sub>2</sub> (расплавы Барбертона наиболее кремнеземистые), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO и TiO<sub>2</sub> (расплавы Барбертона обеднены всеми этими элементами). Другой важный результат – существенное обогащение первичных магм Абитиби H<sub>2</sub>O и обеднение Cl по сравнению с другими коматиитами. Показано, что оценки содержаний воды в расплавах согласуются с оценками температур на основании Sc/Y отношения, и существенная контаминация расплавов возможна только на поздних стадиях кристаллизации.

Установлено, что первичные расплавы коматиитов всех комплексов обогащены водой, хлором и фтором по сравнению с первичными расплавами базальтов срединно-океанических хребтов. Автор приходит к выводу, что обогащение летучими компонентами – характерная черта источников коматиитов. Оценки потенциальной температуры мантийных источников показывают, что все первичные расплавы коматиитов образовались в мантии, нагретой примерно на 150°C относительно средних температур архейской мантии. На основании этого делается вывод о плюмовом источнике коматиитов. Оценки давлений генерации первичных магм широко варьируют от 7 до 10.5 ГПа. При обсуждении причин обогащения коматиитовых расплавов летучими компонентами рассматриваются две модели: обогащение в зонах субдукции и плавление обогащенного летучими материала в переходной зоне мантии. Автор отдает предпочтение второй модели, хотя образование в переходной зоне обогащенных летучими перидотитов с обедненными геохимическими характеристиками (типа источника MORB) представляет определенные трудности.

Выводы, к которым приходит автор в результате анализа полученных данных и физико-химических оценок, являются в большинстве случаев достаточно обоснованными. Наиболее существенные новые результаты обобщены в защищаемых положениях, на которых мы сейчас коротко остановимся. Первое положение касается оцененных содержаний MgO в первичных расплавах коматиитов. Учитывая, что критическим параметром является состав наиболее магнезиального оливина в породах, эти оценки можно считать минимальными. Во втором положении устанавливаются повышенные содержания летучих компонентов во всех изученных

коматиитовых расплавах и обогащение источников расплавов летучими компонентами. Этот вывод является центральным в работе, и его обоснованию уделено значительное внимание. Третье положение является обобщением количественных оценок температур и давлений в зоне генерации первичных магм. Надо отметить, что степени плавления связаны с предполагаемым составом источника, что делает оценки неопределенными. В частности, предполагается, что состав источника коматиитов Барбертона отличались повышенной степенью обеднения, поэтому для них оценки степени плавления могут быть завышенными. Четвертое положение основано на оценках условий кристаллизации расплавов в коровых условиях. Поскольку определяются только максимально возможные глубины и давления кристаллизации магм, данное положение не вызывает возражений. Но надо иметь в виду, что лавовая природа коматиитов указывает на то, что кристаллизация происходила, вероятно, на меньших глубинах в подводных условиях. Таким образом, с некоторыми оговорками, все положения могут считаться достаточно обоснованными собственными данными и анализом обширной литературы.

В заключение, оценивая работу, как квалификационную, следует сказать, что Е.В. Асафов продемонстрировал владение на высоком уровне комплексом сложных экспериментальных и аналитических методик. Это позволило ему всесторонне охарактеризовать сложные геологические объекты и получить интересные петрологические и геохимические данные. Рассматривая научную сторону исследования, следует отметить четкую постановку задач, грамотное планирование исследований и обоснованность выводов. Представленная работа является законченным научным исследованием, результаты которого важны для развития геохимии и петрологии архейского магматизма и вносят значительный вклад в решение актуальной научной проблемы. Большинство замечаний, приведенных в отзыве, можно считать пожеланиями к дальнейшим исследованиям, и они не снижают общей высокой оценки исследования. Работа Е.В. Асафова отвечает всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, и автор, несомненно, достоин присуждения искомой степени по специальности 25.00.09 «геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых». Автореферат и опубликованные работы в достаточной степени отражают содержание работы.

Главный научный сотрудник ИГЕМ РАН

докт. геол.-мин наук

25 декабря 2018г.

А.В. Гирнис

