

УТВЕРЖДАЮ

и.о. Директора Федерального
государственного бюджетного учреждения
науки «Институт геологии и минералогии
им. В.С. Соболева СО РАН»

д.г.-м.н. В.Н. Реутский



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН» на диссертацию Асафова Евгения Владимировича «Условия образования и кристаллизации коматитов», представленную на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.09 – геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых.

Работа Асафова Е.В. посвящена выяснению условий образования и кристаллизации наиболее магнезиальных магматических пород земли – архейских и раннепротерозойских коматитов. Наибольший интерес эти породы вызывают чрезвычайно высокими температурами изливающихся магм, при этом необходимо отметить, что в современном магматизме коматиты представлены крайне ограничено.

Актуальность работы не вызывает сомнений так как дискуссии о происхождении и эволюции столь уникальных расплавов ведутся по сей день. Основной сложностью при изучении коматитов является их древний возраст и связанная с этим проблема поиска наименее измененных пород. Наиболее дискуссионным вопросом в образовании коматитов является геодинамические условия их проявления. Одни авторы считают, что коматиты являются проявлением плутонового магматизма, другие же считают, что они связаны с субдукционными процессами. Ключевым моментом для ответа на этот вопрос являются корректные оценки температур, давлений и содержания воды в родоначальных расплавах. Именно этому и посвящена данная работа.

Главной отличительной чертой диссертации является использование расплавных включений в неизмененных ликвидусных оливинах. Фактически, именно включения первичных расплавов могут дать уникальную информацию о условиях образования и кристаллизации первичных расплавов, что и было в полной мере использовано автором в представленной работе.

Основной целью данной работы является определение условий кристаллизации ликвидусных оливинов в разновозрастных раннедокембрийских коматитах (ликвидусных температур, давлений, фугитивности кислорода), а также геохимического состава родоначальных расплавов и содержания в них летучих компонентов, включая воду.

Для достижения поставленной цели автором решался большой цикл задач по определению главных, примесных элементов и летучих компонентов в расплавных включениях во вкрашенниках оливина. Отдельное внимание уделялось отбору наименее измененных образцов коматитов и их пробоподготовке. Детально изучался состав минералов вкрашенников самыми современными методами с использованием новейших методик, которым удалена отдельная глава в работе. Эксперименты по гомогенизации

позволили получить однородную стекловатую массу в расплавных включениях, что необходимо для точного анализа и интерпретации захваченных расплавов. Автором применялись известные физико-химические методы определения условий кристаллизации и образования исследованных коматитов. Анализ образцов производился с помощью набора методов. Оливин и шпинель в шлифах и расплавные включения в оливине были исследованы на электронном зонде на содержания главных элементов. Также с помощью этого метода были получены данные по Cl и S в захваченных расплавах. Летучие компоненты в расплавных включениях анализировались с помощью ионного зонда. Были получены данные о содержаниях CO₂, H₂O, F, Cl и S в захваченных расплавах. В отдельной серии расплавных включений был проанализирован изотопный состав водорода. Составы примесных элементов в расплавных включениях и оливине-хозяине были получены с помощью масс-спектрометрии с индуктивно связанный плазмой и лазерной абляцией. Полученные данные по расплавным включениям были обработаны с помощью программы Petrolog (Danyushevsky and Plechov, 2011), чтобы учесть кристаллизацию оливина на стенках включений и диффузионную потерю Fe из включений в оливин и скорректировать состав до равновесия с составом оливина.

В основу диссертации положен уникальный фактический материал разновозрастных коматитов Канады, Зимбабве и ЮАР. При этом необходимо отметить, что отбор образцов на объектах Канады и ЮАР автором производился самостоятельно. Несколько тысяч анализов включений и минералов полученные автором, являются отличной основой для выполненной работы.

Научная новизна проделанной работы не вызывает сомнения. Автором впервые установлены содержания летучих компонентов, включая воду, в первичных расплавах неоархейских коматитов Зимбабве и Канады и палеоархейских коматитов ЮАР. Проведены первые исследования изотопного состава водорода в расплавных включениях из архейских коматитов. Установлены температуры кристаллизации коматитовых расплавов с помощью ряда классических и наиболее новых независимых геотермометров, что позволило оценить температуры и глубины генерации родонаучальных магм. На основании полученного фактического материала предложена модель взаимодействия мантийных пломов, являющихся источниками коматитовых магм, с переходной зоной мантии, обогащенной водой, хлором и фтором. Наблюдаемый избыток воды, фтора и хлора в первичных расплавах коматитов прослеживается в широком интервале возрастов от 3.3 млрд лет (Барбертон, ЮАР) до 2.7 млрд. лет (Белингве, Зимбабве и Абитиби, Канада), что указывает на возможность наличия этих летучих компонентов в переходной зоне мантии в архейское время.

Работа состоит из 9 глав, иллюстрирована 76 рисунками, приложение содержит 21 таблицу с результатами аналитических исследований. Список литературы включает 223 наименования.

Первая глава включает введение, цели и задачи, личный вклад автора, научную новизну, практическую значимость и апробацию.

В качестве замечания хочется отметить, что «определение содержаний» в качестве цели работы не очень корректно.

Вторая глава представляет собой литературный обзор с описанием имеющихся данных о геохимических особенностях и современных представлениях о генезисе коматитов. Необходимо отметить чрезвычайно скрупулезную и полную проработку автором литературного материала. Приведенный в диссертации обзор по диагностике коматитов, их систематике, геологическим и геохимическим особенностям выполнен на высоком

уровне и может быть полезен при подготовке лекций по петрографии и петрологии. Особо следует отметить проработку дискуссии, касающейся содержания воды в раннедокембрийских коматиитах, что тесно связано с моделями их формирования.

В качестве замечания к этой главе укажем, что коматииты о. Горгона не являются единственным примером фанерозойских коматиитов. Нашиими коллегами в Северном Вьетнаме описаны пермские коматииты в зоне Шонгда (Поляков и др., 1986; Балыкин и др., 2011; Hansky et al., 2004). Эти коматииты связаны с Эмейшаньской крупной изверженной провинцией. В обзоре указывается на присутствие амфиболовых коматиитов, но их характеристики удалено мало внимания, хотя присутствие амфибола указывает на высокие содержания воды при их кристаллизации.

В третьей главе приведено описание методов и объектов исследований. Для квалификационных работ, которую представляет кандидатская диссертация, эта глава является одной из важнейших, которая показывает степень овладения автором современных методов исследований и интерпретаций. Автор достаточно подробно описал применяемые аналитические и расчётные методы, и показал хорошее понимание как принципов получения точных аналитических данных, так и особенностей работы и интерпретации данных полученных с помощью расплавных включений.

Несколько замечаний к материалам данной главы. На наш взгляд не совсем удачно приводить ошибки измерений в формате \pm относительные % (либо %, либо \pm фиксированная величина). Было бы неплохо указать не только ошибки измерений, но и пределы обнаружения для элементов, т.к. автор нередко оперирует достаточно низкими концентрациями элементов, и без пределов обнаружения достоверность этих значений может вызвать сомнение.

Не совсем понятным является выбор автора для названия подглавы «геобарометрия». В ней идет речь о способах оценки фугитивности кислода.

Также осталось совершенно не понятным, что автор подразумевает под скорректированными и нескорректированными данными как в тексте диссертации, так и в названии таблиц. В подглаве «обработка данных» описывается 2 метода коррекции аналитических данных по составам расплавных включений: коррекция на приборный дрифт и коррекция на Fe-Mg обмен между включением и минералом хозяином. Можно только предположить, что под скорректированными данными автор имеет в виду вторую коррекцию.

Главы 4, 5 и 6. Приведены результаты исследования коматиитов Белингве, Абитиби и Велтвреден. Приведено описание геологических данных, петрография образцов, изложены полученные данные по исследованиям оливина, шпинели и расплавных включений в оливине. Также в этих главах приводятся оценки условий кристаллизации расплавов (температуры, давления и фугитивности кислорода).

В качестве общих замечаний к этим главам надо отметить следующие моменты. Для всех исследованных объектов не показано положение проанализированных образцов в разрезах потоков, хотя указывается их принадлежность к кумулятивным образованиям. В то же время то, как далеко эти кумуляты располагаются от подошвы потока или силла сильно зависит время остывания и, следовательно, сохранность зональности оливинов. Кроме того, очень слабо отражены петрографические особенности исследованных образцов. В то же время для выяснения вопросов состава родоначальных магм важное значение является наличие вкрапленников оливина и условия их кристаллизации. Судя по строению потоков,

рассматриваемых в работе, излияние коматитов происходило при наличии вкрапленников оливина. Об этом же свидетельствуют оценки давления их кристаллизации, которые рассчитаны Е.В.Асафовым. В то же время в образце Z6 из коматитов Белингве выделяется две генерации оливинов. Крупные вкрапленники с высокими содержаниями никеля в ядре, четкой зональностью и признаками резорбции, что освидетельствует об их интрапеллурической природе. Вторая генерация оливина представлена мелкими идиоморфными слабозональными оливинами, которые скорее всего кристаллизовались *in situ*.

Возрастание хрома при снижении магнезиальности расплава не обязательно связана с отсутствием кристаллизации хромшпинели на ликвидусе совместно с оливином, как это предполагает диссертант. Возможна совместная кристаллизация оливина и шпинели, но количество последней недостаточно чтобы обеспечить падение концентрации хрома в эволюционирующем расплаве. Этим можно объяснить присутствие включений шпинели во включениях в ликвидусном оливине. То, что они являются дочерними фазами, автором принимается как аксиома, и никак не обосновывается.

Геохимические различия для коматитов Канады вряд ли можно связывать с различиями в геодинамических условиях их проявления или контаминацией коровыми материалами. Подобное сочетание пикритов и базальтов разной геохимической специализации характерно для многих крупных изверженных провинций фанерозоя. Низкотитанистые и высокотитанистые пикриты (меймечиты) установлены для центральных частей Сибирской крупной изверженной провинции. Подобная картина, отражающая взаимодействие глубинного мантийного плюма с литосферной мантией, характерна и для Эмейшаньской LIP. Возможно, что геохимические различия для коматитов Канады как раз подтверждают плюмовую модель генезиса коматитов.

Отсутствуют данные по валовым составам образцов исследованных пород, они не показаны на диаграммах. Практически отсутствует описание изученных расплавных включений, несмотря на то, что именно эта информация является «изюминкой» работы.

В разделе 6.3.4. есть ссылка на «эффект углеродной контаминации, которая может возникать при наличии вскрытой усадочной полости на поверхности включения». Что это за эффект не удалось найти ни в тексте, ни в описании методов исследований.

На рисунке 64 отмечается сильная взаимосвязь воды с размерами включений. Однако некоторую зависимость можно уловить только для образца 1523, для двух других образцов никакой зависимости не наблюдается.

В Главе 7 приводятся данные исследования изотопного состава водорода в расплавных включениях изученных коматитов. Общим замечанием к этой главе стоит отметить абсолютную не иллюстрированность полученных результатов, что явно затрудняет их понимание.

В глава 8 приводится обсуждение результатов, которое включает анализ признаков контаминации и вторичных преобразований изучаемых расплавов, реконструкцию составов первичных магм, независимые оценки воды с помощью геотермометров, обсуждение избыточных концентраций воды и галогенов в родоначальных магмах и их генезис и возможные модели их формирования.

В разделе 8.1 использован не совсем корректный термин «эффект дегазации расплавных включений». По факту речь идет о потере воды расплавными включениями, но термин «дегазации» к этому процессу применять не стоит.

В разделе 8.4 автор допускает несколько противоречащих друг другу высказываний:

На стр.168 «Наблюдаемый избыток H₂O, Cl и F в первичных расплавах коматитов не связан с эффектами контаминации магм коровым материалом» и несколькими строчками ниже автор показывает, что при асимиляции небольшого количества рапы (что вполне вероятно и не вызывает противоречий) «могла произойти при подъеме коматитовой магмы к поверхности и привести к наблюдаемым избыткам воды, фтора и хлора без существенных сдвигов состава по другим компонентам», и в конце раздела снова сделано заключение: «избыточные содержания H₂O, F и Cl в коматитовых магмах связаны с составом мантийного источника и с условиями плавления.»

В разделе 8.5 на стр 174 определены глубины образования коматитовых магм. Эта информация является важнейшей в предлагаемой автором модели. Необходимо было более подробно остановиться на использованной модели с обоснованием оценок глубин магмогенерации.

В разделе 8.7 на рис. 76 абсолютно непонятно, что из себя представляют пунктирные линии.

В качестве общих замечаний можно заметить довольно большое количество орфографических ошибок и описок, использование англоязычных букв на рисунках и в тексте. Подписи к некоторым рисункам не всегда корректны (например, рис 57).

Некоторые подписи к рисункам содержат информацию по интерпретации изображенных данных (рис 59, 64, 75 и др.).

В целом по модели генезиса коматитов наблюдается некоторое противоречие: глубины образования магм очень большие, при этом, как неоднократно отмечает автор, контаминационная способность этих ультрамагнезиальных магм очень высокая. В том числе можно предполагать контаминацию в промежуточных камерах, в которых началась кристаллизация оливина. При этом автор уделил очень много времени и сил обоснованию «неконтаминированности» излившихся коматитов. Каким же в таком случае можно предположить путь наверх этих расплавов? И какова роль взаимодействия мантийного плюма с литосферной мантией?

Защищаемые положения

В работе сформулировано 4 защищаемых положения, касающихся оценок состава и физико-химических условий кристаллизации и генерации первичных магм исследованных коматитов. Доказано, что первичные расплавы коматитов и их мантийные источники характеризуются повышенными содержаниями H₂O и Cl по сравнению с элементами сходной несовместимости с мантийными минералами. Обоснованы высокие степени плавления и глубины генерации коматитовых магм. В целом защищаемые положения обоснованы фактическим материалом. Хотя есть замечания по формулированию 1 и 2 го защищаемого положения: они сформулированы, скорее, как выводы, а не защищаемые положения. Уточнение данных не должно быть защищаемым положением. Так же, как и получение новых данных не должно быть защищаемым положением.

Несмотря на приведенные замечания, автором проделана отличная работа, показывающая его как сформировавшегося исследователя с большим потенциалом. Автор продемонстрировал свою способность к работе со сложным в генетическом и аналитическом планах материалом, владение большим количеством методов исследований минералов и моделирования процессов магмообразования. В работе содержатся материалы

и факты, которые позволяют считать обоснованными все четыре защищаемых положения. Результаты исследования опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК для опубликования результатов диссертационных исследований, в том числе 2 статьи в наиболее престижных международных журналах. Они докладывались на различных международных и отечественных совещаниях. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Все это позволяет заключить, что работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.09 – геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых, а соискатель – присуждения искомой ученой степени кандидата геолого-минералогических наук.

доктор геолого-
минералогических наук,
профессор, главный научный
сотрудник лаборатории
петрологии и рудоносности
магматических формаций

Изох Андрей Эмильевич

кандидат геолого-
минералогических наук, старший
научный сотрудник лаборатории
термобарогеохимии

Кузьмин Дмитрий Владимирович

Отзыв рассмотрен и одобрен в качестве официального на заседании Ученого совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН». Протокол № 1 от 17 января 2019 года.