

На правах рукописи



АСАФОВ ЕВГЕНИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ КОМАТИИТОВ

Специальность:

25.00.09 – геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в лаборатории геохимии магматических и метаморфических пород Федерального государственного бюджетного Учреждения науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской революции Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН).

Научный руководитель: Соболев Александр Владимирович

Академик РАН, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории геохимии магматических и метаморфических пород ГЕОХИ РАН, г.Москва

Официальные оппоненты:

Гирнис Андрей Владиславович, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории геохимии им. академика А.Е. Ферсмана ФГБУН Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, г. Москва

Сафонов Олег Геннадьевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор РАН, директор ФГБУН Института экспериментальной минералогии им. академика Коржинского РАН, г. Черноголовка

Ведущая организация

ФГБУН Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск

Защита состоится « 06 » февраля 2019г. в «11.00» часов на заседании диссертационного совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Д 002.109.02 на базе Федерального государственного бюджетного Учреждения науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской революции Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН) по адресу 119991, Москва, ул. Косыгина, 19 (тел. (495) 939-70-17, факс (495) 938-20-54).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН) и на сайте www.geokhi.ru в разделе Диссертации.

Автореферат разослан «__» _____ 2018г

Отзывы в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения, просим направлять по адресу ГЕОХИ РАН ученому секретарю диссертационного совета Д 002.109.002 Наталье Александровне Мигдисовой. Пожалуйста, продублируйте отсканированный вариант отзыва с печатью и подписью по электронной почте dissovetal@geokhi.ru или nat-mig@yandex.ru. В отзыве необходимо указать: ФИО лица, предоставившего отзыв, рабочий почтовый адрес, рабочий (контактный) телефон, адрес электронной почты, наименование организации, работником которой является указанное

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.109.002

Н.А. Мигдисова

1. Введение

Актуальность

Коматииты - ультраосновные эффузивные магматические породы, содержащие более 18 мас.% MgO и обладающие структурами спинифекс, либо генетически связанные с породами, обладающими такими структурами (Arndt et al., 2008). Коматииты кристаллизовались из высокотемпературных магм с высоким содержанием магния, низкими концентрациями несовместимых элементов, обладающих большим потенциалом к ассимиляции вмещающих пород. Большинство известных коматиитов образовалось из магм, излившихся в архейское время, и расположено в пределах древних кратонов. Единственные из пока описанных фанерозойских коматиитов – эффузивы коматиитового состава с о. Горгона (вблизи Тихоокеанского побережья Колумбии), образовавшиеся в меловой период – приблизительный возраст 90 млн. лет (Echeverria, 1980). С момента открытия условия образования и кристаллизации коматиитов вызвали большой интерес у исследователей. Одним из важных вопросов является петрогенезис коматиитов и роль воды в нем. Эти породы обладают крайне высокими содержаниями MgO и низкими содержаниями несовместимых элементов (деплетированные составы), поэтому преобладающей точкой зрения сегодня является образование коматиитовых магм, связанное с высокими степенями плавления мантии (более 30%) при высокотемпературных и глубинных условиях без существенного участия H₂O (Пухтель и др., 1995, Nisbet et al., 1977, Herzberg, 1992, Walter, 1998, Herzberg, 2004, Puchtel et al., 2013). Альтернативная гипотеза предлагает присутствие значительных количеств H₂O (до 4 мас.%) в петрогенезисе коматиитов и связывает их происхождение с плавлением мантии в субдукционных условиях (Brooks and Hart., 1974, Allegre, 1982, Inoue, 1994, Asahara and Ohtani, 2001, Parman et al., 1997, Barr et al., 2009). Вопрос петрогенезиса остается дискуссионным в связи с отсутствием прямых данных о содержаниях воды в коматиитовых магмах из-за их существенного преобразования вторичными процессами и отсутствия вулканического стекла. Для изучения доступны лишь реликты первичных магматических минералов (Arndt et al., 2008; Гирнис и др., 1987). Неопределенность в содержаниях летучих компонентов в коматиитах препятствует определению глубин образования коматиитовых магм, способа их транспортировки к поверхности, глубин и температур кристаллизации.

В этой работе представлены данные по изучению составов главных, примесных и летучих компонентов расплавных включений из оливина, нетронутых процессами вторичного преобразования и сохранивших информацию о составах родоначальных магм

коматиитов. Получены первые данные по изотопному составу водорода в расплавных включениях архейских коматиитов. Проведена реконструкция составов первичных магм, условий их образования и кристаллизации. Предложена модель формирования коматиитовых магм в архейском мантийном плюме. Отобранная коллекция образцов включает коматииты палеоархея и неоархея, отвечает продолжительному периоду эволюции Земли и дает представление о роли летучих компонентов в этот период истории планеты.

Цели и Задачи

Цели:

Целью данной работы является определение содержаний главных и примесных элементов, а также летучих компонентов в родоначальных магмах коматиитов, определение температуры и глубины образования и кристаллизации магм, оценка составов мантийных источников и роли летучих компонентов в архее.

Задачи:

1. Определение содержаний главных, примесных элементов и летучих компонентов в расплавных включениях во вкрапленниках оливина из серии образцов коматиитов с помощью электронного микрозонда (EPMA), ИСП-МС с лазерной абляцией и ионного зонда (SIMS).
2. Определение состава включений шпинели во вкрапленниках оливина коматиитов методом EPMA.
3. Определение состава (главные и примесные элементы) оливина-хозяина включений расплава и шпинели методами EPMA, ИСП-МС с лазерной абляцией и SIMS.
4. Применение известных физико-химических методов определения условий кристаллизации (температура, давление, летучесть кислорода) и образования (температура, давление, степень плавления, потенциальная температура и состав источника) исследованных коматиитов.

Объекты исследования:

1. Коматииты зелено-каменного пояса (ЗКП) Абитиби, Канада – возраст 2.7 млрд лет. Были изучены три представительных образца оливиновых кумулятов, отобранных во время полевых исследований в 2014г. Образцы были отобраны из типовых коматиитовых обнажений (Ryke et al., 1973) Пайк Хилл (образцы 805 и 810) и Алексо (образец 823).

2. Коматииты ЗКП Белингве, Зимбабве – возраст 2.7 млрд. лет. Были изучены два представительных образца оливиновых кумулятов z6 и z4, отобранных Н. Арндтом вблизи буровой скважины SASKMAR из типового потока Тони Флоу, являющегося частью формации Релаянс (Bickle et al., 1993).
3. Коматииты ЗКП Барбертон, ЮАР – возрастом 3.3-3.5 млрд. лет. Была изучена серия образцов коматиитов, отобранных во время полевых исследований в ЮАР в 2015г. Образцы 1521, 1522, 1523 были отобраны из потоков формации Велтевреден (3.3 млрд. лет, Connolly et al., 2011).

Личный вклад автора

1. Участие в полевых работах в Канаде на зеленокаменном поясе Абитиби и на зеленокаменном поясе Барбертон (ЮАР).
2. Подготовка отобранного каменного материала для изготовления шлифов и проведения различного вида анализов.
3. Отбор мономинеральных фракций оливина и участие в экспериментах по высокотемпературной закалке включений при контролируемой фугитивности кислорода.
4. Подготовка расплавных включений в оливине к исследованиям. Проведение микрозондового, ионно-зондового анализа, а также анализа на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой и лазерной абляцией.
5. Обработка результатов исследования. Применение методов моделирования магматического процесса. Оценка составов родоначальных магм и условий их генезиса и кристаллизации. Анализ полученных данных, обобщение результатов и сравнение с литературными данными.

Научная новизна

1. Впервые установлены содержания летучих компонентов (F, Cl, S, CO₂) в расплавных включениях и первичных расплавах неоархейских коматиитов из зеленокаменных поясов Белингве (Зимбабве) и Абитиби (Канада) – возрастом 2.7 млрд. лет и палеоархейских коматиитов зеленокаменного пояса Барбертон (ЮАР) возрастом 3.3 млрд. лет. Содержания H₂O в расплавных включениях коматиитов впервые определены для коматиитов Абитиби и Велтевреден.
2. Проведены первые исследования изотопного состава водорода в расплавных включениях из архейских коматиитов.
3. Установлены температуры кристаллизации коматиитовых расплавов с помощью независимых геотермометров (Sc/Y равновесие оливин-расплав и Al-равновесие оливин-

шпинель). Впервые проведены оценки температур первичных расплавов архейских коматиитов по Fe-Mg равновесию оливин-расплав с учетом измеренных содержаний H₂O.

4. На основе распределения V между оливином и расплавом впервые определена фугитивность кислорода в расплавных включениях и первичных расплавах архейских коматиитов.

Практическая значимость

Представленная работа является фундаментальным вкладом в решение вопросов происхождения коматиитового магматизма, включающим количественные оценки содержаний главных, примесных и летучих компонентов, первые данные об изотопном составе водорода, информацию о фугитивности кислорода в коматиитовых магмах, различные независимые оценки температур и глубин кристаллизации коматиитов и температуры и давления образования коматиитовых магм. Данные о составах первичных расплавов архейских коматиитов, в том числе, новая информации о содержаниях летучих компонентов, таких как вода, хлор, фтор и углекислый газ, позволяют уточнить модель формирования коматиитов и могут дать представления о роли летучих компонентов в архейский период истории планеты.

Апробация работы

По теме диссертации опубликовано 18 печатных работ, в том числе 4 в журналах РИНЦ, включая 2 статьи в журналах входящих в международные реферативные базы Scopus и Web of Science (1-ый квартиль), рекомендуемых ВАК, и 14 работ в виде тезисов докладов, сделанных автором на различных Российских и международных конференциях и семинарах, в том числе: Генеральная Ассамблея Европейского Союза Геонаук (EGU), Международная геохимическая конференция имени Гольдшмидта (Goldschmidt), Международная школа International School of Earth Sciences, 13 международный платиновый симпозиум (13th Ni-Cu-PGE Symposium), Международная школа International School of Earth Sciences, American Geophysical Union Fall Meeting, European Current Research On Fluid Inclusions (ECROFI).

Структура работы

Работа состоит из 9 Глав. Глава 1 включает введение, в котором сформулирована актуальность проводимого исследования, цели и задачи, указаны личный вклад автора, научная новизна, практическая значимость, апробация и структура работы. В Главе 2 дан обзор литературы и описаны общие сведения о коматиитах, их геохимические особенности

и современные представления об их генезисе. Глава 3 представляет собой описание методов исследования, в ней перечислены объекты исследования, особенности подготовки образцов, аналитические методы и методика обработки данных. В Главах 4-6 приведены результаты исследования коматиитов Белингве, Абитиби и Велтеверден, соответственно. В этих главах приведены геологические данные, 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 Главе 7 приводятся данные исследования изотопного состава Н в расплавных включениях изученных коматиитов. Глава 8 является обсуждением 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. Глава 9 – краткие выводы проведенной работы. В конце работы приведены благодарности, список использованной литературы, список опубликованных работ по теме диссертации, список рисунков, список таблиц и приложения, которые включают таблицы данных по составам минералов, расплавных включений, температур кристаллизации и фугитивности, включая погрешности измерений концентраций элементов (изотопов водорода) и оценок физико-химических параметров.

Диссертационная работа изложена на 335 страницах и состоит из 214 страниц основного текста, который включает 76 рисунков и 121 страницы приложений, которые включают 21 таблицу. Список литературы включает 223 наименования.

Благодарности

Автор выражает благодарность научному руководителю академику РАН Александру Владимировичу Соболеву за руководство работой, обеспечение участия в полевых работах в Канаде, ЮАР и Австралии, создание условий для проведения аналитических работ в ведущих лабораториях Франции (ISTERRE, Grenoble, CRPG, Nancy) и Германии (CAU, Kiel), помощь в интерпретации данных, обеспечение участия в крупнейших международных научных конференциях и симпозиумах (EGU, Goldschmidt, AGU, ECROFI, Ni-Cu-PGE Symposium), внимание и бесценный опыт. Автор благодарит за поддержку и обсуждение работы коллектив лаборатории геохимии магматических и метаморфических пород ГЕОХИ РАН. Автор выражает отдельную признательность В.Г. Батановой за помощь в проведении аналитических сессий на электронном зонде,

А.А.Гуренко за помощь в работе на ионном зонде, обработку и обсуждение результатов, М.В. Портнягину за помощь в проведении аналитических сессий на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой и лазерной абляцией, обработку и обсуждение результатов, С.П. Крашенинникову за помощь в проведении высокотемпературных закалочных экспериментов и В.А. Туркову за помощь в подготовке образцов. Автор выражает благодарность Н.М. Сущевской за консультации и обсуждение результатов, Н.А. Мигдисовой и Д.П. Тобелко за помощь в подготовке и оформлении необходимых к защите документов. Автор благодарит Н. Арндта и А. Вилсона за помощь при проведении полевых работ и сборе каменного материала в Канаде и ЮАР, за обсуждение результатов и помощь в подготовке печатных материалов на английском языке.

Большую поддержку в работе над диссертацией автор получил от своей семьи. Большое спасибо за терпение и заботу моей жене Асафовой Ю.М., отцу Асафову В.А., тете Асафовой Т.А., сестре Асафовой К.В. и другим членам нашего дружного семейства. Работа посвящена светлой памяти М.А. Асафовой.

Работа выполнена при поддержке грантов РНФ 14-17-00491 и РФФИ № 13-05-12110 офи_м и № 17-05-00856.

2. Методы исследования

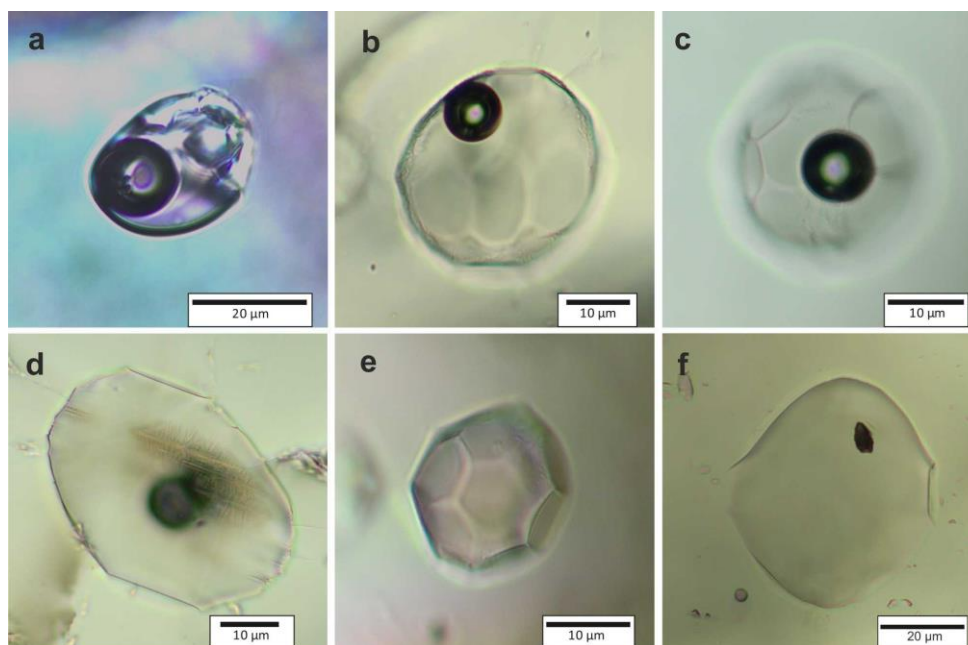


Рис. 1. Микрофотографии расплавных включений в оливине коматиитов Велтевреден. а. Частично раскристаллизованное включение с усадочной полостью до эксперимента по регомогенизации. b,c, d – стекловатые расплавные включения после эксперимента по регомогенизации с усадочной полостью. e,f – полностью гомогенные включения.

Для исследования образцов коматитов была проведена пробоподготовка, которая состояла из нескольких этапов. Часть материала была использована для изготовления прозрачно-полированных шлифов для изучения петрографии и анализов на электронном микрозонде оливина и шпинели. Часть материала с минимальными признаками вторичных преобразований была вручную раздроблена для анализа примесных элементов в растворах. Большая часть материала была раздроблена для выделения монофракций оливина, которые были нагреты и закалены при различных параметрах температуры и фугитивности кислорода для гомогенизации расплавных включений.

Эксперименты по гомогенизации позволили получить однородную стекловатую массу в расплавных включениях, что необходимо для точного анализа и интерпретации захваченных расплавов (Рис. 1). Тем не менее, большинство включений сохранили усадочную полость. В некоторых случаях в расплавных включениях остались кристаллы шпинели.

Электронный зонд. Состав главных элементов в расплавных включениях и оливине-хозяине в эпоксидных шашках и состав сосуществующих оливин-шпинелевых пар в прозрачно-полированных шлифах измерялись с помощью электронного микрозонда (EPMA). Все образцы анализировались с использованием JEOL JXA 8230 в институте ISTERre, Гренобль, Франция. Анализ оливина в прозрачно-полированных шлифах проводился при 15-25 кВ ускоряющего напряжения и силе тока зонда 900 нА. Для анализа зерен оливина в эпоксидных шашках применялись сила тока зонда 300 нА и ускоряющее напряжение 15-25 кВ. Точность получаемых данных контролировалась путем многократного измерения стандартного образца оливина San Carlos olivine USNM111312-44 (Jarosevich et al., 1980) в ходе каждой аналитической сессии. Для анализа состава главных элементов, примесных элементов (титан, калий, марганец, хром и фосфор) и летучих компонентов (хлор и сера) в расплавных включениях было применено ускоряющее напряжение 15 кВ и сила тока зонда 12 нА. Аналитическая точность оценивалась путем включения в измерительную сессию стандартных образцов стекол GOR-132G (Jochum et al., 2006) и VG-2 (Jarosevich et al., 1980). Стандартный образец GOR-132G использовался для калибровки по главным и примесным элементам. Стекло VG-2 использовалось для контроля качества анализа летучих компонентов Cl и S. Количество анализов, выполненных для каждого включения, варьировалось от 1 до 4, в зависимости от размера включения. Ошибки измерений были оценены как стандартные отклонения (при $N > 1$), в случае одиночных анализов, за погрешность анализа принималась приборная ошибка. Погрешности анализа рассчитывались как $\frac{2}{7}$ стандартные ошибки среднего для

индивидуальных включений и зерен (95% доверительный интервал). В среднем ошибки для различных элементов в стеклах составляют в относительных %: $\text{SiO}_2 \pm 0.6\%$, $\text{TiO}_2 \pm 4.0\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \pm 2.7\%$, $\text{FeO} \pm 1.2\%$, $\text{MnO} \pm 6.7\%$, $\text{MgO} \pm 2.2\%$, $\text{CaO} \pm 1.6\%$, $\text{Na}_2\text{O} \pm 6.8\%$, $\text{K}_2\text{O} \pm 14.0\%$, $\text{P}_2\text{O}_5 \pm 57.1\%$, $\text{Cr}_2\text{O}_3 \pm 5.2\%$, $\text{Cl} \pm 8.8\%$, $\text{S} \pm 16.5\%$. Средние ошибки для оливина в относительных % составили: $\text{SiO}_2 \pm 0.5\%$, $\text{TiO}_2 \pm 10\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \pm 5\%$, $\text{FeO} \pm 2\%$, $\text{MnO} \pm 1\%$, $\text{MgO} \pm 0.3\%$, $\text{CaO} \pm 5\%$, $\text{Cr}_2\text{O}_3 \pm 4\%$. Всего в процессе работы на электронном зонде было выполнено около 800 анализов расплавных включений и более 3000 анализов оливина.

Зерна шпинели анализировались в прозрачно-полированных шлифах при ускоряющем напряжении 20 кВ и силе тока зонда 50 нА. Подробное описание приведено в Главе 4.4 диссертации. Типичные погрешности анализа составляли в относительных %: $\text{TiO}_2 \pm 5\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \pm 0.5\%$, $\text{FeO} \pm 0.6\%$, $\text{MnO} \pm 3\%$, $\text{MgO} \pm 0.2\%$, $\text{ZnO} \pm 25\%$, $\text{Cr}_2\text{O}_3 \pm 0.2\%$, $\text{NiO} \pm 5\%$, $\text{MnO} \pm 3\%$. Всего в процессе работы было выполнено более 500 анализов шпинели на электронном зонде.

Ионный зонд. Для анализа содержаний CO_2 , H_2O , Cl , S и F в расплавных включениях использовался масс-спектрометр вторичных ионов CAMECA IMS 1270 E7 (SIMS) в институте CRPG, Нанси, Франция. Для анализа были выбраны расплавные включения, проанализированные ранее с помощью электронного микрозонда. Зерна оливина с расплавными включениями были переполнены для удаления углеродного напыления и перемонтированы из эпоксидной смолы в шашку из индия. При анализе использовался первичный $^{133}\text{Cs}^+$ ионный пучок с силой тока 0.8-1 нА, напряжением 10 кВ, который был сфокусирован в точку 5-10 мкм и растриван на площадь 10x10 мкм. При анализе использовалась 1000 мкм апертура, что позволило отсечь сигнал вторичных ионов с краев анализируемой точки. Для определения калибровочных линий использовался набор стандартов (ALV981-R23, ALV519-4-1, 30-2, 40-2, KL2-G, CY8406-02, VG-2, CLDR01-5, ETNA II-6, ETNA II-7 и San Carlos olivine). Калибровочные линии были использованы для определения содержания летучих компонентов в неизвестных образцах. Точность анализов на ионном зонде была рассчитана как стандартная ошибка для индивидуальных включений и составила 6%–24% для CO_2 , 6%–20% для H_2O , 4%–10% для F , 2%–6% для S и 8%–24% для Cl (2 стандартные ошибки). Всего за время работы было выполнено около 400 анализов летучих компонентов на ионном зонде.

Отдельная серия расплавных включений из коматиитов Абитиби, Белингве и Велтеверден была подготовлена для исследования изотопного состава водорода с помощью ионного зонда. Интенсивности вторичных ионов $^{17}\text{O}^-$ (время приема 2 с), $^{16}\text{OH}^-$ (6 с), $^{18}\text{O}^-$

(4 с), $^{17}\text{OH}^-$ (4 с) и $^{16}\text{OD}^-$ (20 с) были измерены в моноколлекторном режиме в течение 30-60 циклов (в зависимости от концентраций H_2O в анализируемых стеклах) с применением электронного умножителя. Изотопные составы приводятся как δD :

$$\delta\text{D} (\text{‰}) = [(\text{D}/\text{H})_{\text{образец}} / (\text{D}/\text{H})_{\text{VSMOW}} - 1] \times 1000, (1)$$

где $(\text{D}/\text{H})_{\text{VSMOW}} = 155.76 \times 10^{-6}$, стандартное значение для морской воды.

Измеренные значения δD ($\delta\text{D}_{\text{изм}}$) смещены инструментальным масс-фракционированием изотопов Н и D (*ИМФ*, ‰), которое зависит от состава матрицы (Naupl et al., 2006). Для определения матричных эффектов была применена многовариантная корреляция ($p < 0.002$, $R^2 \sim 0.75$) между значениями ИМФ и содержаниями Al_2O_3 и H_2O в пяти стандартных стеклах (60701, 40428, CY82-29-3V, VG-2 USNM111240 и ETNA-0):

$$\text{ИМФ} = 439.74711 - 20.34088 \times \text{H}_2\text{O} + 4.76916 \times \text{Al}_2\text{O}_3 \quad (2)$$

С помощью уравнения (2) удалось нивелировать матричный эффект *ИМФ* и истинные значения $\delta\text{D}_{\text{ист}}$ были рассчитаны:

$$\delta\text{D}_{\text{изм}} - \text{ИМФ} = \delta\text{D}_{\text{ист}} \quad (3)$$

Стандартные ошибки измерения, рассчитанные как усредненные разности для полученной регрессии, составили $\pm 6.3\%$. Погрешности определения δD для каждого включения определялись дополнительно как 2 стандартных отклонения среднего значения нескольких замеров. Общая ошибка определений δD составляла в среднем $\pm 29\%$. Всего было проведено 115 анализов изотопного состава водорода в расплавных включениях.

ИСП-МС с лазерной абляцией. Содержания примесных элементов в расплавных включениях и оливине-хозяине были проанализированы с помощью LA-ICP-MS с использованием квадрупольного масс-спектрометра Agilent 7500s и системы лазерной абляции 193 нм эксимерный лазер GeoLas Pro (Coherent) в Институте геонаук Университет Христиан-Альбрехт в Киле, Германия. Анализ оливина проводился в трех точках вокруг каждого включения. Для уменьшения поверхностного загрязнения на участках проводилась предварительная абляция в течение 3 с. В качестве газа-носителя использовался He ($\sim 1 \text{ Л мин}^{-1}$) с добавлением H_2 (0.014 Л мин^{-1}), который смешивался с Ar (0.85 Л мин^{-1}) перед введением в спектрометр. Все полученные спектры были обработаны в программе Glitter для определения интервалов интегрирования и исключения эффектов контаминации на поверхности. Концентрации были определены с помощью измеренных сигналов ионов, нормированных на ^{43}Ca для расплавных включений и ^{29}Si для оливина.

Концентрации ^{43}Ca и ^{29}Si были проанализированы с помощью электронного зонда. В качестве внешнего стандарта для всех элементов было использовано стекло KL-2G (MPI-DING). В качестве внутренних стандартов были использованы GOR-128G, GOR-132G, BM90/21G и San Carlos olivine, которые были проанализированы как неизвестные. Стандартные ошибки для индивидуальных анализов образцов были рассчитаны как ошибки измерения внутренних стандартов и составили в среднем (в относительных%): $\text{Li} \pm 24\%$, $\text{Sc} \pm 8\%$, $\text{V} \pm 12\%$, $\text{Cu} \pm 13\%$, $\text{Rb} \pm 13\%$, $\text{Sr} \pm 7\%$, $\text{Y} \pm 11\%$, $\text{Zr} \pm 11\%$, $\text{Nb} \pm 9\%$, $\text{Ba} \pm 11\%$, $\text{La} \pm 10\%$, $\text{Ce} \pm 11\%$, $\text{Nd} \pm 12\%$, $\text{Sm} \pm 18\%$, $\text{Eu} \pm 15\%$, $\text{Gd} \pm 15\%$, $\text{Dy} \pm 14\%$, $\text{Er} \pm 16\%$, $\text{Yb} \pm 16\%$, $\text{Pb} \pm 29\%$ (1 σ). Всего на ИСП-МС с лазерной абляцией было выполнено прилб. 650 анализов расплавных включений и оливина.

Обработка данных. Составы расплавных включений модифицированы кристаллизацией оливина на стенках включения и диффузией Fe-Mg между оливином и включением (Соболев, 1996). Для реконструкции первоначальных составов захваченных расплавов необходимо учесть оба эффекта, что производилось с помощью программы PETROLOG (Danyushevsky and Plechov, 2011). Эта программа позволяет осуществить пошаговые вычисления кристаллизации расплава, плавления оливина и диффузии Fe-Mg. Коррекция состава захваченных расплавов производилась до равновесия с измеренным составом оливина-хозяина по модели (Ford et al., 1983), которая описывает зависимости между температурой, давлением, составом системы и коэффициентами распределения между равновесными оливином и расплавом ($[Kd=X_{ol}/X_L]$, где X_{ol} - содержание компонента в твердой фазе, X_L – содержание компонента в жидкой фазе). Температурный эффект воды в расплавах учитывался с помощью зависимости:

$$\Delta T = 74.403 * (\text{H}_2\text{O}_{\text{мас.}\%})^{0.352} \quad (4),$$

где ΔT – разница между температурой сухого ликвидуса и ликвидуса в присутствии воды (в $^{\circ}\text{C}$, Falloon and Danyushevsky, 2000).

Геотермометрия. Для оценки температур кристаллизации коматиитового расплава использовались три независимых геотермометра: а) Геотермометр Sc/Y равновесия оливин-расплав (Mallmann and O'Neill, 2013), б) геотермометр Fe/Mg равновесия оливин-расплав (Ford et al. , 1983) и в) Геотермометр Al равновесия оливин-шпинель (Coogan et al., 2014). Температуры по геотермометру Fe-Mg равновесия оливин-расплав корректировались с учетом измеренных концентраций воды в расплавных включениях, с использованием (4) уравнения (Falloon and Danyushevsky, 2000).

Геотермометр Sc/Y равновесия оливин-расплав основан на зависящем от температуры распределении Sc и Y между оливином и расплавом. Для расчета температур был использован измеренный состав оливина, а вместо измеренных концентраций в захваченных расплавах значения Sc и Y были рассчитаны как функции от MgO в расплавах, по опубликованным составам пород исследованных обнажений коматиитов (Fan and Kerrich, 1997; Kareem, 2005; Nisbet et al., 1987). Данные по породам, а не по включениям применялись из-за систематического занижения измеренных во включениях содержаний Sc и Y в результате низкотемпературных диффузионных процессов. Опубликованная погрешность для геотермометра Sc/Y равновесия оливин-расплав составляет $\pm 24^\circ \text{C}$ (1 стандартная ошибка, Mallmann и O'Neil, 2013).

Геотермометр Al равновесия оливин-шпинель основан на распределении Al между оливином и шпинелью, зависящим от температуры и состава шпинели. Оливин-шпинелевый геотермометр применялся к оливину, содержащему менее 92 мол.% Fo для коматиитов Абитиби; менее 91 мол.% Fo – для коматиитов Белингве, менее 93 мол.% Fo – для коматиитов Барбертон (см. Раздел «Результаты» ниже). Это связано с тем, что для разных серий образцов, в зависимости от состава, кристаллизация шпинели начинается в разное время, но всегда существенно позже наиболее магнезиального оливина. Опубликованная погрешность для геотермометра Al равновесия оливин-шпинель составляет $\pm 20^\circ \text{C}$ (2 стандартных ошибки, Coogan et al., 2014).

Геобарометрия. Для оценки фугитивности кислорода в магмах был применен оксигеобарометр, основанный на разделении V между оливином и расплавом (Mallman и O'Neil 2013). Измеренные концентрации ванадия в расплавных включениях могут зависеть от перераспределения между оливином-хозяином, дочерней шпинелью и расплавом (см. Раздел «Результаты» ниже). Поэтому концентрация V в расплавах Абитиби и Белингве были оценены как функция от MgO, по данным о составе пород (Fan and Kerrich, 1997; Puchtel et al., 2013; Puchtel et al., 2009; Robin-Popieul et al., 2012). Опубликованная точность метода оценки фугитивности кислорода составляет $\pm 0.08 \log_{10} f\text{O}_2$ (одна стандартная ошибка, Mallmann и O'Neill, 2013). Фугитивность кислорода, оцененная для расплавных включений коматиитов Белингве, Абитиби и Велтевреден, образует тренды с содержанием Fo оливина-хозяина, соответствующие кристаллизации в закрытой системе. Экстраполяция полученных зависимостей до наиболее магнезиальных составов оливина, известных для каждого исследованного объекта, позволила оценить фугитивность кислорода для первичных расплавов, которая соответствует буферу QFM-1.4 для Абитиби, QFM-1.1 для Белингве и QFM-1.8 для Велтевреден (сдвиг $\Delta \log_{10} f\text{O}_2$ относительно буфера QFM).

Нами также был применен оксигеобарометр равновесия оливин-шпинель-ортопироксен (Ballhaus et al., 1991) на основе измеренных в прозрачно-полированных шлифах оливин-шпинелевых пар. Точность этого метода составляет $\pm 0.4 \log_{10} fO_2$ (1 стандартная ошибка). С учетом отсутствия ортопироксена в ассоциации с оливином и шпинелью погрешность метода может достигать $\pm 0.6 \log_{10} fO_2$. Температуры равновесия исследованных пар оливин-шпинель (>1300 °C) превышают диапазон (1050-1300 °C), в котором был калиброван данный оксигеобарометр (Ballhaus et al., 1991), с чем связана дополнительная неопределенность полученных оценок.

Реконструкция первичных расплавов. Для реконструкции первичных расплавов коматиитов были выбраны группы наиболее примитивных расплавных включений, которые обладают наиболее магнезиальными составами и согласуются с линиями фракционной кристаллизации оливина (линии оливинового контроля). Расплавные включения, составы которых не согласуются с линиями оливинового контроля, были отфильтрованы, как обладающие признаками контаминации или дегазации, и исключены из рассмотрения. Для расчета состава первичного расплава был использован протокол обратной кристаллизации оливина в программе Petrolog 3.0 (Danyushevsky and Plechov, 2011). Равновесие оливин-расплав было рассчитано с использованием моделей распределения $Mg-Fe^{+2}$ по Ford et al. (1983) и Herzberg and O'Hara (2002). Расчет проводился до наиболее магнезиального состава оливина, известного для каждой серии коматиитов. Для коматиитов Абитиби состав первичного расплава был оценен по составам 20 наиболее примитивных расплавных включений в оливине Fo94-94.5. Реконструкция первичного расплава проводилась до равновесия с оливином Fo94.5 в условиях изменения фугитивности кислорода в закрытой системе с началом при буфере QFM-1.4. Первичный расплав коматиитов Белингве был реконструирован с использованием составов 7 включений из оливина в диапазоне Fo92.1-92.5. Реконструкция проводилась до оливина Fo93.5 (Bickle et al., 1993; Sobolev et al., 2007). Для расчетов была принята фугитивность кислорода, соответствующая кристаллизации в закрытой системе с началом при буфере QFM -1.1. Для коматиитов Велтевреден расчет первичного расплава проводился на основе 34 расплавных включений. Содержания воды и хлора были более существенно модифицированы контаминацией, поэтому эти компоненты были реконструированы на основе 9 включений с наиболее примитивными составами. Расчет первичного расплава велся до равновесия с оливином Fo95.8 в условиях закрытой системы с началом кристаллизации при буфере QFM -1.8. Летучести кислорода при расчете всех первичных

расплавов были установлены на основе распределения V между оливином и расплавом (см. выше).

Оценка степеней плавления. Степени плавления мантийного источника для коматиитов Абитиби и Белингве были оценены, исходя из состава примесных элементов в первичных расплавах, состава примитивной мантии (Hofmann, 1988) для модели равновесного плавления в закрытой системе. Поскольку остаточными фазами после выплавления коматиитов являются оливин и ортопироксен (Herzberg and O'Hara, 2002), коэффициенты распределения для несовместимых элементов были приняты равными нулю. Через отношение TiO_2 между первичным расплавом и примитивной мантией можно установить, что первичный расплав Абитиби образовался в результате прибл. 50% плавления источника, а Белингве - ~40% плавления. Для первичного расплава Велтевреден таким методом оценить степень плавления по титану затруднительно, т.к. он значительно обеднен Ti. При оценке степеней плавления через магнезиальность расплавов (Herzberg, 2004) можно получить более 50% плавления источника для всех первичных магм.

Оценка условий плавления. Для первичных расплавов всех изученных объектов были рассчитаны потенциальные температуры мантии и давления образования по методике, Herzberg and Asimow (2015) и Lee et al. (2009).

3. Результаты.

3.1. Коматииты Белингве

Коматииты Белингве возрастом 2.7 млрд. лет расположены в Зимбабве и являются одними из наиболее хорошо сохранившихся коматиитов архейского времени. Они содержат большое количество свежего оливина с нетронутыми вторичными процессами расплавыми включениями. Изучена серия расплавленных включений из оливина Fo92.5-90.9. Кристаллизация шпинели не оказала влияния на составы захваченных расплавов, т.к. для указанного диапазона составов оливин является единственной ликвидусной фазой. Реконструированные составы расплавленных включений имеют относительно небольшие вариации от 19.8 до 23.6 мас.% MgO (Рис. 2).

Большинство измеренных содержаний мало подвижных главных и примесных элементов в захваченных расплавах согласуются с данными по породам в целом и варьируют стандартно как функция от содержаний MgO в расплавах, подчиняясь тренду оливиновой кристаллизации. Усредненное отношение Al_2O_3/TiO_2 коматиитов Belingwe составляет 21.3, это значение близко к хондритовому и классифицирует их как

необедненные Al коматииты (Jahn et al., 1982; Nesbitt and Sun, 1976). В расплавах, захваченных в менее магнезиальных оливинах наблюдается небольшой избыток концентраций Na и Ca, не согласующийся с линией оливинового контроля.

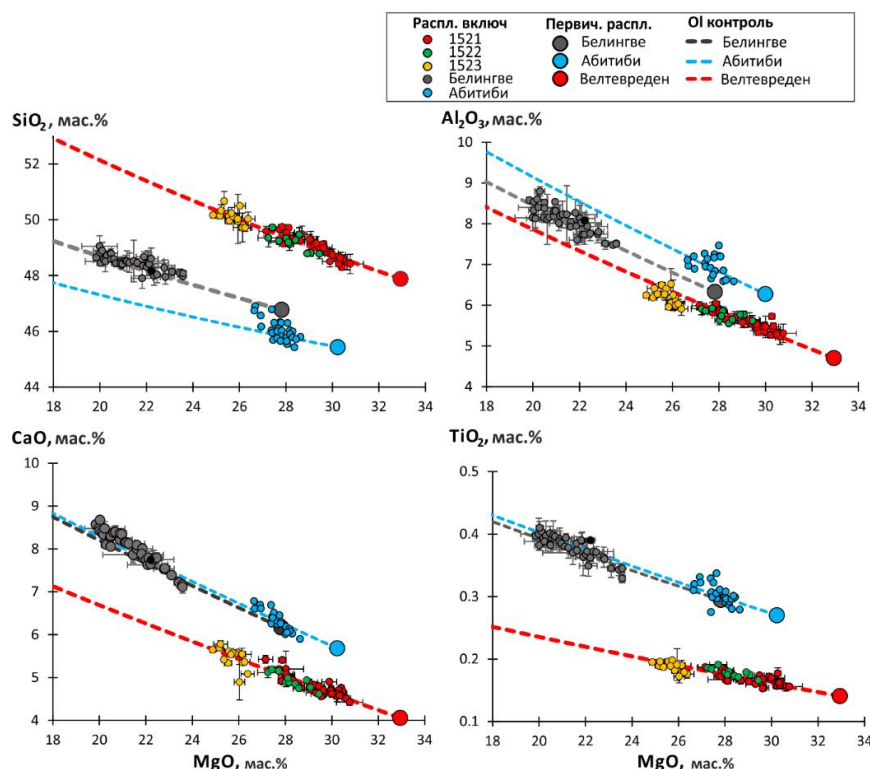


Рис. 2. Реконструированные первичные расплавы и их эволюция для коматиитов Белингве, Абитиби и Велтеврден – главные элементы.

Усредненные нормированные на состав примитивной мантии (Hofmann, 1988) примесные элементы демонстрируют ровные спектры (Рис. 3), но обладают слабо выраженными положительными аномалиями содержаний Sr, отрицательными аномалиями Rb и значительными положительными аномалиями концентраций летучих компонентов (H_2O , Cl и, в меньшей степени, F). Примесные элементы из расплавных включений демонстрирует плоский спектр тяжелых редкоземельных элементов, $(Gd/Yb)_n = 1.01 \pm 0.06$, и относительное обеднение легкими редкоземельными элементами, $(La/Sm)_n = 0.65 \pm 0.03$.

Содержания CO_2 в расплавных включениях составляют от 3 до 43 ppm. Измеренные содержания воды отличаются на 30-40% от значений, скорректированных на кристаллизацию оливина после захвата и потерю в усадочную полость в расплавном включении (среднее измеренное значение H_2O 0.37 мас.% против среднего скорректированного H_2O 0.24 мас.%). Они показывают значительную (с вероятностью 95%) отрицательную корреляцию с содержанием Fo оливина хозяина ($R_2 = 0.46$ для $N = 20$) и варьируют от 0.2 до 0.3 мас.% H_2O (Рис. 4). Большинство основных и примесных элементов, которые несовместимы с оливином (например, TiO_2 , Na_2O , Rb, Li, Sc, V, Cu, Ce),

демонстрируют положительные корреляции со скорректированным содержанием воды в расплавных включениях.

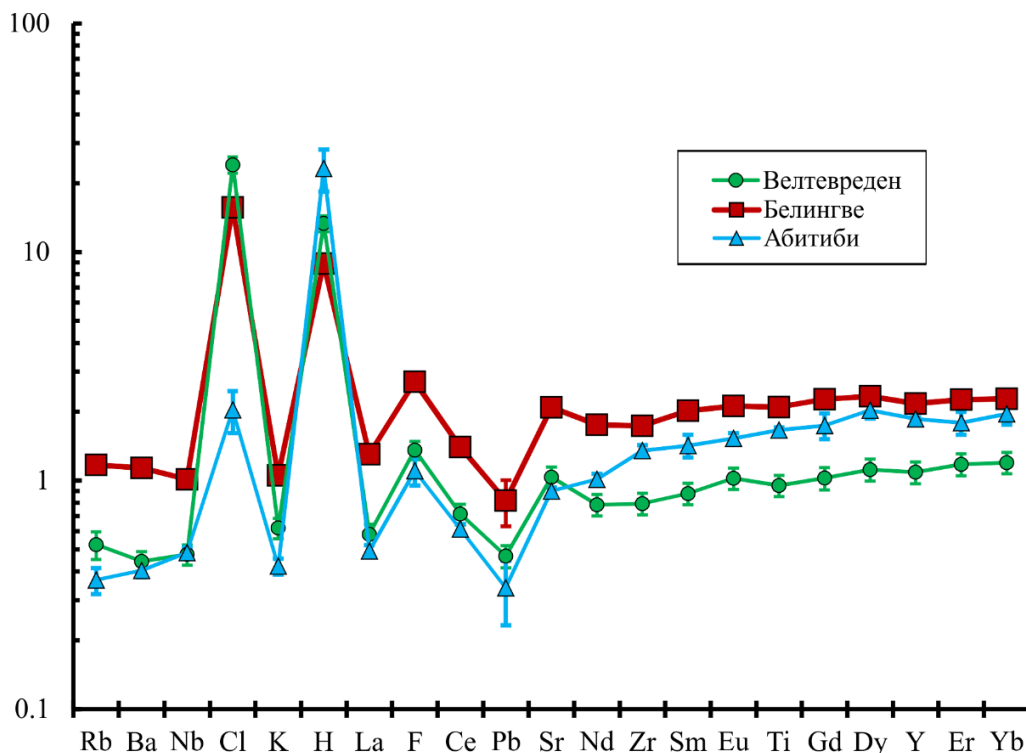


Рис. 3. Нормированные на состав примитивной мантии (Нюфалл, 1988) спектры примесных элементов первичных расплавов коматиитов Белингве, Абитиби и Велтевреден. Вода, фтор и хлор в примитивной мантии были оценены по отношениям $H_2O/Ce=166$, $Cl/K=0.10$, $F/Nd=22.7$ – средние отношения в неконтаминированных стеклах OIB и MORB (Kendrick et al., 2017).

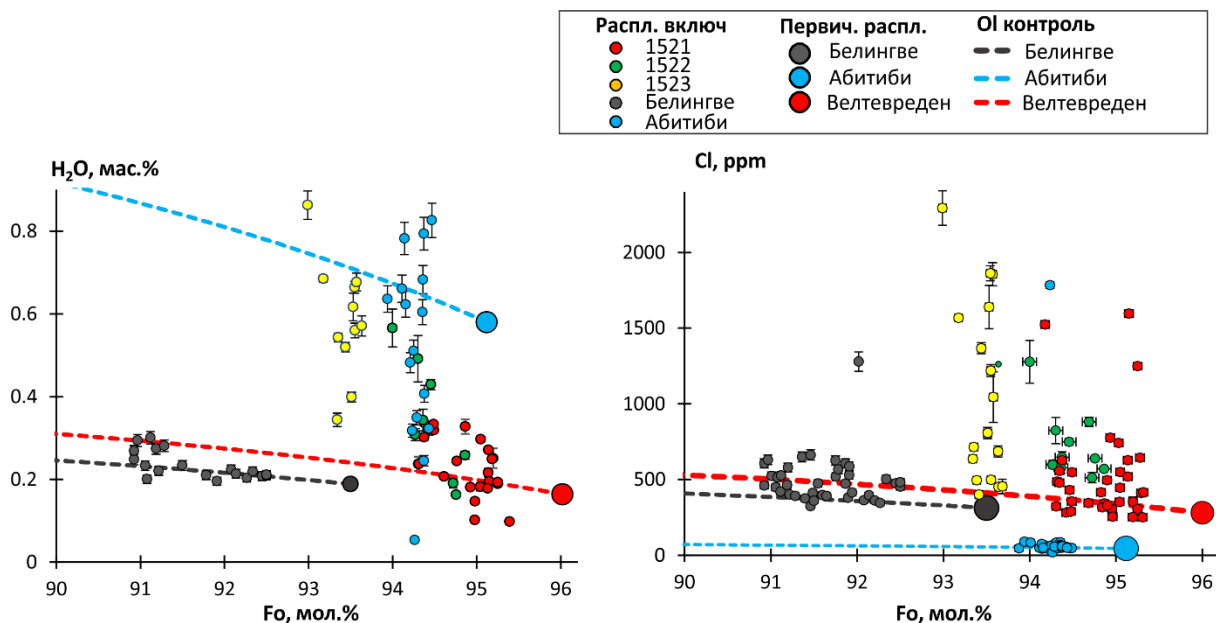


Рис. 4. Содержания летучих компонентов в расплавных включениях Белингве, Абитиби и Велтевреден и реконструированные составы первичных расплавов.

Скорректированные содержания CO_2 и H_2O использовались для оценки равновесного давления захвата включений с помощью программы VolatileCalc (Newman and Lowenstern, 2002). Эти расчеты дают оценку среднего давления в 357 бар.

Концентрация воды, фтора, хлора и серы в скорректированных захваченных расплавах отрицательно коррелирует с содержанием форстерита в оливине-хозяине. Концентрации хлора в расплавах варьируют от 269 до 595 ppm и в среднем составляют 407 ± 40 ppm. Содержания фтора варьируют от 34 до 60 ppm и в среднем составляют 46 ± 3 ppm. Расплавы, захваченные наиболее магниальными оливинами, следуют линиям фракционирования оливина, тогда как включения из более поздних железистых оливинов, как правило, имеют избыточные концентрации летучих компонентов в сравнении с линиями оливинового контроля, что свидетельствует о наличии контаминации поздних порций коматиитовых магм.

Температуры кристаллизации, оцененные по геотермометру Sc/Y равновесия оливин-расплав для наиболее примитивных пар, варьируют от 1390 до 1524°C, что в среднем составляет 1448 ± 32 °C (для Fo 91.7-93.3, средний Fo=92.2, N=19). Кристаллизация расплавов началась при буфере QFM-1.4 и следовала тренду закрытой системы (Asafov et al, 2018).

3.2. Коматииты Абитиби

В ходе работы были исследованы коматииты возрастом 2.7 млрд. лет из двух соседних районов зеленокаменного пояса Абитиби, Канада: Мунро (коматииты Пайк Хилл) и Дандоланд-Клерг (коматииты Алексо). Изученные образцы характеризуются высокой степенью сохранности и представляют собой кумуляты оливина коматиитов.

Частично серпентинизированный оливин из кумулятов содержит останцы свежего материала и обладает зональностью от центральных частей зерен к краю. Содержания Fo в оливине кумулятов Пайк Хилл (805 и 810) варьируют от 93.5-94.5 мол% в ядрах до 88-90 мол% в краевых частях. Оливин из кумулятов коматиитовых потоков Алексо обладает похожими составами и также характеризуется наличием зональности. Центральные части зерен достигают 93.5 мол.% Fo, а наиболее железистые края зерен могут содержать 86-88 мол.% Fo.

Расплавные включения коматиитов Пайк Хилл захвачены оливином Fo93.9-94.6, включения Алексо – оливином Fo92.4-93.8. Поскольку хромшпинелид начинает кристаллизоваться позже, единственная ликвидусная фаза, контролирующая состав

расплава в диапазоне изученных включений – это оливин. Реконструированные составы расплавов коматиитов Пайк Хилл характеризуются высокими содержаниями магния от 26.7 до 28.6 мас.% MgO, захваченные расплавы Алексо варьируют от 22.8 до 26.4 мас.% MgO. Главные и примесные элементы образуют плотные линии тренда с содержаниями MgO расплава и следуют линиям оливинового контроля (Рис. 2).

Содержания Cr, V, Sc и Y в захваченных расплавах коррелируют с содержаниями MgO в расплавах, но наблюдается систематический сдвиг по сравнению с данными по содержаниям этих элементов в породах в целом. CaO/Al₂O₃ отношение в расплавах Пайк Хилл составляет 0.9, а Al₂O₃/TiO₂ – 23. В коматиитах Алексо отношения CaO/Al₂O₃ и Al₂O₃/TiO₂ составляют 0.8 и 22 соответственно, что характеризует их как Al-необедненные коматииты.

В ряде включений Пайк Хилл и Алексо наблюдается относительное обогащение TiO₂, Na₂O, K₂O, Pb, Li, Cu, Sr и др., которое не согласуется с линией оливинового контроля и является результатом ассимиляции корового вещества. Составы расплавных включений Пайк Хилл и Алексо, нормированные на примитивную мантию (Hofmann, 1988) демонстрируют плоские деплетированные спектры, характерные для базальтов срединно-океанических хребтов, но со значительно более низким уровнем концентраций всех несовместимых элементов. Составы расплавных включений Алексо сравнительно обогащены литофильными элементами относительно Пайк Хилл.

Содержания CO₂ в захваченных расплавах Пайк Хилл варьируют от 93 до 312 ppm, в Алексо – от 60 до 420 ppm. F, Cl и S образуют тренды, следующие оливиновому контролю на вариационных диаграммах и варьируют как функция MgO или Fo оливина-хозяина. В расплавных включениях Пайк Хилл содержания F находятся в диапазоне 18-37 ppm, S – 170-390 ppm, Cl – 50-100 ppm. В расплавах захваченных в оливинах Алексо F варьирует в пределах 36-57 ppm, S – 240-450 ppm, Cl – 160-280 ppm. Крайне высокие содержания Cl наблюдаются в единичных включениях Пайк Хилл (более 2000 ppm) и Алексо (500 ppm). Вода в расплавных включениях Пайк Хилл образует облако точек на вариационной диаграмме и демонстрирует значения от 0.05 мас.% до 0.83 мас.% H₂O (Рис. 4). Расплавные включения из коматиитов Алексо обладают существенно более низкими содержаниями H₂O в пределах 0.1-0.2 мас.%. По равновесию H₂O-CO₂ было определено давление кристаллизации, которое составляет в среднем 450 бар для Пайк Хилл и 110 бар для Алексо (Newman and Lowenstern, 2002). Температуры кристаллизации, оцененные по геотермометру Sc/Y равновесия оливин-расплав составили 1450-1550 °C для Пайк Хилл и

1470-1510 °C для Алексо. Температуры кристаллизации коматиитов Пайк Хилл и Алексо по геотермометр равновесия Al оливин-шпинель составили 1350-1430° C. Кристаллизация расплавов началась при буфере QFM-1.4 и следовала тренду закрытой системы (Sobolev, Asafov et al, 2016).

3.3. Коматииты Барбертон

Были изучены образцы кумулятов коматиитов Велтевреден, зеленокаменного пояса Барбертон, ЮАР, возрастом 3.3 млрд. лет (Connolly, et al., 2011). Ядра оливина из исследуемых образцов незональные и имеют содержания Fo от 91.4 до 95.3 мол.%. Все исследованные расплавные включения захвачены оливином с содержанием Fo в пределах от 93 до 95.3 мол.%. Содержания MgO реконструированных расплавных включений варьируют от 22.1 до 28.1 мас.%. Расплавы Велтевреден характеризуются относительно низкими содержаниями $\text{FeO}_{\text{общ}}$, CaO и TiO_2 , но сравнительно высокими концентрациями SiO_2 (до 52.7 мас.%). Отношения $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ исследуемых захваченных расплавов находятся в диапазоне 31.1 и 36.4 – промежуточные значения между Al-необедненными ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2 \sim 20$) и Al-обогащенными коматиитами ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ больше 50).

Большинство главных и примесных элементов в изученных расплавных включениях варьируют как функция MgO в расплаве. При этом мало подвижные элементы в расплавных включениях соответствуют составам лав. Концентрации Na_2O , K_2O , Li, V, Rb, Cu и Pb в расплавах накапливаются сильнее, чем прогнозируется фракционированием оливина, что вызвано процессами ассимиляции материала коры. Нормированные на примитивную мантию расплавные включения характеризуются плоскими спектрами редкоземельных элементов со слабым обеднением более легкими редкоземельными элементами: средние отношения, нормированные на хондрит $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}=0.86$, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}=0.67$.

Содержания воды варьируют от 0.15 до 0.9 мас.%. и не согласуются с линией оливинового контроля (Рис. 4), но показывают значительные положительные корреляции с концентрациями большинства основных и примесных элементов, несовместимых с оливином (Al_2O_3 , CaO, Na_2O , TiO_2 , K_2O , Sc, Li, Cu, Nb и т. д.). Хлор и фтор демонстрируют сильную положительную связь с содержанием воды, в то время как CO_2 и S не коррелируют с H_2O . Скорректированные концентрации CO_2 в расплавных включениях варьируют от 2 до 393 ppm. Средняя оценка равновесного давления, оцененная по равновесию $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ (Newman and Lowenstern, 2002) составляет 114 ± 24 бар (2 стандартных ошибки), что соответствует глубине прибл. 400 м.

Концентрации фтора составляют от 29 до 46 ppm, хлора - от 306 до 2294 ppm. Фтор в расплавных включениях в пределах ошибки следует линии оливинового контроля, тогда как Cl демонстрирует более крутой наклон линии корреляции. Содержания S в расплавных включениях составляют от 62 до 239 ppm и не коррелируют с содержанием Fe оливина хозяина.

Температуры кристаллизации, определенные с помощью геотермометра Sc/Y равновесия оливин-расплав составляют от 1300 до 1550°C. Оценки температур по оливин-шпинелевому термометру образуют поля вдоль линии сухого ликвидуса и дают диапазон температур от 1347 до 1482 °C. Фугитивность кислорода была определена по оксигеобарометру V равновесия оливин-расплав. Кристаллизация происходила в условиях закрытой системы с началом при буфере $\Delta QFM-1.8$.

4. Изотопный состав водорода в расплавах коматиитов

Изотопный состав водорода в расплавах демонстрирует диффузионную потерю протона H из включений сквозь оливин-хозяин. Поэтому большинство измеренных δD для изученных серий расплавных включений демонстрируют очень высокие значения (до 330 ‰), не соответствующие ни одному поверхностному резервуару (Рис. 5). Для восстановления первичных изотопных составов водорода в расплавах требуется знать содержания воды до диффузионной потери водорода. Эти значения были получены с помощью допущения, что максимальные H_2O/Al_2O_3 отношения в захваченных расплавах для каждого образца отвечают минимальным первичным содержаниям воды.

Первоначальные изотопные составы водорода захваченных расплавов были посчитаны с помощью модели диффузионной потери водорода (Bucholz et al., 2013). В расчётах были использованы оцененные первичные содержания воды в расплавных включениях, их химический состав и размер. Для расплавных включений Велтевреден наблюдается четкие отрицательные тренды между δD и содержаниями воды, которые соответствуют линиям диффузионной потери H. Среднее значение δD после реконструкции оригинальных значений для неконтаминированных расплавов Велтевреден составляет $\delta D = -190 \pm 65\%$. Расплавные включения в менее магнезиальных оливинах потоков 1522 и 1523 характеризуются контаминацией водосодержащего вещества с изотопным составом водорода, соответствующим архейской морской воде (Pore et al, 2012). Оценки среднего исходного изотопного состава водорода составляют для коматиитов Белингве $\delta D = -120 \pm 170\%$, для Абитиби - $\delta D = -145 \pm 180\%$ (Рис. 5). Эти значения получены с большими погрешностями и поэтому не являются диагностическими. Однако прямое определение

изотопии водорода включения в магнезиальном оливине коматиитов Белингве ($\delta D = -100 \pm 15\text{‰}$), также, как и изотопный состав водорода неконтаминированных расплавов Велтевреден свидетельствуют о глубинном происхождении воды в коматиитовых расплавах.

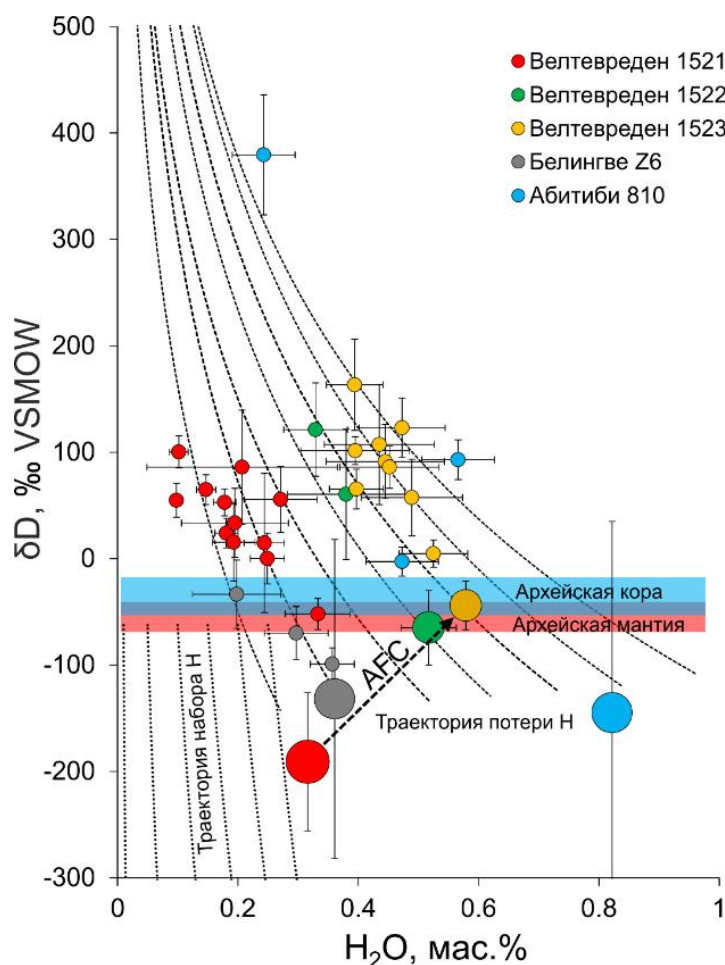


Рис. 5. Содержания воды и δD в расплавных включениях. Маленькие символы – измеренные составы. Большие символы – усредненные реконструированные составы. Погрешности представлены как две стандартные ошибки. Расплавы 1522 и 1523 коматиитов Велтевреден демонстрируют признаки контаминации коровым веществом. Значения для архейских мантийных и поверхностных резервуаров взяты из литературы (Pore et al., 2012; Shaw et al., 2008)

5. Выводы

1. Получен новый обширный материал по геохимии и физико-химическим условиям формирования неоархейских коматиитов из зеленокаменных поясов Белингве (Зимбабве) и Абитиби (Канада) – возрастом 2.7 млрд. лет и палеоархейских коматиитов зеленокаменного пояса Барбертон (ЮАР) возрастом 3.3 млрд. лет.

2. Получены первые данные по содержаниям H_2O , F, CO_2 , S и Cl в расплавных включениях коматиитов Абитиби и Велтевреден. Впервые определен изотопный состав водорода в расплавных включениях коматиитов архейского возраста. Установлено существенное фракционирование изотопов в результате диффузионной потери водорода из включений.
3. Кристаллизация коматиитовых магм во всех исследованных областях происходила при низких давлениях в коровых условиях: 360 бар (глубина 1.2 км) для коматиитов Белингве, 450 бар (глубина 1.5 км) для коматиитов Абитиби и 110 бар (глубина 0.6 км) для коматиитов Барбертон. Кристаллизация магм происходила при сравнительно низкой фугитивности кислорода в условиях закрытой системы и соответствовала в начале кристаллизации буферу QFM-1.1 для коматиитов Белингве, QFM-1.4 для коматиитов Абитиби и QFM-1.8 для коматиитов Барбертон. В процессе кристаллизации все изученные расплавы контаминировались веществом измененной океанической коры.
4. Первичные расплавы коматиитов из всех изученных областей характеризуются высокими степенями плавления (более 40%) и обладают высокими содержаниями магния: 27.5 ± 2.9 мас.% MgO для коматиитов Белингве, 30 ± 2.4 мас.% MgO для коматиитов Абитиби и 33 ± 2.1 мас.% MgO для коматиитов Барбертон. Определены температуры первичных расплавов: 1513 ± 54 °C – первичный расплав коматиитов Белингве, 1532 ± 52 °C для первичных расплавов коматиитов Абитиби, 1570 ± 50 °C для первичных расплавов коматиитов Барбертон. В первичных расплавах коматиитов из всех изученных объектов обнаруживаются повышенные содержания летучих компонентов (Рис. 3), относительно других несовместимых элементов. В первичных расплавах коматиитов Белингве получены отношения $H_2O/Ce=1018$, $Cl/K=1.4$, $F/Nd=19.8$, для первичных расплавов Абитиби - $H_2O/Ce=6500$, $Cl/K=0.4$, $F/Nd=24$, для первичных расплавов Барбертон – $H_2O/Ce=2200$, $Cl/K=2$, $F/Nd=35$. Полученные отношения превышают существующие оценки содержаний хлора и воды, а также фтора (в случае с первичными расплавами коматиитов Барбертон) в мантийных источниках фанерозойских базальтов срединно-океанических хребтов (MORB) и океанических островов (OIB, $H_2O/Ce=166$, $Cl/K=0.10$, $F/Nd=22.7$, Kendrick et al., 2017).
5. Изотопный состав водорода родоначальных коматиитовых расплавов обеднен дейтерием, что исключает происхождение воды в результате ассимиляции коровых пород.

6. Были оценены потенциальные температуры и глубины мантийных источников, которые составили: $1750 \pm 50^\circ\text{C}$ и 7 ± 0.2 GPa или 220 ± 7 км глубины для коматиитов Белингве, $1800 \pm 50^\circ\text{C}$ и 9.8 ± 0.2 GPa или 300 ± 7 км глубины для коматиитов и $1870 \pm 50^\circ\text{C}$ и 10.5 ± 0.2 GPa или 330 ± 7 км глубины для коматиитов Барбертон. Полученные температуры превышают оценки температур конвектирующей архейской мантии во всех исследованных случаях и, следовательно, свидетельствует о плюмовом происхождении коматиитовых магм.

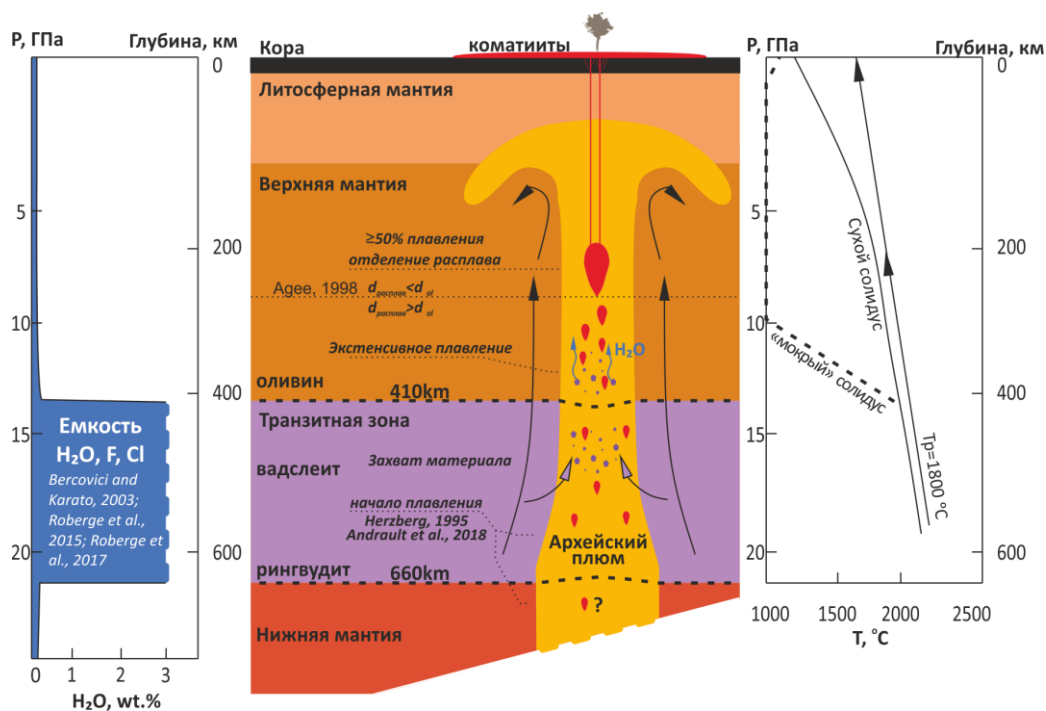


Рис. 6. Модель плюмового магматизма образования коматиитов. архейский плюм пересекает переходную зону мантии, содержащую повышенные концентрации структурной воды в высокобарных полиморфах оливина, также возможно фтор и хлор (Bercovici and Karato, 2003; Inoue, 1994; Roberge et al., 2015; Roberge et al., 2017) и захватывает летучие компоненты. При дальнейшем подъеме плюма происходит трансформация материала переходной зоны в низкобарическую форму оливина и высвобождение структурной воды, что понижает температуру солидуса мантийного перидотита, и способствует экстенсивному плавлению.

7. На основании полученного фактического материала предложена модель взаимодействия мантийных плюмов, являющихся источниками коматиитовых магм, с переходной зоной мантии, обогащенной водой, хлором и фтором (Рис. 6). Наблюдаемый избыток воды, фтора и хлора в первичных расплавах коматиитов 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.

6. Защищаемые положения

1. На основе исследования включений расплава, шпинели и вмещающего их оливина уточнены данные по составу и физико-химическим параметрам образования и эволюции коматиитовых магм неархейского возраста (Абтиби, Канада; Белингве; Зимбабве) и палеоархейского возраста (Велтевреден, ЮАР). Первичные магмы Абтиби содержали 30 ± 2.4 мас.% MgO, Белингве – 27.5 ± 2.9 мас.% MgO и Велтевреден – 33 ± 2.1 мас.% MgO.
2. Получены первые данные по содержаниям летучих компонентов (H_2O , CO_2 , Cl, F и S) и изотопов водорода в первичных расплавах архейских коматиитов. Показано, что первичные расплавы коматиитов и их мантийные источники характеризуются повышенными содержаниями H_2O и Cl по сравнению с элементами сходной несовместимости с мантийными минералами (отношение H_2O/Se до 6500 и Cl/K до 2) и образуют существенный избыток по сравнению с мантийными источниками современных базальтов океанических хребтов и океанических островов ($H_2O/Se = \sim 200$ и $Cl/K \sim 0.1$).
3. Образование коматиитовых магм Абтиби, Белингве и Велтевреден происходило в мантийных струях в результате высоких степеней плавления (более 40%) перidotитового источника при потенциальных температурах 1750 -1870 °C на глубинах 220-330 км.
4. Кристаллизация коматиитовых магм проходила в коре на глубине менее 2 км при давлении углекислотно-водного флюида менее 450 бар, температурах 1570-1300 °C и летучести кислорода на 1-1.5 порядка ниже буфера QFM. В процессе кристаллизации расплавы дегазировали и ассимилировали коровое вещество.

Список публикаций по теме:

1. Sobolev A.V., **Asafov E.V.**, Gurenko A.A., Arndt N.T., Batanova V.B., Portnyagin M.V., Garbe-Schönberg D. & Krasheninnikov S.P., Komatiites reveal a hydrous Archaean deep-mantle reservoir// Nature, 2016, V. 531, p. 628-632. (БАК, WoS-Q1, РИНЦ)
2. **Asafov E.V.**, Sobolev A.V., Gurenko A.A., Arndt N.T., Batanova V.G., Portnyagin M.V., Garbe-Schönberg D., Krasheninnikov S.P., Belingwe komatiites (2.7 Ga) originate from a plume with moderate water content, as inferred from inclusions in olivine// Chemical Geology, 2018 (БАК, WoS -Q1, РИНЦ).

Тезисы

1. **Асафов Е.В.**, Соболев А.В., Гуренко А.А., Арндт Н.Т., Батанова В.Г., Крашенинников С.П., Вилсон А.Х., Бирли Г.Р., Состав расплавов коматиитов зеленокаменного пояса Барбертон (Ю. Африка) по данным изучения расплавных включений в оливине// Труды Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии, 2016, стр.29-30 (РИНЦ)
2. **Asafov E.V.**, Sobolev A.V., Gurenko A.A., Arndt N.T., Batanova V.G., Krasheninnikov S.P., Wilson A.H., Byerly G.R., Early seawater-brine contamination of 3.3-3.5 ga komatiite melts inferred from melt inclusions// 2016, in book Moscow International School of Earth Sciences, p.29-30 (РИНЦ)
3. **Asafov E.V.**, Sobolev A.V., Gurenko A.A., Portnyagin M.V., Arndt N.T., Batanova V.G., Krasheninnikov S.P., Water in the Archaean komatiites: results of the melt inclusion studies.// Abstracts, International Conference dedicated to the 110th anniversary of Academician Vladimir Stepanovich Sobolev, 2018.
4. **Asafov E.V.**, Sobolev A.V., Gurenko A.A., Arndt N.T., Batanova V.G., Portnyagin M.V., Garbe-Schönberg D., Krasheninnikov S.P., Water in the 2.7 Ga Belingwe komatiite magma inferred from the melt inclusions in olivine.//Abstracts, Goldschmidt 2017
5. **Asafov E.V.**, Sobolev A.V., Gurenko A.A., Arndt N.T., Batanova V.G., Portnyagin M.V., Garbe-Schönberg D., Krasheninnikov S.P., A. H. WILSON and G.R. BYERLY, Olivine-Hosted Melt Inclusions in the Ancient Komatiites – the Potential Key to the Archean Mantle Composition//Abstracts, S3.T02, p.50, ECROFI-2017
6. **Асафов Е.В.**, Соболев А.В., Гуренко А.А., Портнягин М.В., Арндт Н.Т., Батанова В.Г., Крашенинников С.П., Состав расплавов коматиитов зеленокаменного пояса белингве (зимбабве) по данным изучения расплавных включений в оливине//Тезисы, 139, ВЕСЭМПГ-2017
7. **E. V. Asafov** , A.V. Sobolev , A. A. Gurenko , N.T. Arndt, V.G. Batanova, M.V. Portnyagin, D. Garbe-Schönberg, S.P., Krasheninnikov, A.H. Wilson, G.R. Byerly, Parental melts of 3.3 Ga Barberton and 2.7 Ga Belingwe komatiites were significantly contaminated by seawater brines// Abstracts, p.5, 13th International NI-CU-PGE Symposium, Fremantle, Australia
8. Nicholas Arndt, Alexander Sobolev, **E. V. Asafov**, Wet and moist komatiites – what is the source of the water?// Abstracts, p.4, 13th International NI-CU-PGE Symposium, Fremantle, Australia
9. **E. V. Asafov**, A.V. Sobolev, A. A. Gurenko, N. T. Arndt, V.G. Batanova, M.V. Portnyagin, D. Garbe-Schönberg, S. P. Krasheninnikov, A. H. Wilson and G.R. Byerly, A hydrous mantle reservoir in the Paleoarchean?// Abstracts, p113, секция 4d, международная конференция Goldschmidt-2016, 26.06.2016-01.07.2016, Йокогама, Япония
10. A.V. Sobolev, **E.V. Asafov**, A. A. Gurenko, N. T. Arndt, V.G. Batanova, M.V. Portnyagin, D. Garbe-Schönberg, S. P. Krasheninnikov, Evidence for Neoarchean Hydrous Deep-

- Mantle Reservoir Provided by Abitibi Komatiites// Abstracts, p.2901, секция 4b, международная конференция Goldschmidt-2016, 26.06.2016-01.07.2016, Йокогама, Япония
11. **Асафов Е.В.**, Соболев А.В., Гуренко А.А., Арндт Н.Т., Батанова В.Г., Крашенинников С.П., Вилсон А.Х., Бирли Г.Р., Состав расплавов коматиитов зеленокаменного пояса Барбертон (Ю. Африка) по данным изучения расплавных включений в оливине, Сборник тезисов ВЕСЭМПГ-2016 - 010, Всероссийский семинар ВЕСЭМПГ-2016. (РИНЦ). 19.04.2016-20.04.2016, Москва, Россия
 12. **E. V. Asafov**, A.V. Sobolev, A. A. Gurenko, N. T. Arndt, V.G. Batanova, S. P. Krashenninnikov, A. H. Wilson and G.R. Byerly, Early seawater-brine contamination of 3.3-3.5 Ga komatiite melts inferred from melt inclusions// Abstracts M.: GEOKHI RAS, 2016. p.11 – ISBN 978-5-905049-13-2, международная школа ISES-2016(РИНЦ), 23.05.2016-16-28.05.2016, Москва, Россия
 13. A.V. Sobolev, V.G. Batanova, **E.V. Asafov**, A. A. Gurenko, N. T. Arndt, M.V. Portnyagin, D. Garbe-Schonberg, S. P. Krashenninnikov, How Hot and Wet are Mantle Derived Magmas and Their Sources?// Abstracts, DI51C-04, международная конференция Американского Геофизического Союза AGU Fall meeting 2015, 14.12.2015-18.12.2015, Сан-Франциско, США .
 14. **Асафов Е.В.**, Соболев А.В., Гуренко А.А., Арндт Н.Т., Батанова В.Г., Состав расплавов коматиитов Абитиби и Белингве по данным изучения расплавных включений в оливине.Тезисы докладов, Москва, 2015, Сборник тезисов – ВЕСЭМПГ-2015-008, Всероссийский семинар ВЕСЭМПГ-2015, 21.04.2015-22.04.2015, Москва, Россия
 15. **E.V. Asafov**, A.V. Sobolev, A.A. Gurenko, N.T. Arndt, V.G. Batanova, Elevated H₂O and Cl contents in komatiite melts from Abitibi and Belingwe// Goldschmidt2015 Abstracts, p122, международная конференция Goldschmidt 2015, 16.08.2015-21.08.2015 Прага, Чехия
 16. **E.V. Asafov**, A.V. Sobolev, N.T. Arndt, V.G. Batanova, Composition of komatiite melts from Abitibi and Belingwe inferred from melt inclusions in olivine phenocrysts// Geophysical Research Abstracts, vol.17, EGU2015-7281-1, международная конференция European Geosciences Union-2015, 12.04.2015-17.04.2015, Вена, Австрия