

УДК 552.3, 552.11

ТЕМПЕРАТУРЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ КОМАТИИТОВЫХ БАЗАЛЬТОВ ВЕТРЕННОГО ПОЯСА, КАРЕЛИЯ ПО ДАННЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АЛЮМИНИЯ МЕЖДУ ОЛИВИНОМ И ХРОМИТОМ

© 2024 г. Е. В. Асафов^{1,*}, А. Н. Кошлякова¹, академик РАН А. В. Соболев², Д. П. Тобелко¹, Н. Н. Кошлякова³, С. В. Межеловская⁴

Поступило 25.12.2023 г.

После доработки 07.02.2024 г.

Принята к публикации 12.02.2024 г.

Рубеж архея и протерозоя в истории Земли отмечен значительными изменениями динамики мантии и её температурных режимов. Заметным следствием является исчезновение обеднённых алюминием коматиитов в конце архея и практически полное отсутствие характерных для архея перидотитовых коматиитов начиная с протерозойского времени. В данной работе мы представляем исследование коматиитовых базальтов Ветреного пояса возрастом 2.41 млрд лет, относящихся к начальному периоду протерозоя. Представлены уникальные данные по составам оливина и хромита, а также по температурам кристаллизации по Al-геотермометру в оливине для коматиитовых базальтов Ветреного пояса. Температуры наиболее ранних стадий кристаллизации составляли приблизительно $1240 \pm 25^\circ\text{C}$, что свидетельствует о наличии воды в расплаве и согласуется с измеренными содержаниями 0.4 ± 0.2 мас. % H_2O в расплавленных включениях. При этом в процессе кристаллизации расплав коматиитовых базальтов испытал дегазацию, что привело к массовой кристаллизации системы и подъёму температур на $\sim 20^\circ\text{C}$ за счёт высвобождения скрытой теплоты плавления. Дегазация воды из расплава свидетельствует о кристаллизации в поверхностных условиях.

Ключевые слова: коматииты, оливин, шпинель, Карелия, протерозой, мантия, магма, кристаллизация

DOI: 10.31857/S2686739724060071

ВВЕДЕНИЕ

Коматииты — это высокомагнезиальные породы (>18 мас. % MgO), образование которых связано со значительным плавлением мантии при высоких температурах и давлениях. Поэтому они предоставляют ценную информацию о геохимии и температурном режиме мантии Земли [1]. Распределение коматиитов в истории неравномерно, большинство известных проявлений коматиитового магматизма приурочены

к архейскому времени. Редкие находки коматиитов и связанных с ними высокомагнезиальных пород протерозойского возраста, такие как высокотитанистые коматииты в зеленокаменном поясе Карасёк, Норвегия [2], коматииты и коматиитовые базальты в поясе Циркум-Супериор, Канада [3], подчёркивают редкость этих пород в протерозое. И наконец, к единичным известным проявлениям фанерозойского возраста относятся коматииты о. Горгона, Колумбия [4] и рифта Сонг-Да, Вьетнам [5].

В данной статье рассматриваются коматиитовые базальты Ветреного пояса, Карелия, возрастом 2.41 млрд лет [6, 7]. Получены составы равновесных оливина и хромита, и температуры их кристаллизации. На основании этих данных проведена реконструкция условий кристаллизации. Продемонстрировано, что в процессе кристаллизации произошли дегазация и подъём температур коматиитовых магм.

¹Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской Академии наук, Москва, Россия

²Институт наук о Земле, Университет Гренобль Альпы, CS40700, 38058 Гренобль CEDEX 9, Франция

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Геологический факультет, Москва, Россия

⁴Геологический институт Российской Академии наук, Москва, Россия

*E-mail: asafoff@geokhi.ru

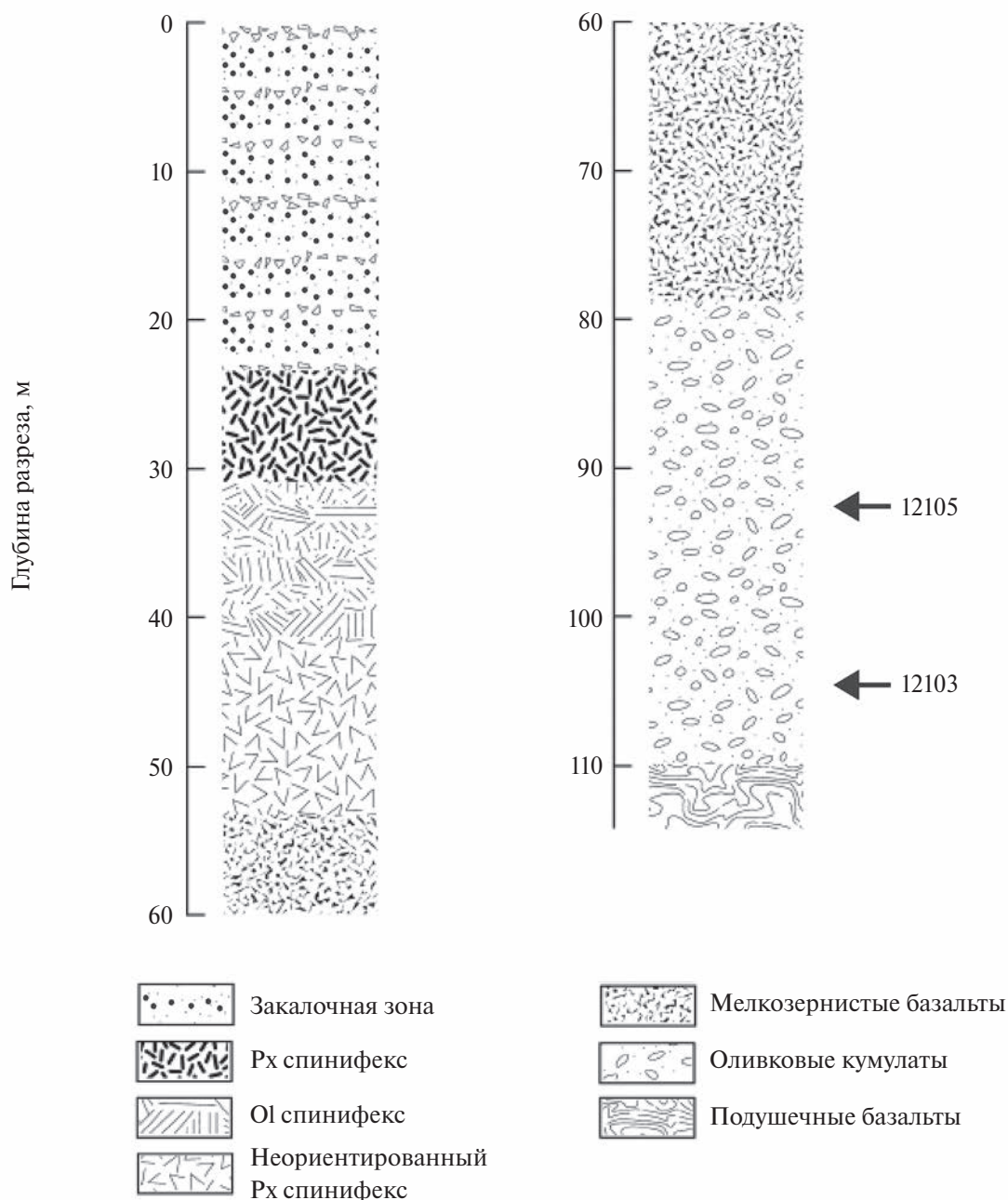


Рис. 1. Схематический разрез лавового озера Виктория, Ветренный пояс, Карелия [7]. Стрелками на разрезе показаны участки отбора образцов из кумулятивной зоны, использованных в работе.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОБЗОР И ОБРАЗЦЫ

Ветренный Пояс представляет собой внутрикратонный палеорифт протяжённостью около 250 км и шириной до 85 км, расположенный в ЮВ-части Фенноскандинавского щита в пределах Карельского кратона на границе с Беломорским мобильным поясом. Это осадочно-вулканогенный комплекс протерозойского

возраста, с несогласием, залегающим на архейском фундаменте Водлозерского блока, представленном формацией ТТГ (тоналит-грандье-мит-гранодиорит). Ультрамафитовый магматизм комплекса, представленный в том числе коматиитовыми базальтами, относится к наиболее молодой части разреза — свите Ветреного пояса возрастом 2.41 млрд. лет [6].

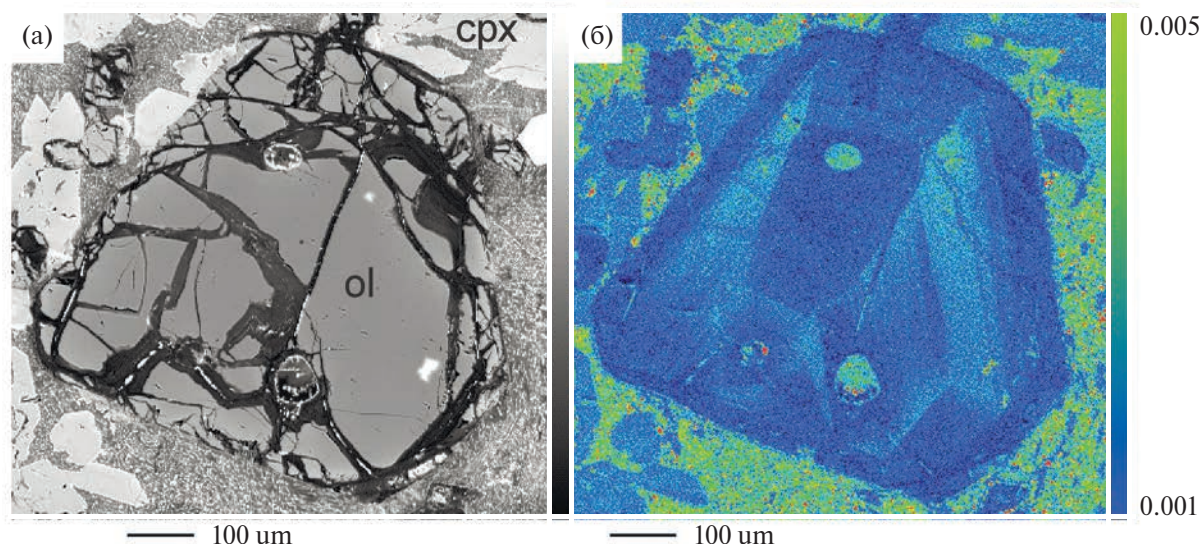
P_2O_5 , мас. %

Рис. 2. Микрофотография оливина из образца оливинового кумулата 12103: а) изображение в отражённых электронах, б) карта распределения Р демонстрирует характерную для оливина магматическую зональность. ОI — оливин, срх — клинопироксен.

В данной работе рассматриваются коматиитовые базальты лавового озера Виктория (рис. 1), [6, 7], расположенного в центральной части Ветреного пояса в окрестностях г. Большая Левгора. Образование лавового озера связано с тем, что расплав коматиитовых базальтов при извержении заполнил топографическую низменность. В процессе кристаллизации произошла дифференциация лавового озера на базальную кумулятивную часть, зону пироксенового и оливинового спинифекса и верхнюю закалочную зону. Для исследования был использован образец кумулатов 12103 из базальной части разреза. Кумулаты представляют собой существенно оливиновую породу, содержащую крупные фенокристаллы оливина и клинопироксена размером до 0.5 мм (рис. 2). Основная масса представлена девитрифицированным изменённым стеклом. Хромит представлен акцессорными зёрнами размером до 50 мкм. Породы претерпели метаморфизм зеленосланцевой фации, в результате чего вулканическое стекло полностью заместилось девитрифицированной основной массой.

МЕТОДЫ

Образец оливинового кумулата коматиитовых базальтов 12103 был использован для приготовления прозрачно-полированных шлифов. Исследование химического состава оливина

и хромита было выполнено в Лаборатории локальных методов исследования вещества кафедры петрологии геологического факультета МГУ с использованием электронно-зондового микроанализатора “JEOL” JXA-8230. Для работы использовались прозрачно-полированные шлифы, предварительно покрытые углеродной плёнкой толщиной около 25 нм.

Аналитические измерения проводились при ускоряющем напряжении 20 кВ и силе тока электронного зонда 70 нА и диаметре пучка 1 мкм, как для оливина, так и для хромита. Детали аналитического протокола и стандартные образцы, использованные во время анализа, описаны в [8, 9]. Для каждого оливинового и хромитового зерна производилось до 3 анализов, усреднённые значения приведены в Приложении 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оливин. Средние составы 25 зёрен оливина из образца 12103 представлены в Приложении 1 и нанесены на рис. 3 в сравнении с составами оливина из архейско-протерозойских коматиитов [10]. Краевые части зёрен обогащены железом. В рамках работы были проанализированы только центральные магнетиальные зоны оливина. Содержания Fo в оливине находится в диапазоне 87.5–82.2 мол. % ($Fo = MgO / [MgO + FeO] \cdot 100$, мол. %). Содержания

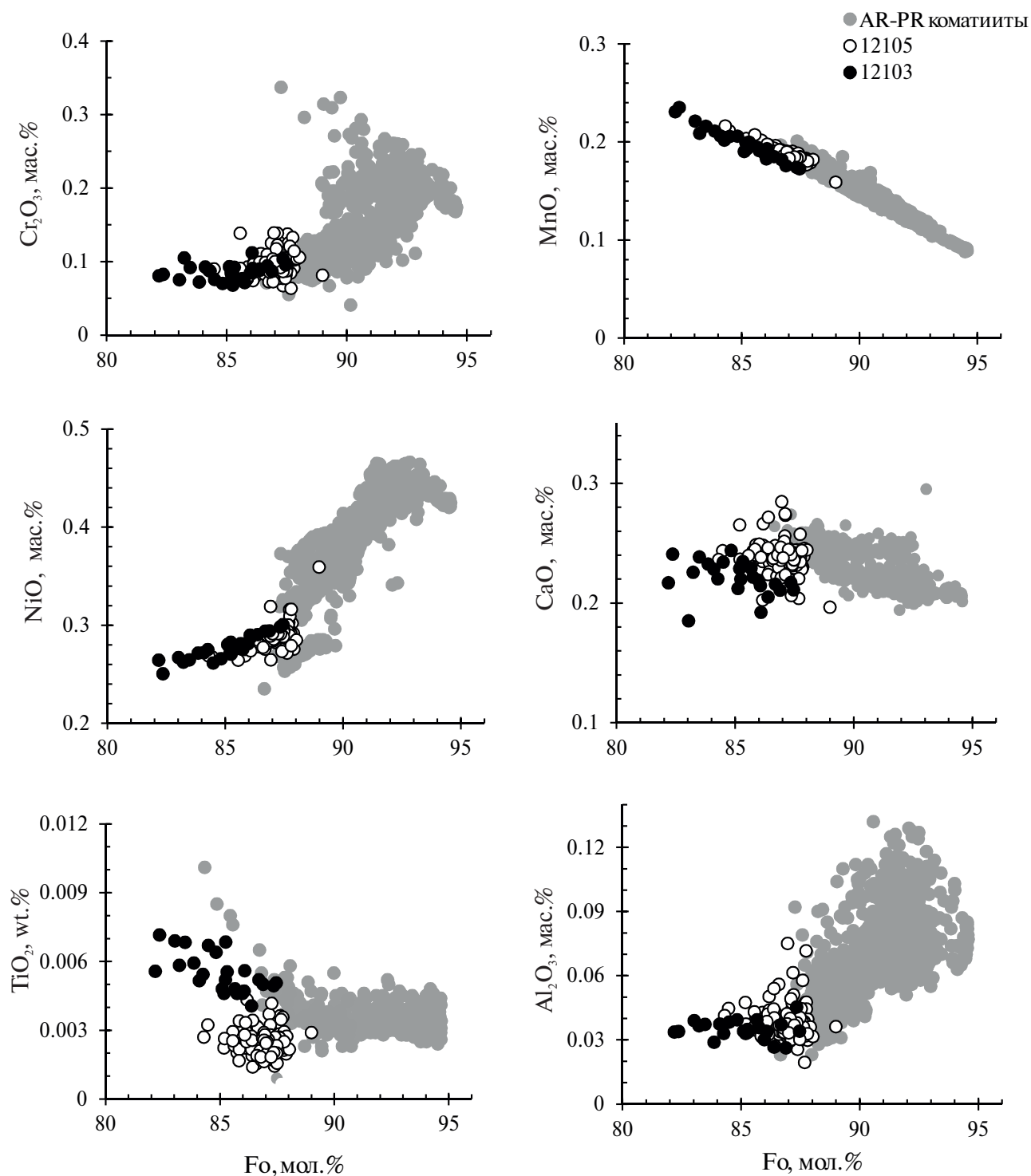


Рис. 3. Состав оливина из коматиитовых базальтов Ветреного пояса образца 12103 (эта работа) в сравнении с составами оливина из типичных архейско-протерозойских коматиитов [10] и образца 12105 [11].

Al₂O₃ в оливине находятся в диапазоне 0.027–0.049 мас. %. В центральных частях зёрен не наблюдается зональности по Mg#, но наблюдается зональность по содержанию P (рис. 2). Концентрации Ti и Mn в оливине демонстрируют

отрицательную корреляцию с содержанием Fo, в то время как для Ni наблюдается положительная корреляция (рис. 3). Наличие сильных корреляций в оливине между содержанием Fo и другими элементами свидетельствуют о том, что при

анализе удалось успешно избежать изменённых областей, обогащённых железом. Не наблюдаются корреляции содержаний Fo в оливине с Cr, Al и Ca. Полученные данные согласуются с составами оливина из изученного ранее образца 12105 оливиновых кумулатов лавового озера Виктория [11]. В целом, состав оливинов из коматиитов Ветреного пояса продолжает тренд коматиитов архейского возраста в железистой части (Fo < 89 мол. %, рис. 3).

Хромит. Средние составы хромитов образца оливиновых кумулатов 12103 приведены в Приложении 1. Анализируемые зёрна находятся в виде включений в оливине, имеют Cr# (атомное отношение $\text{Cr}/[\text{Cr}+\text{Ti}+\text{Al}+\text{Fe}^{3+}]$) в диапазоне 0.64–0.67, что согласуется с калибровочным диапазоном Al-геотермометра [12] (Cr# 0.00–0.69). Содержание Fe^{3+} , определённое в предположении идеальной стехиометрии как 0.05–0.07 катионов на формульную единицу, также соответствует калибровочному диапазону геотермометра (0.00 до 0.11 ф.е., [12]). Проанализированные зёрна хромита характеризуются Mg# [$=\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$] в диапазоне 0.12–0.25 и сильной линейной корреляцией между содержанием MnO и Mg#, что указывает на неизменённый характер проанализированных зёрен.

Термометрия по содержанию Al в оливине. Оценки температуры на основе Al-геотермометра в оливине [12] были проведены для диапазона составов оливина от 82.2 до 87.5 мол. % Fo. Данный диапазон является продолжением кристаллизационного тренда коматиитовых базальтов Ветреного пояса, которые начали кристаллизацию с Fo 89.5 мол. % [6], и для которых были опубликованы температуры кристаллизации [11]. Результаты термометрии приведены в Приложении 1 как среднее из трёх определений для каждой пары оливин-хромит. Средняя погрешность для выборки составляет $\pm 11^\circ\text{C}$, (здесь и далее погрешности указаны для 95% доверительного интервала), что ниже опубликованной ошибки метода $\pm 25^\circ\text{C}$ [12]. Главным источником ошибки является погрешность в измерениях концентраций Al в оливине. Средняя погрешность определения Al_2O_3 в оливине составила ± 0.011 мас. %.

Средняя температура для $N = 25$ составляет $1253 \pm 11^\circ\text{C}$, что в пределах ошибки соответствует ранее опубликованным оценкам для более магнетитового образца $12105\text{--}1240 \pm 25^\circ\text{C}$ [11]. Полученные температуры изображены на рис. 4 как функция содержания Fo в оливине. Корреляции между содержанием Fo в оливине и температурой не наблюдается. Для сравнения нанесены линии

кристаллизации родоначального расплава Ветреного пояса с номинально безводным составом и при исходном содержании 1 мас. % H_2O .

ДИСКУССИЯ

Вторичные преобразования. Архейские и протерозойские коматииты подвержены воздействию вторичных преобразований, которые затрудняют изучение первичных геохимических характеристик этих пород. Метаморфизм дополнительно усугубляет эту проблему, изменяя первичные минеральные ассоциации и приводя к перераспределению элементов.

Горные породы в разрезе лавового озера Виктория, являющегося частью ультрамафической свиты Ветреного пояса, обладают высокой степенью сохранности. Они испытали метаморфизм зеленосланцевой фации, что привело к полной девитрификации и изменению вулканических закалочных стёкол, а также к частичному замещению первичных минералов вторичными. Тем не менее, породы содержат большое количество реликтов оливина, клинопироксена и хромита. Высокую степень сохранности пород подтверждает наличие магматической зональности по R в оливине (рис. 2) и наличие значимых корреляций между содержанием MgO в породах и многими элементами, несовместимыми с оливином [7] — т.е. линии оливинового контроля, которые отражают эволюцию состава расплава при фракционной кристаллизации оливина.

Субсолидусное переуравновешивание. Прежде чем начать обсуждение условий кристаллизации опираясь на данные оливиновой термометрии, необходимо сказать несколько слов о равновесности системы применительно к изученным кумулатам лавового озера Виктория. Применение Mg–Fe-обменного оливин-шпинелевого геотермометра [13] к изученным парам оливина и хромита даёт температурные оценки в диапазоне $400\text{--}900^\circ\text{C}$. Очевидно, что полученные температуры демонстрируют наличие твердофазного субсолидусного переуравновешивания Mg–Fe между оливином и хромитом на пост-кристаллизационном этапе. Это широко известный эффект, т. к. FeO/MgO-отношения в шпинелидах подвержены субсолидусному переуравновешиванию [12, 13]. Наличие субсолидусного переуравновешивания способствует также длительная история остывания, характерная для крупных тел (глубина озера Виктория превышал 100 м, рис. 1).

Несмотря на субсолидусное низкотемпературное переуравновешивание Fe и Mg, Al или Cr в гораздо меньшей степени подвержены данным

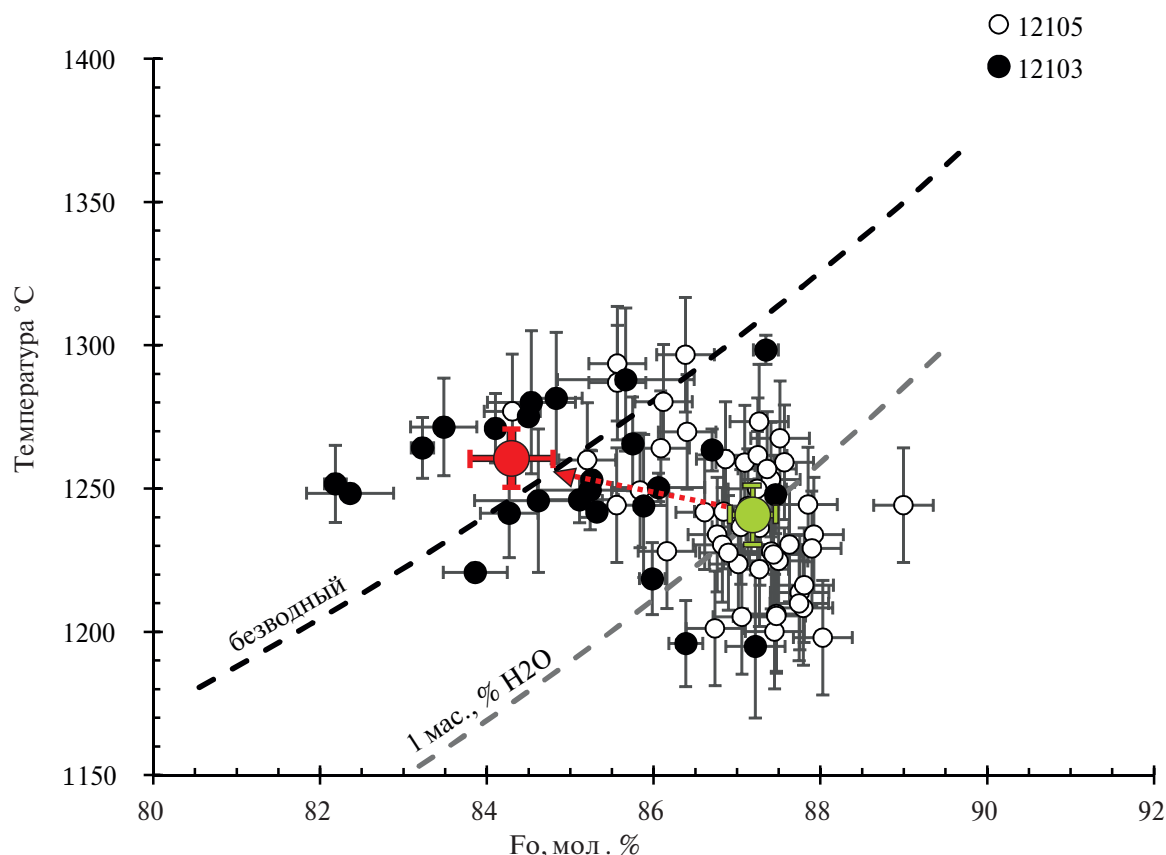


Рис. 4. Температуры кристаллизации коматиитовых базальтов Ветреного пояса, полученные с помощью Al-термометрии в оливине [12]. Данные для образца 12105 из [11]. Пунктирными линиями показаны линии кристаллизации расплава коматиитовых базальтов без водного флюида и исходного расплава, содержавшего 1 мас. % H_2O . Крупными значками показаны средние температуры кристаллизации для образцов 12105 и 12103 (для $\text{Fo} < 86$ мол. %). Стрелка отражает повышение температуры в расплаве.

эффектам за счёт более низких скоростей диффузии, что оставляет возможность для применения Al-геотермометра в оливине [12].

Условия кристаллизации. Хорошо известен эффект понижения температур кристаллизации в магматической системе при наличии водного флюида в расплаве [14]. Поэтому независимая оценка температур кристаллизации является одним из методов для определения наличия воды в системе.

Как было показано в работе [11], температуры кристаллизации для наиболее ранних оливин-хромитовых пар, в диапазоне составов оливина 89.0–86.4 мол. % Fo образуют облако точек вокруг линии кристаллизации магмы с 1 мас. % H_2O со средним значением температуры $1240 \pm 25^\circ\text{C}$. Эти наблюдения подтверждают наличие воды в магмах Ветреного пояса и согласуются с прямыми измерениями воды в расплавленных включениях в оливине на уровне не менее 0.4 ± 0.2 мас. % H_2O [11]. Тем не менее, учитывая ранний характер контаминации расплавов

веществом континентальной коры и её существенную степень (не менее 15% [11]) проблематично установить источник воды, и высока вероятность, что вода была привнесена вместе с ассимилированным материалом коры.

Настоящая работа дает оценки температур на более поздних этапах кристаллизации, в диапазоне Fo 87.5–82.2 мол. %. Температуры кристаллизации для диапазона Fo 87.5–86.0 мол. % с средним значением $T = 1240 \pm 25^\circ\text{C}$ согласуются с оценками, полученными для наиболее ранних этапов кристаллизации и ложатся на линию кристаллизации с 1 мас. % H_2O (рис. 4). На более поздних этапах кристаллизации после Fo 86.0 мол. % температурные оценки смещаются в сторону линии безводного ликвидуса. Это может свидетельствовать о дегазации магм в процессе кристаллизации в поверхностных условиях, что также ранее описывалось для архейских коматиитов [15]. При этом средняя температура для этой группы данных составляет $1260 \pm 9^\circ\text{C}$,

для $N = 17$, что на 20°C превышает температуры кристаллизации более примитивных оливин-хромитовых пар. Это систематическое различие между группами точек наблюдается несмотря на погрешность определения температур и может являться результатом эффекта выделения скрытой теплоты плавления при массовой кристаллизации магматической системы в процессе её дегазации [16]. Нами было проведено моделирование кристаллизации расплава коматиитовых базальтов Ветреного пояса с помощью программы Petrolog3 [17] на отрезке составов оливина Fo 86.4–82.4 мол. % с применением набора моделей для кристаллизации оливина [18], орто- и клинопироксена [19] и шпинели [20]. Данная модель предполагает, что основной кристаллизующейся фазой в указанном диапазоне является оливин. Хромит также кристаллизуется на этом отрезке, но является акцессорной фазой, имеющей незначительное влияние на степень кристаллизации системы. В конце заданного диапазона, начиная с Fo 82.4 мол. %, на ликвидусе появляется ортопироксен, не внося значительный вклад в массу кристаллического вещества. Степень кристаллизации в диапазоне Fo 86.4–82.4 мол. % составляет порядка 8%. Согласно оценкам, приведённым в работе [16] для андезитовых систем, 1% кристаллизации плагиоклаза+ортопироксена+магнетита приводит к подъёму температуры системы на 3.2°C . Так как фазы, кристаллизующиеся из магм Ветреного пояса, являются более тугоплавкими, то оценка [16] рассматривается нами как минимальная и согласно ей, 8% кристаллизации приведут к разогреву системы на $\sim 26^\circ\text{C}$, что сопоставимо с наблюдаемыми данными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Температуры кристаллизации коматиитовых расплавов Ветреного пояса на ранних стадиях кристаллизации, полученные по Al-термометрии в оливине, составляли $1240 \pm 25^\circ\text{C}$. Это указывает на наличие водного флюида в расплаве на ранних этапах кристаллизации (начиная с Fo 89.0 мол. %), что согласуется с прямыми измерениями воды в расплавных включениях в оливине на уровне 0.4 ± 0.2 мас. % H_2O . На более поздней стадии кристаллизации начиная с Fo 86.0 мол. %, вероятно, произошел подъём температур кристаллизации до $1260 \pm 9^\circ\text{C}$. Это является возможным свидетельством дегазации расплавов коматиитовых базальтов. Потеря водного флюида могла привести к массовой кристаллизации оливина на уровне 8% и высвобождению скрытой теплоты

плавления, приведшей к разогреву в закрытой системе на 26°C . Дегазация расплава при низких содержаниях воды в расплаве свидетельствует о кристаллизации в приповерхностных условиях. Для подтверждения данной гипотезы авторы планируют расширить статистику данных по температурам кристаллизации коматиитовых базальтов Ветреного пояса и дополнительно изучить составы расплавных включений в оливине.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность И.С. Пухтелю за предоставление образцов для исследования, В.О. Япаскурту за помощь в проведении микрозондовых исследований.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-77-00081, <https://rscf.ru/project/22-77-00081/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bickle M. J., Hawkesworth C. J., Martin A., et al. Mantle composition derived from the chemistry of ultramafic lavas // *Nature*. 1976. V. 263. № 5578. P. 577–580.
2. Barnes S. J., Offen M. Ti-rich komatiites from northern Norway // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1990. V. 105. № 1. P. 42–54.
3. Arndt N. T., Brüggemann G. E., Lehnert K. et al. Geochemistry, petrogenesis and tectonic environment of Circum-Superior Belt basalts, Canada // *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 1987. V. 33. № 1. P. 133–145.
4. Echeverria L. M. Tertiary or Mesozoic komatiites from Gorgona Island, Colombia: field relations and geochemistry // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1980. V. 73. № 3. P. 253–266.
5. Hanksi E., Walker R. J., Huhma H. et al. Origin of the Permian-Triassic komatiites, northwestern Vietnam // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2004. V. 147. P. 453–469.
6. Puchtel I. S., Haase K. M., Hofmann A. W. et al. Petrology and geochemistry of crustally contaminated komatiitic basalts from the Vetryny Belt, southeastern Baltic Shield: evidence for an early Proterozoic mantle plume beneath rifted Archean continental lithosphere // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1997. V. 61. № 6. P. 1205–1222.
7. Puchtel I. S., Touboul M., Blichert-Toft J. et al. Lithophile and siderophile element systematics of Earth's mantle at the Archean–Proterozoic boundary: Evidence from 2.4 Ga komatiites // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2016. V. 180. P. 227–255.

8. Nekrylov N., Kamenetsky V. S., Savelyev D. P. et al. Platinum-group elements in Late Quaternary high-Mg basalts of eastern Kamchatka: Evidence for minor cryptic sulfide fractionation in primitive arc magmas // *Lithos*. V. 412. P. 106608.
9. Batanova V. G., Thompson J. M., Danyushevsky L. V. et al. New olivine reference material for in situ micro-analysis // *Geostand. Geoanal. Res.* 2019. V. 43 № 3. P. 453–473.
10. Sobolev A. V., Hofmann A. W., Kuzmin D. V. et al. The amount of recycled crust in sources of mantle-derived melts // *Science*. 2007. V. 316. № 5823. P. 412–417.
11. Асафов Е. В., Кошлякова А. Н., Соболев А. В. и др. Температуры кристаллизации коматиитовых базальтов Ветреного пояса, Карелия // *Труды ВЕСЭМПГ*. 2023. Т. 782. С. 53–56.
12. Coogan L. A., Saunders A. D., Wilson R. N. Aluminum-in-olivine thermometry of primitive basalts: Evidence of an anomalously hot mantle source for large igneous provinces // *Chem. Geol.* 2014. V. 368. P. 1–10.
13. Ballhaus C., Berry R. F., Green D. H. High pressure experimental calibration of the olivine-orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer: implications for the oxidation state of the upper mantle // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1991. V. 107. P. 27–40.
14. Gaetani G. A., Grove T. L. The influence of water on melting of mantle peridotite // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1998. V. 131. P. 323–46.
15. Sobolev A. V., Asafov E. V., Gurenko A. A. et al. Komatiites reveal a hydrous Archaean deep-mantle reservoir // *Nature*. 2016. V. 531. № 7596. P. 628–632.
16. Blundy J., Cashman K., Humphreys M. Magma heating by decompression-driven crystallization beneath andesite volcanoes // *Nature*. 2006. V. 443. № 7107. P. 76–80.
17. Danyushevsky L. V., Plechov P. Y. Petrolog3: Integrated software for modeling crystallization processes // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2011. V. 12. № 7.
18. Ford C. E., Russell D. G., Craven J. A. et al. Olivine-liquid equilibria: temperature, pressure and composition dependence of the crystal/liquid cation partition coefficients for Mg, Fe²⁺, Ca and Mn // *J. Petrol.* 1983. V. 24. № 3. P. 256–266.
19. Ariskin A. A., Frenkel M. Y., Barmina G. S., Nielsen R. L. COMAGMAT: a Fortran program to model magma differentiation processes // *Comput. Geosci.* 1993. V. 19. № 8. P. 1155–1170.
20. Ariskin A. A., Nikolaev G. S. An empirical model for the calculation of spinel-melt equilibria in mafic igneous systems at atmospheric pressure: 1. Chromian spinels // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1996. V. 123. P. 282–292.

CRYSTALLIZATION TEMPERATURES OF VETRENY BELT KOMATIITIC BASALTS, KARELIA, BASED ON PARTITION OF ALUMINA BETWEEN OLIVINE AND CHROMITE

E. V. Asafova^{*}, A. N. Koshlyakova¹, Academician of the RAS A. V. Sobolev²,
D. P. Tobelko¹, N. N. Koshlyakova³, S. V. Mezhelovskaya⁴

¹Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

²l'Institut des Sciences de la Terre, University Grenoble Alpes, CS40700, 38058 Grenoble CEDEX 9, France

³Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Moscow, Russian Federation

⁴Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

^{*}E-mail: asafoff@geokhi.ru

The Archean-Proterozoic transition in Earth's history is marked by significant changes in mantle dynamics and temperature regimes. A notable consequence is the disappearance of Al-depleted komatiites in the late Archean and the nearly complete absence of true komatiites since the Proterozoic. In this study, we present the investigation of the 2.41 Ga komatiitic basalts of the Vetreny Belt, dating back to the Archean-Proterozoic boundary. These rocks provide unique data on the composition of olivine and chromite, as well as on the crystallization temperatures based on Al-in-olivine geothermometry for Vetreny Belt komatiitic basalts. The temperatures of the earliest stages of crystallization were approximately 1240±25°C, indicating the presence of water in the melt and aligning with measured water contents of 0.4±0.2 wt. % H₂O in the melt inclusions. However, during crystallization, the komatiitic basalt melt underwent degassing, resulting in mass crystallization and a temperature rise of approximately 20°C due to latent heat release. The degassing of water from the melt suggests crystallization in the surface conditions.

Keywords: komatiites, olivine, spinel, Karelia, Proterozoic, mantle, magma, crystallization