

УДК 552.11

ВАРИАЦИИ СОСТАВА И СТЕПЕНИ ПЛАВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКА ОЛИВИН-ПОРФИРОВЫХ ПОРОД КАМЧАТСКОГО МЫСА (ВОСТОЧНАЯ КАМЧАТКА): РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОХИМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СОДЕРЖАНИЙ РАССЕЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В РАСПЛАВАХ¹

© 2021 г. Н. Некрылов^{a, b, *}, А. А. Корнеева^{b, c}, Д. П. Савельев^d, Т. Н. Анциферова^{a, e}

^a Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, Москва, Россия

^b Институт экспериментальной минералогии РАН, Черноголовка, Россия

^c Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

^d Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

^e Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

*e-mail: nekrilov.n@gmail.com

Поступила в редакцию 17.03.2020 г.

После доработки 25.04.2020 г.

Принята к публикации 21.05.2020 г.

Проведено геохимическое моделирование содержаний рассеянных элементов в первичных расплавах оливин-порфировых пород Камчатского Мыса. На основе этого моделирования установлена существенная химическая гетерогенность их источника. Средний состав источника близок к E-DMM. Средняя оценка степени плавления, полученная для реконструированных составов первичных расплавов с использованием моделей порционного и кумулятивного фракционного плавления, находится в диапазоне от 9.1 ± 3.8 до $15.4 \pm 5.2\%$, что немного превышает оценки степени плавления для примитивных стекол MORB (7.4 ± 2.2 и $12.5 \pm 3.8\%$). Повышенная относительно MORB средняя оценка степени плавления источника расплавов изучаемых оливин-порфировых базальтов хорошо согласуется с таковой для других пород офиолитового комплекса Камчатского Мыса. Низкое давление при плавлении мантии, вызванное повышенной скоростью декомпрессии относительно среднего для MORB значения, может объяснить повышенную степень плавления для пород Камчатского Мыса, а также наблюдаемые в них Sr-аномалии и сульфидное насыщение на самых ранних этапах магматической эволюции.

Ключевые слова: Камчатский Мыс, плавление мантии, оливин, расплавные включения

DOI: 10.31857/S0869590321010040

ВВЕДЕНИЕ

Полуостров Камчатский Мыс занимает уникальное геологическое положение, находясь на тройном сочленении Евразийской, Северо-Американской и Тихоокеанской плит (например, Avdeiko et al., 2007; Konstantinovskaja, 2001). В его пределах выделяется офиолитовый комплекс мелового возраста (Хотин, Шапиро, 2006), который привлекает внимание исследователей своими геохимическими и петрологическими особенностями (Батанова и др., 2014; Портнягин и др., 2005; Portnyagin et al., 2009, 2008). Высокая степень плавления мантии, оцениваемая как для вулканических пород (Portny-

agin et al., 2009), так и для реститовых перидотитов (Батанова и др., 2014), а также различные геохимические маркеры в составе пород и реконструированных расплавов (Portnyagin et al., 2009, 2008) позволили исследователям связать петрогенезис офиолитов Камчатского Мыса с влиянием протогавайского плюма.

Вулканические породы с примитивным (до $F_{0.90}$) оливином в пределах офиолитового комплекса Камчатского Мыса были впервые найдены только в 2014 г. (Савельев, 2014). Они представляют собой плагиоклаз-оливин-порфировые базальты, валовый состав которых отвечает составу пикритов из-за обилия кумулятивного оливина — до 50–60 об. %. Их изотопно-геохимические характеристики и восстановленные параметры кристаллизации отвечают типичным базальтам средин-

¹ Дополнительная информация для этой статьи доступна по doi: 10.31857/S0869590321010040 для авторизованных пользователей.

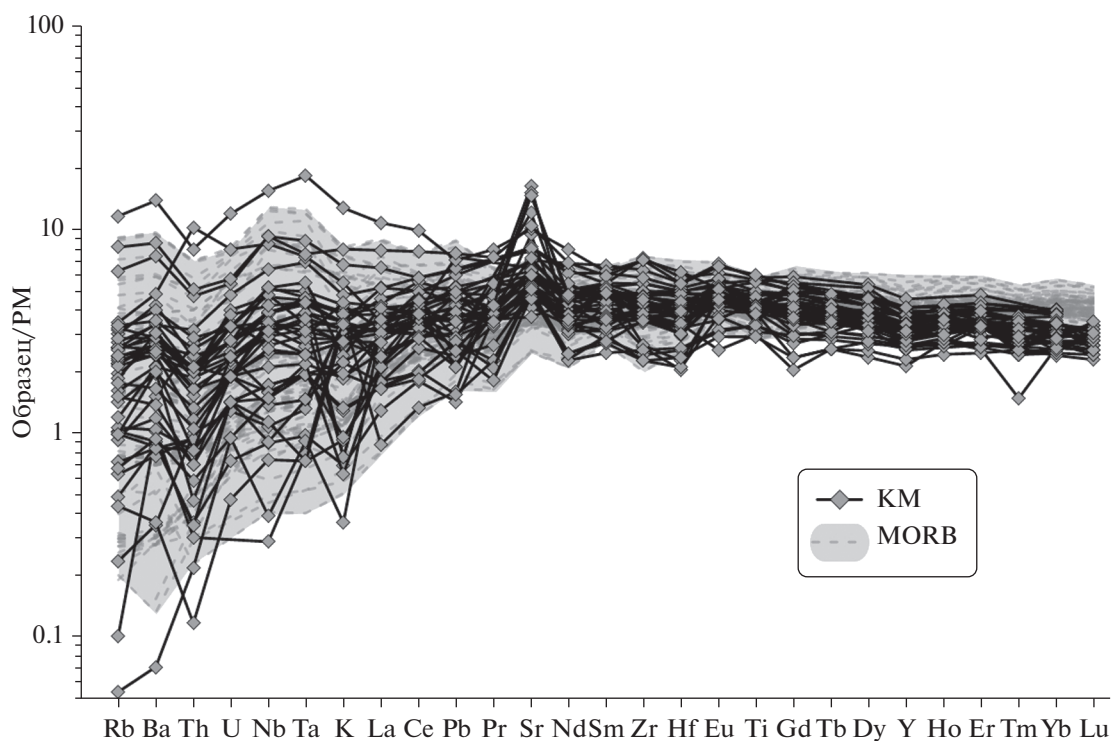


Рис. 1. Спектры распределения редких и рассеянных элементов в первичных расплавах оливин-порфировых базальтов Камчатского Мыса (КМ) в сравнении с составами примитивных стекол MORB (Jenner, O'Neill, 2012), пересчитанными на равновесие с Fo_{90} путем симуляции обратной кристаллизации оливина (Danyushevsky, Plechov, 2011).

но-океанических хребтов (MORB). В этих породах было также установлено проявление ранней сульфид-силикатной несмесимости, что вкупе с остальными характеристиками делает их идеальным объектом для изучения процессов генерации и ранней эволюции океанических магм (Korneeva et al., 2020; Savelyev et al., 2018).

Хорошая сохранность оливина позволила реконструировать составы родоначальных расплавов на основе изучения состава расплавных включений, захваченных ими (Korneeva et al., 2020). Наиболее интересными особенностями состава родоначальных расплавов этих пород являются весьма широкие вариации содержаний в них некогерентных рассеянных элементов и низкие содержания умеренно-некогерентных рассеянных элементов (к примеру, HREE) относительно примитивных стекол MORB (рис. 1). Микроэлементный состав оливина в этих породах указывает на то, что минералогический состав источника также соответствовал типичным для мантии MORB перидотитам (Korneeva et al., 2020). Данный факт позволяет нам предположить, что особенности содержаний рассеянных элементов в родоначальных расплавах этих пород связаны с химической гетерогенностью источника и различной степенью его плавления.

Уравнения, связывающие содержания рассеянных элементов в расплавах с их содержаниями

в источнике и степенью его плавления, хорошо известны (например, Gast, 1968; Liang, Liu, 2016; Shaw, 1970; Zou, 1998) и позволяют моделировать широкий диапазон процессов плавления для источников различного состава. Однако в большинстве исследований авторы используют фиксированные модели (к примеру, Попов и др., 2017; Миронов, Портнягин, 2018; Portnyagin et al., 2007a, 2007b, 2009; Volynets et al., 2010) и/или состав источника (к примеру, Краснова и др., 2013; Тобелко и др., 2019; Liang, Liu, 2016; Nekrylov et al., 2018; Stolper, Newman, 1994) для оценки параметров плавления мантии. Данный подход обосновывается тем, что выбранные модели и составы источника позволяют адекватно описать полученные в работах составы природных образцов.

В настоящей работе мы предприняли попытку оценить одновременно возможный диапазон значений степени плавления и состава источника для описанных ранее индивидуальных расплавов оливин-порфировых пород Камчатского Мыса (Korneeva et al., 2020). Мы показали, что содержания рассеянных элементов в большинстве этих расплавов могут быть в равной степени хорошо описаны с помощью моделей порционного и кумулятивного фракционного плавления, которые дают при этом существенно отличающиеся оценки определяемых параметров.

ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Существуют две “граничные” равновесные модели, связывающие состав плавящегося исходного материала с составом результирующего расплава — модель кумулятивного фракционного плавления (accumulative fractional melting, здесь и далее — AFM) (1) и модель порционного плавления (batch melting, здесь и далее — BM) (2).

$$\frac{C_i^l}{C_i^s} = \frac{1 - (1 - F)D_i}{F}, \quad (1)$$

$$\frac{C_i^l}{C_i^s} = \frac{1}{D_i + F(1 - D_i)}, \quad (2)$$

где C_i^l — концентрация элемента в результирующем расплаве, C_i^s — концентрация элемента в исходном материале (далее источник), D_i — коэффициент разделения элемента между расплавом и источником, F — степень плавления.

Обе рассматриваемые модели описывают упрощенные механизмы плавления мантии, которые не учитывают важных параметров магматической системы, таких как объемная пористость и процент расплава остающийся в источнике. Однако учет дополнительных параметров приведет к тому, что состав результирующего расплава полученных усложненных моделей будет находиться в промежуточной области между значениями, полученными с применением моделей BM и AFM (Zou, 1998). В случае высокой разницы между скоростями плавления и диффузионного переуравновешивания расплава с твердым остатком плавление также может быть неравновесным. Моделирование степени неравновесности плавления для реститовых перидотитов срединно-океанических хребтов показало, что для большинства образцов коррекция уравнений плавления дает результат в пределах “граничных” моделей равновесного порционного и фракционного плавления (Liang, Liu, 2016), что позволяет ей пренебречь. Данный факт позволяет нам использовать простые модели AFM и BM для того, чтобы рассчитать граничные значения степени плавления и состава источника на базе состава первичных расплавов оливин-порфиновых пород Камчатского Мыса.

Для того чтобы оценить состав первичных расплавов оливин-порфиновых пород Камчатского Мыса, мы предположили, что они были в равновесии с типичным оливином мантийных перидотитов — Fo_{90} (на основе данных о составе оливина в абиссальных перидотитах (например, Dick, 1989)). Далее мы пересчитали состав родоначальных расплавов Камчатского Мыса (Kornееva et al., 2020) на равновесие с оливином Fo_{90} путем симуляции обратной кристаллизации оливина, используя программное обеспечение Petrolog3 (Danyushevsky, Plechov,

2011). На этом этапе вычислений рассеянные элементы считались полностью некогерентными оливину. Рассчитанный состав первичных расплавов приведен в см. Supplementary: ESM_1.xls².

Для моделирования плавления мантии мы использовали несколько допущений: (1) источник расплавов имел средний модальный минеральный состав, близкий к деплетированной мантии MORB — DMM (Depleted MORB Mantle) (Workman, Hart, 2005) (в %): 57 *Ol*, 28 *Opx*, 13 *Cpx*, 2 *Spl*; (2) валовые коэффициенты разделения рассеянных элементов между источником и расплавом (C_0^i) (для Rb, Ba, U, Nb, Ta, La, Ce, Pb, Pr, Nd, Zr, Hf, Sm, Eu, Ti, Gd, Tb, Dy, Ho, Y, Er, Yb и Lu) также отвечали средним значениям для DMM (Workman, Hart, 2005); (3) коэффициент C_0^i не изменялся в ходе процесса плавления (плавление было модальным); (4) содержания рассеянных элементов в источнике могли варьировать от типичных содержаний в обедненном DMM (D-DMM) до таковых в примитивной мантии (PM) (обедненный, обогащенный и средний DMM из работы (Workman, Hart, 2005), PM из работы (McDonough, Sun, 1995)). Используя эти допущения, мы рассчитали диапазон содержаний рассеянных элементов в источниках от D-DMM до PM с шагом 0.1 (к примеру, 0.9 D-DMM + 0.1 A-DMM, 0.8 D-DMM + 0.2 A-DMM и т.д.) и состав результирующих расплавов для каждого из них при степени плавления от 0.5 до 50%, используя модели BM и AFM (см. Supplementary: ESM_2.xls). Для каждого состава первичного расплава (см. Supplementary: ESM_1.xls) методом наименьших квадратов может быть найден наиболее близкий к нему состав модельного результирующего расплава, полученного при моделировании BM и AFM каждого состава источника. При этом тем же методом можно определить, какому источнику отвечает модельный результирующий расплав, дающий лучшую аппроксимацию состава первичного расплава. На данном этапе моделирования мы не учитывали содержания Sr и Th в первичных расплавах оливин-порфиновых пород Камчатского Мыса, так как для большинства из них характерны положительные Sr- и отрицательные Th-аномалии (Kornееva et al., 2020). В качестве

² Составы первичных расплавов оливин-порфиновых пород Камчатского Мыса и подробные результаты геохимического моделирования представлены в соответствующих таблицах к русской и английской онлайн-версиям статьи на сайтах <https://elibrary.ru/> и <http://link.springer.com/> соответственно:

ESM_1.xls — Состав родоначальных расплавов оливин-порфиновых пород Камчатского Мыса;

ESM_2.xls — Результаты моделирования плавления мантии от 0.5 до 50% для состава источников варьирующего от D-DMM до PM;

ESM_3.xls — Результаты моделирования модального порционного и кумулятивного фракционного плавления для индивидуальных составов первичных расплавов оливин-порфиновых пород Камчатского Мыса.

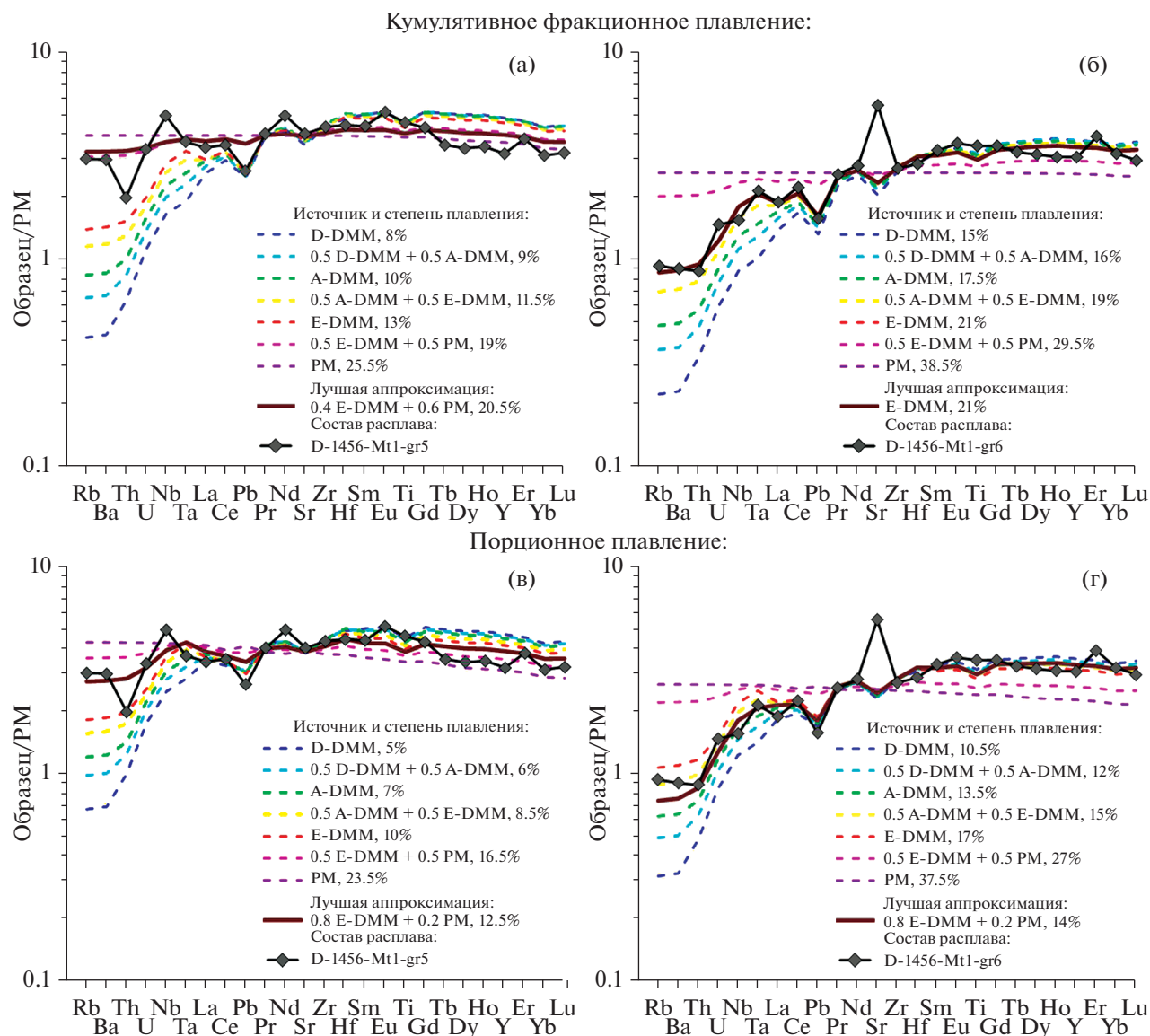


Рис. 2. Пример расчета состава источника и степени его плавления для составов первичных расплавов D-1456-Mt1-gr5 и D-1456-Mt1-gr6 (см. Supplementary: ESM_1.xls) с использованием моделей AFM и BM.

Пунктирными линиями обозначены лучшие аппроксимации состава рассматриваемых первичных расплавов для плавления некоторых промежуточных составов источников от D-DMM до PM.

иллюстрации мы рассчитали наиболее близкие составы для модельных результирующих расплавов семи промежуточных источников от D-DMM до PM (с шагом 0.5), а также лучшие аппроксимации двух составов первичных расплавов под номерами D-1456-Mt1-gr5 и D-1456-Mt1-gr6 (рис. 2).

Результаты проведенного моделирования для составов реконструированных первичных расплавов оливин-порфировых базальтов Камчатского Мыса представлены в табл. 1 и в Supplementary: ESM_3.xls.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты моделирования состава источника и степени его плавления для первичных расплавов оливин-порфировых базальтов Камчатского Мыса показывают, что модели BM и AFM позволяют аппроксимировать эти расплавы, в среднем с одинаковой минимальной суммой квадратов разности содержаний рассеянных элементов между модельным и реальным составом расплава (рис. 3). Этот вывод верен как для составов с достаточно точной аппроксимацией (низкая наименьшая сумма квадратов), так и для составов,

Таблица 1. Результаты моделирования состава источника и степени плавления для первичных расплавов оливин-порфировых пород Камчатского Мыса

Номер расплава	N*	Модель порционного плавления			Модель кумулятивного фракционного плавления		
		Источник	Степень плавления, %	$\min \sum (c_i^{\text{модель}} - c_i^{\text{расплав}})^2$	Источник	Степень плавления, %	$\min \sum (c_i^{\text{модель}} - c_i^{\text{расплав}})^2$
D-1456-Mt1-gr1	23	0.9 E-DMM + 0.1 PM	10.5	5.2	0.7 E-DMM + 0.3 PM	15.5	3.9
D-1456-Mt1-gr2	23	0.6 E-DMM + 0.4 PM	18.5	6.3	0.1 E-DMM + 0.9 PM	29	8.0
D-1456-Mt1-gr4	23	D-DMM	5	17.0	0.5 D-DMM + 0.5 A-DMM	8	16.2
D-1456-Mt1-gr5	23	0.8 E-DMM + 0.2 PM	12.5	5.8	0.4 E-DMM + 0.6 PM	20.5	6.7
D-1456-Mt1-gr6	23	0.8 A-DMM + 0.2 E-DMM	14	1.4	E-DMM	21	1.4
D-1456-Mt2-gr2	23	0.3 A-DMM + 0.7 E-DMM	9	8.0	0.8 E-DMM + 0.2 PM	15	6.6
D-1456-Mt2-gr3	23	0.7 A-DMM + 0.3 E-DMM	13.5	4.1	0.9 E-DMM + 0.1 PM	21.5	4.0
D-1456-Mt2-gr5	23	0.7 E-DMM + 0.3 PM	9.5	7.7	0.2 E-DMM + 0.8 PM	16.5	8.3
D-1456-Mt2-gr6	23	0.4 D-DMM + 0.6 A-DMM	6.5	8.6	0.4 A-DMM + 0.6 E-DMM	11.5	9.7
D-1456-Mt2-gr7	23	0.8 A-DMM + 0.2 E-DMM	13	3.5	0.9 E-DMM + 0.1 PM	21.5	3.5
D-1456-Mt2-gr8	23	0.5 E-DMM + 0.5 PM	7.5	19.6	-	-	-
D-1456-Mt3-gr2	23	0.6 D-DMM + 0.4 A-DMM	8	4.7	0.6 A-DMM + 0.4 E-DMM	14	4.6
D-1456-Mt3-gr3	23	0.3 A-DMM + 0.7 E-DMM	16.5	3.0	0.8 E-DMM + 0.2 PM	25	2.3
D-1456-Mt3-gr4	23	0.6 E-DMM + 0.4 PM	13.5	4.7	0.1 E-DMM + 0.9 PM	22	6.7
D-1456-Mt3-gr5	23	0.4 A-DMM + 0.6 E-DMM	8	9.9	0.8 E-DMM + 0.2 PM	14	8.0
D-1456-Mt3-gr7b	23	0.9 E-DMM + 0.1 PM	10.5	4.2	0.6 E-DMM + 0.4 PM	17.5	4.2
D-1456-Mt4-gr1	23	0.7 E-DMM + 0.3 PM	14	7.8	0.4 E-DMM + 0.6 PM	21	8.9
D-1456-Mt4-gr4	23	0.8 E-DMM + 0.2 PM	10.5	5.6	0.5 E-DMM + 0.5 PM	16.5	7.7
D-1456-Mt4-gr5	23	0.7 A-DMM + 0.3 E-DMM	8	9.8	0.9 E-DMM + 0.1 PM	14	7.6
D-1456-Mt4-gr6	23	0.9 E-DMM + 0.1 PM	9.5	7.8	0.7 E-DMM + 0.3 PM	14.5	6.4

Таблица 1. Окончание

Номер расплава	N*	Модель порционного плавления			Модель кумулятивного фракционного плавления		
		Источник	Степень плавления, %	$\min \sum (c_i^{\text{модель}} - c_i^{\text{расплав}})^2$	Источник	Степень плавления, %	$\min \sum (c_i^{\text{модель}} - c_i^{\text{расплав}})^2$
D-1456-Mt4-gr7	23	D-DMM	6.5	4.8	0.8 A-DMM + 0.2 E-DMM	12.5	5.2
D-1456-Mt4-gr2	23	—	—	—	0.5 D-DMM + 0.5 A-DMM	9	12.1
D-1456-Mt4-gr3	23	0.5 A-DMM + 0.5 E-DMM	10.5	4.5	0.8 E-DMM + 0.2 PM	18	4.1
D1454-1	19	0.9 E-DMM + 0.1 PM	6	8.3	0.4 E-DMM + 0.6 PM	13	21.6
D1454-3a	19	0.6 E-DMM + 0.4 PM	6.5	17.1	PM	13	36.4
D1454-4	19	—	—	—	0.2 E-DMM + 0.8 PM	17.5	16.1
D1454-6	19	0.6 D-DMM + 0.4 A-DMM	3.5	11.6	0.9 E-DMM + 0.1 PM	9.5	7.6
D1454-7	19	0.8 E-DMM + 0.2 PM	8.5	10.3	0.5 E-DMM + 0.5 PM	14	10.7
D1454-9a	19	0.6 A-DMM + 0.4 E-DMM	8.5	3.8	0.9 E-DMM + 0.1 PM	14	2.7
D1454-12	19	0.8 D-DMM + 0.2 A-DMM	2.5	19.0	0.6 A-DMM + 0.4 E-DMM	5.5	9.0
D1454-13b	19	0.3 D-DMM + 0.7 A-DMM	4.5	3.8	0.9 E-DMM + 0.1 PM	10.5	2.5
D1456-19a	19	0.5 A-DMM + 0.5 E-DMM	7	12.0	0.8 E-DMM + 0.2 PM	13	9.0
D1456-29	19	0.7 E-DMM + 0.3 PM	13	4.3	0.3 E-DMM + 0.7 PM	21	7.8
D1456-30	19	0.9 D-DMM + 0.1 A-DMM	3.5	15.9	0.9 E-DMM + 0.1 PM	11	21.6
D1456-32	19	0.7 E-DMM + 0.3 PM	10	5.1	0.3 E-DMM + 0.7 PM	16.5	9.6
D1456-35	19	D-DMM	4.5	3.3	0.4 D-DMM + 0.6 A-DMM	7.5	2.2
D1456-36	19	0.3 D-DMM + 0.7 A-DMM	6	3.9	E-DMM	11.5	2.4
N-MORB**	23	0.4 D-DMM + 0.6 A-DMM	7.4 ± 2.2%	4.9 ± 3.5%	0.8 A-DMM + 0.2 E-DMM	12.5 ± 3.8%	4.9 ± 3.5%

* Число элементов, для которых проводилось моделирование.

** Среднее по 67 примитивным стеклам MORB (Jenner, O'Neill, 2012).

которые не могут быть хорошо аппроксимированы в рамках данной модели (высокая наименьшая сумма квадратов). Невозможность аппроксимации некоторых составов расплавов, наиболее вероятно, может быть связана с влиянием аналитической ошибки при анализе расплавных включений, на основе которых они были реконструированы, или с существенными отличиями состава источника (минералогического или химического) от принятых в рамках данной модели. В табл. 1 приведены и обсуждаются ниже только данные относительно тех первичных расплавов, которые удовлетворительно аппроксимируются хотя бы одной из используемых моделей плавления – 37 из 46 составов, для которых производился расчет. Из-за невозможности выбора объективного уровня суммы наименьших квадратов удовлетворительность аппроксимации определялась субъективным сопоставлением полученных спектров распределения рассеянных элементов.

Результаты моделирования с использованием модели ВМ показывают, что первичные расплавы оливин-порфировых пород Камчатского Мыса образовались при 2.5–18.5% плавления источников, состав которых варьировал от D-DMM до 0.5 E-DMM + 0.5 PM. Результаты моделирования с использованием модели АФМ показывают более высокие оценки степени плавления (от 5.5 до 29%) и в среднем более обогащенный состав источника: от 0.5 D-DMM + 0.5 A-DMM до PM. Полученные оценки степени плавления при использовании этих моделей хорошо коррелируют друг с другом ($R^2 = 0.96$), составы источников также находятся в прямой зависимости, но с меньшим коэффициентом корреляции ($R^2 = 0.74$) (рис. 4). Средние значения степени плавления для моделей ВМ и АФМ составляют 9.1 ± 3.8 и $15.4 \pm 5.2\%$. Средний состав источников – 0.5 A-DMM + 0.5 E-DMM и 0.9 E-DMM + 0.1 PM соответственно (рис. 4).

Для сравнения аналогичное моделирование было проделано и для выборки примитивных ($Mg\# > 62$ мол. %) стекол MORB на основе работы (Jenner, O'Neill, 2012). Удовлетворительная аппроксимация была получена для 67 из 79 примитивных стекол, пересчитанных на равновесие с Fo_{90} . Модель АФМ позволяет лучше аппроксимировать состав большинства из них: 44 против 23 (рис. 3). Средний состав источника и степень его плавления, оцененные для них по модели АФМ, отвечают 0.8 A-DMM + 0.2 E-DMM и $12.5 \pm 3.8\%$, по модели ВМ – 0.4 D-DMM + 0.6 A-DMM и $7.4 \pm 2.2\%$ соответственно (рис. 4).

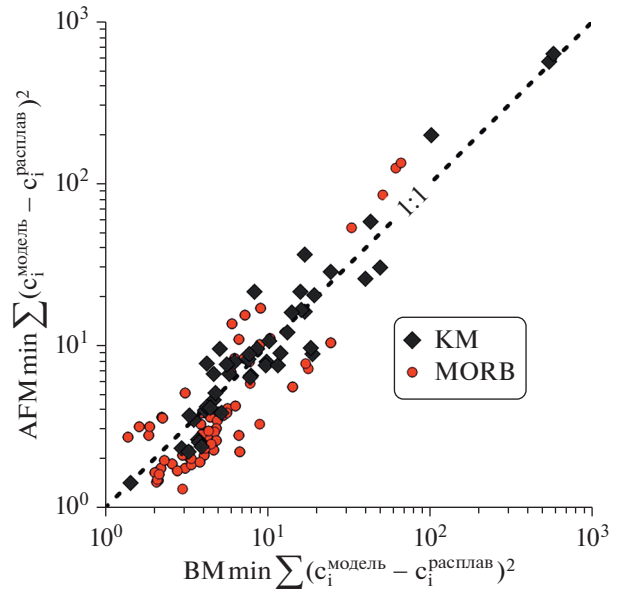


Рис. 3. Сравнение наименьшей суммы квадратов разности содержаний рассеянных элементов в составах первичных расплавов оливин-порфировых пород Камчатского Мыса (KM) и MORB по (Jenner, O'Neill, 2012) и в модельных расплавах, являющихся их лучшими аппроксимациями для моделей ВМ и АФМ.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Влияние ошибок в реконструкции расплавов на результаты моделирования

Первичные расплавы оливин-порфировых пород Камчатского Мыса, для которых мы рассчитали возможный диапазон составов источников и степень их плавления, были реконструированы на основе составов их родоначальных расплавов (Korneeva et al., 2020). Их родоначальные расплавы, в свою очередь, были реконструированы на основе состава гомогенизированных расплавных включений в оливине. Одним из основных параметров при этом было начальное содержание железа в расплавах (FeO_i). Расплавные включения переуравновешиваются с оливином-хозяином в ходе остывания, что приводит к непропорциональной (относительно Mg) диффузионной потере железа, также называемой Fe-loss (Danyushevsky et al., 2000). Ошибка в оценке содержания FeO_i значительно отражается на составе расплавов и, соответственно, расчетных условиях их кристаллизации.

Для всех родоначальных расплавов оливин-порфировых пород Камчатского Мыса FeO_i было оценено в 7.93 мас. % (Korneeva et al., 2020), однако реальное начальное содержание железа в этих расплавах могло существенно отличаться от этого значения. Разные подходы к реконструкции FeO_i могут давать результат, отличающийся от нее в

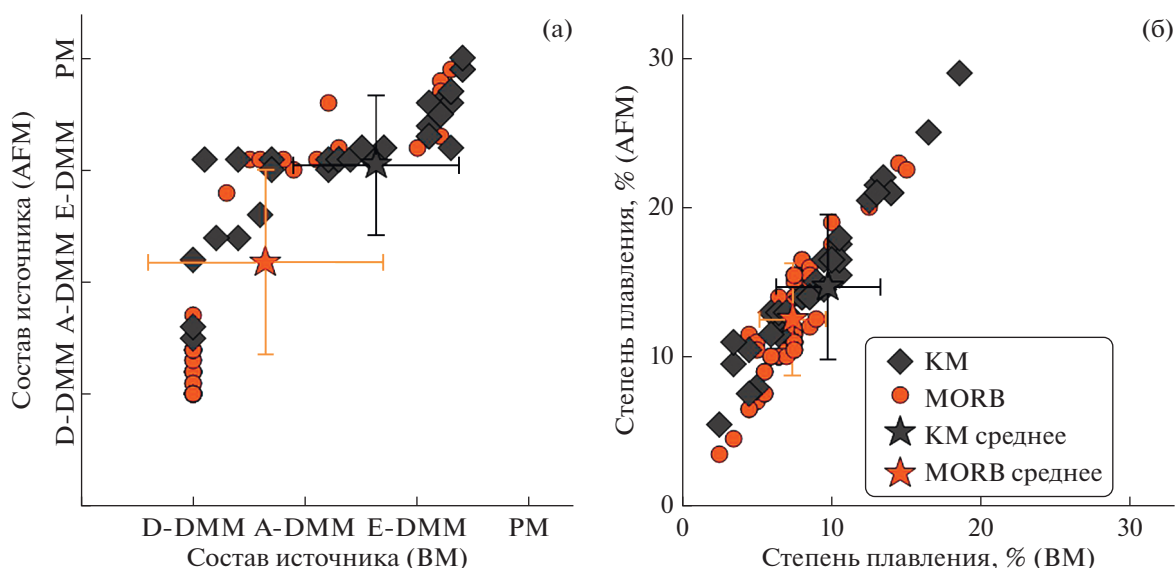


Рис. 4. Соотношение результатов моделирования состава источника и степени плавления для первичных расплавов оливин-порфирированных пород Камчатского Мыса (KM) и MORB по (Jenner, O'Neill, 2012) с использованием моделей BM и AFM.

пределах ~ 1 мас. %. Для того чтобы оценить, насколько эта ошибка влияет на результат моделирования, мы повторили все вычисления от реконструкции составов родоначальных расплавов по составу расплавных включений до вычисления значений степени плавления и состава источников первичных расплавов при условиях, когда содержание FeO_i составляет 6.93 и 8.93 мас. %. Средние результаты расчета по модели BM при начальном содержании железа, равном 6.93 мас. %, составили $8 \pm 3.5\%$ плавления для источника состава 0.4 A-DMM + 0.6 E-DMM, при $FeO_i = 8.93$ мас. % – $10.3 \pm 4.3\%$ плавления для источника состава 0.6 A-DMM + 0.4 E-DMM. Использование модели AFM, в свою очередь, дает $13.9 \pm 5.1\%$ и E-DMM для $FeO_i = 6.93$ мас. % и $17 \pm 5.4\%$ и 0.9 E-DMM + 0.1 PM для $FeO_i = 8.93$ мас. %. Следовательно, ошибка оценки степени плавления, вызванная возможными ошибками при оценке содержания FeO_i , составляет $\sim 11\%$ для модели BM и $\sim 10\%$ для модели AFM, ошибка определения состава источника – не более 10% от смеси модельных составов. Таким образом, можно заключить, что даже существенная ошибка при реконструкции состава первичных расплавов не влияет критически на полученный результат.

Вариации состава источника

Полученные нами оценки возможных вариаций состава источника показывают его среднюю обогащенность рассеянными элементами относительно A-DMM. Даже минимальная оценка, которую дает модель BM, показывает, что он зани-

мает промежуточное положение между A-DMM и E-DMM, в то время как модель фракционного плавления показывает максимальную оценку, близкую к E-DMM. Большой разброс оценок состава источника для индивидуальных составов первичных расплавов (рис. 4а) на первый взгляд может показаться необычным, однако это наблюдение не является уникальным для примитивных расплавных включений. Во множестве работ было показано, что они могут сохранять информацию о первичной гетерогенности источника, которая теряется при дальнейшем смешении расплавов (Соболев, 1996; Sides et al., 2014; Yaxley et al., 2004).

В то же время полученные для использованной выборки примитивных стекол MORB (Jenner, O'Neill, 2012) оценки состава источника также имеют широкие вариации, однако, в среднем близки к A-DMM (рис. 4).

Оценка степени плавления

Полученные нами в результате моделирования содержания рассеянных элементов оценки степени плавления источника расплавов можно сравнить с результатами, полученными по модели PRIMELT3 MEGA (Herzberg, Asimow, 2015), которая позволяет их вычислять по содержаниям главных компонентов. Для процессов BM и AFM данная модель позволяет получить оценки степени плавления в 14.3 ± 5.6 и $13.2 \pm 5.1\%$ соответственно, что в пределах стандартных отклонений соответствует результатам нашего моделирования. В то же время оценки степени плавления, полученные двумя этими методами для индиви-

дуальных составов первичных расплавов, не коррелируют друг с другом, что может быть объяснено очень сильным влиянием параметра FeO_1 (см. выше) на результаты, полученные по модели PRIMELT3 MEGA. К примеру, отклонение FeO_1 на 1 мас. % в большую или меньшую сторону приведет к ошибке в ~45–60%. Предполагая, что оба использованных нами подхода к моделированию степени плавления корректны, можно сделать два основных вывода: (1) оцененное нами значение $FeO_1 = 7.93$ мас. % близко к истинному среднему начальному содержанию железа в родоначальных расплавах; (2) параллельное моделирование степени плавления по содержаниям рассеянных элементов и главных компонентов расплавов при изучении расплавных включений в оливине может быть использовано как независимая оценка параметра FeO_1 .

Установленные нами для расплавов оливин-порфиновых пород Камчатского Мыса средние значения степени плавления немного превышают оценки, полученные для примитивных стекол MORB (рис. 4), хотя и отличаются от них в пределах стандартных отклонений. Относительно высокие значения степени плавления оценивались ранее и для других пород офиолитовой ассоциации Камчатского Мыса (Батанова и др., 2014; Portnyagin et al., 2009). Изучая состав расплавных включений в Cr-шпинели базальтов юго-восточной части Камчатского Мыса, М.В. Портнягин с соавторами (Portnyagin et al., 2009) пришли к выводу, что родоначальные расплавы этих пород являются результатом до 20% близкого к фракционному плавлению мантии. Одной из главных особенностей изученных ими образцов было обилие ультра-деплементированных расплавных включений, которые интерпретировались как расплавы, близкие к модельным бесконечно малым порциям расплава, образующимся при фракционном плавлении мантии (Portnyagin et al., 2009). Составы этих расплавов не могут быть объяснены в рамках нашего моделирования, так как даже самые высокие оценки степени плавления наиболее обедненного источника из тех, которые мы рассматривали, не могут объяснить такого аномального обеднения некогерентными элементами. Однако их состав может быть объяснен 5–10% повторным плавлением мантийного источника (Duncan, Green, 1980; Sobolev, Shimizu, 1993). В данном случае эти расплавы можно рассматривать как частный случай продукта плавления более обедненного источника, чем был рассмотрен в нашем моделировании.

В.Г. Батанова с соавторами (Батанова и др., 2014) изучали геохимические особенности минералов перидотитов этой офиолитовой ассоциации и также пришли к выводу, что они отражают аномально высокие значения степени плавления (от 8 до более чем 22%).

Кроме того, и реконструированные расплавы других вулканических пород, и минералы перидотитов офиолитового комплекса Камчатского Мыса, так же как и составы рассматриваемых нами расплавов оливин-порфиновых пород, имеют характерные Sr-аномалии — положительные в реконструированных расплавах и отрицательные в случае минералов перидотитов (Батанова и др., 2014; Portnyagin et al., 2009). Все это позволяет сделать вывод о том, что рассмотренные породы данного комплекса имеют близкое генетическое родство.

М.В. Портнягин с соавторами (Portnyagin et al., 2009), так же как и В.Г. Батанова с соавторами (Батанова и др., 2014), интерпретировали полученные ими высокие оценки степени плавления как свидетельство высокой потенциальной температуры мантии ($T_p > 1400^\circ\text{C}$), которая могла быть связана с формированием рассматриваемых пород вблизи протогавайского плюма. Полученные нами данные не согласуются с этой интерпретацией, так как для рассчитанных первичных расплавов оливин-порфиновых пород Камчатского Мыса T_p оценивается в $\sim 1354 \pm 9.2^\circ\text{C}$ (по модели PRIMELT3 MEGA (Herzberg, Asimow, 2015)), что примерно соответствует средней T_p для мантии MORB (Herzberg et al., 2007). Немного более высокие средние значения степени плавления для Камчатского Мыса относительно MORB (рис. 4), в условиях стандартной для MORB потенциальной температуры мантии, могли быть обусловлены либо повышенным содержанием в источнике воды, либо пониженным давлением при плавлении. С одной стороны, на основе имеющихся у нас данных мы не можем доказать, что содержание воды в источнике не было аномально высоким по сравнению с типичным для MORB, но, с другой стороны, нами не было обнаружено никаких косвенных геохимических признаков ее повышенного содержания (Korneeva et al., 2020). Следовательно, наиболее правдоподобной интерпретацией нам представляется повышенная скорость декомпрессии мантийного блока, плавление которого привело к формированию офиолитового комплекса Камчатского Мыса. Этот процесс мог бы объяснить не только повышенные оценки степени плавления источника, но и аномальную концентрацию Sr в этих породах. Если плавление происходило при давлении фации плагиоклазовых перидотитов, то плагиоклаз должен был быть первой фазой, полностью переходящей в расплав (например, Jaques, Green, 1980) и обогащающей его стронцием.

Еще одной особенностью оливин-порфиновых базальтов Камчатского Мыса, которую могло бы объяснить плавление при низком давлении, является раннее сульфидное насыщение их родоначальных расплавов (Korneeva et al., 2020; Saveleyev et al., 2018). Согласно большинству современ-

ных моделей, концентрация серы при сульфидном насыщении базальтового расплава (SCSS) имеет обратную зависимость от давления (например, Ariskin et al., 2018; Smythe et al., 2017) и, если эта зависимость действительно существует, примитивный расплав MORB должен быть существенно недосыщен серой при достижении поверхности земли (например, Li, Ripley, 2005). Таким образом, расплав, образовавшийся при меньшем давлении, чем расплав среднего MORB, должен достигать сульфидного насыщения при меньшем проценте фракционирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное моделирование возможных вариаций химического состава и степени плавления источника расплавов оливин-порфировых пород Камчатского Мыса позволяет сделать следующие выводы:

Модели ВМ и АФМ в среднем с равной достоверностью описывают состав первичных расплавов оливин-порфировых пород Камчатского Мыса. Данный факт не позволяет заключить, к какому из этих механизмов был ближе реальный процесс плавления в данном случае.

Источник был существенно химически гетерогенным, вариации его состава в сравнении со стандартными составами источников могут быть описаны как от D-DMM до 0.5 E-DMM + 0.5 PM при использовании модели ВМ и от 0.5D-DMM + 0.5 A-DMM до PM при использовании модели АФМ. Диапазон среднего состава источника от 0.5A-DMM + 0.5 E-DMM до 0.9 E-DMM + 0.1 PM.

Средняя степень плавления источника — $9.1 \pm 3.8\%$ по модели ВМ, а согласно модели АФМ — $15.4 \pm 5.2\%$, что немного превышает значения для примитивных стекол MORB (7.4 ± 2.2 и $12.5 \pm 3.8\%$ соответственно). В то же время повышенные значения степени плавления источника расплавов изучаемых оливин-порфировых базальтов хорошо согласуются с таковыми, оцененными для других пород офиолитового комплекса Камчатского Мыса.

Низкое давление при плавлении мантии, вызванное повышенной скоростью декомпрессии, может объяснить повышенные оценки степени плавления, полученные для пород Камчатского Мыса, Sr-аномалии и раннее сульфидное насыщение.

Благодарности. Авторы благодарны М.В. Портнягину (ГЕОХИ РАН) за ценные замечания на самых ранних этапах подготовки статьи и В.С. Каменецкому (UTAS) за содержательную рецензию, позволившую существенно улучшить представление материала.

Финансовые источники. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 16-17-10145.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Батанова В.Г., Лясковская З.Е., Савельева Г.Н., Соболев А.В.* Перидотиты п-ова Камчатский Мыс: свидетельство плавления океанической мантии вблизи горячей точки // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 12. С. 1748–1758.
- Краснова Е.А., Портнягин М.В., Силантьев С.А. и др.* Двухстадийная эволюция мантийных перидотитов разломной зоны Стелмейт (СЗ Пацифика) // Геохимия. 2013. Т. 51. № 9. С. 759–772.
- Миронов Н.Л., Портнягин М.В.* Связь окислительно-восстановительных условий плавления мантии и содержания меди и серы в первичных магмах на примере Толбачинского Дола (Камчатка) и хребта Хуан-де-Фука (Тихий океан) // Петрология. 2018. Т. 26. № 2. С. 140–162.
- Попов Д.В., Некрылов Н., Плечов П.Ю. и др.* Состав и условия образования исходных расплавов юрских долеритов Юго-Западного Крыма по данным изучения расплавных включений во вкрапленниках оливина // Петрология. 2017. Т. 25. № 3. С. 265–298.
- Портнягин М.В., Савельев Д.П., Хёрнле К.* Плюмовая ассоциация меловых океанических базальтов Восточной Камчатки: особенности состава шпинели и родоначальных магм // Петрология. 2005. Т. 13. № 6. С. 626–645.
- Савельев Д.П.* Плагиоклазовые пикриты п-ова Камчатский Мыс (Восточная Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2014. № 4. С. 43–53.
- Соболев А.В.* Включения расплавов в минералах как источник принципиальной петрологической информации // Петрология. 1996. Т. 4. № 3. С. 228–239.
- Тобелко Д.П., Портнягин М.В., Крашенинников С.П. и др.* Состав и условия образования примитивных магм Карымского вулканического центра (Камчатка) по данным изучения расплавных включений и микроэлементной термобарометрии // Петрология. 2019. Т. 27. № 3. С. 258–281.
- Хотин М.Ю., Шапиро М.Н.* Офиолиты Камчатского Мыса (Восточная Камчатка): строение, состав, геодинамические условия формирования // Геотектоника. 2006. № 4. С. 61–89.
- Ariskin A.A., Bychkov K.A., Nikolaev G.S., Barmina G.S.* The COMAGMAT-5: Modeling the effect of Fe–Ni sulfide immiscibility in crystallizing magmas and cumulates // J. Petrol. 2018. V. 59. Iss. 2. P. 283–298.
- Avdeiko G.P., Savelyev D.P., Palueva A.A., Popruzhenko S.V.* Evolution of the Kurile–Kamchatkan volcanic arcs and dynamics of the Kamchatka–Aleutian junction // Eds. J. Eichelberger, E. Gordeev, P. Izbekov, M. Kasahara and J. Lees. Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region. American Geophysical Union. 2007. P. 37–55.
- Danyushevsky L.V., Della-Pasqua F.N., Sokolov S.* Re-equilibration of melt inclusions trapped by magnesian olivine phenocrysts from subduction-related magmas: petrological implications // Contrib. Mineral. Petrol. 2000. V. 138. Iss. 1. P. 68–83.

- Danyushevsky L.V., Plechov P.* Petrolog3: Integrated software for modeling crystallization processes // *Geochem. Geophys. Geosys.* 2011. V. 12. P. 1–32.
- Dick H.J.B.* Abyssal peridotites, very slow spreading ridges and ocean ridge magmatism // Eds. A.D. Saunders and M.J. Norry. *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society Special Publication, London. 1989. P. 71–105.
- Duncan R., Green D.H.* Role of multistage melting in the formation of oceanic crust // *Geology*. 1980. V. 8. Iss. 1. P. 22–26.
- Gast P.W.* Trace element fractionation and the origin of tholeiitic and alkaline magma types // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1968. V. 32. Iss. 10. P. 1057–1086.
- Herzberg C., Asimow P.D.* PRIMELT3 MEGA.XLSM software for primary magma calculation: Peridotite primary magma MgO contents from the liquidus to the solidus // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2015. V. 16. Iss. 2. P. 563–578.
- Herzberg C., Asimow P.D., Arndt N. et al.* Temperatures in ambient mantle and plumes: Constraints from basalts, picrites, and komatiites // *Geochem. Geophys. Geosys.* 2007. V. 8. P. 1–34.
- Jaques A.L., Green D.H.* Anhydrous melting of peridotite at 0–15 kbar pressure and the genesis of tholeiitic basalts // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1980. V. 73. P. 287–310.
- Jenner F.E., O'Neill H.S.C.* Analysis of 60 elements in 616 ocean floor basaltic glasses // *Geochem. Geophys. Geosys.* 2012. V. 13. Iss. 2. P. 1–11.
- Konstantinovskaia E.A.* Arc–continent collision and subduction reversal in the Cenozoic evolution of the Northwest Pacific: an example from Kamchatka (NE Russia) // *Tectonophysics*, 2001. V. 333. Iss. 1. P. 75–94.
- Korneeva A.A., Nekrylov N., Kamenetsky V. et al.* Composition, crystallization conditions and genesis of sulfide-saturated parental melts of olivine-phyric rocks from Kamchatsky Mys (Kamchatka, Russia) // *Lithos*. 2020. V. 370–371. P. 105657.
- Li C.S., Ripley E.M.* Empirical equations to predict the sulfur content of mafic magmas at sulfide saturation and applications to magmatic sulfide deposits // *Mineral. Deposita*. 2005. V. 40. Iss. 2. P. 218–230.
- Liang Y., Liu B.* Simple models for disequilibrium fractional melting and batch melting with application to REE fractionation in abyssal peridotites // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2016. V. 173. P. 181–197.
- McDonough W.F., Sun S.S.* The composition of the Earth // *Chem. Geol.* 1995. V. 120. Iss. 3–4. P. 223–253.
- Nekrylov N., Portnyagin M.V., Kamenetsky V.S. et al.* Chromium spinel in Late Quaternary volcanic rocks from Kamchatka: Implications for spatial compositional variability of subarc mantle and its oxidation state // *Lithos*. 2018. V. 322. P. 212–224.
- Portnyagin M., Hoernle K., Plechov P. et al.* Constraints on mantle melting and composition and nature of slab components in volcanic arcs from volatiles (H₂O, S, Cl, F) and trace elements in melt inclusions from the Kamchatka Arc // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2007a. V. 255. Iss. 1–2. P. 53–69.
- Portnyagin M., Bindeman I., Hoernle K., Hauff F.* Geochemistry of primitive lavas of the Central Kamchatka Depression: magma generation at the edge of the Pacific Plate // *Geophysical Monograph – American Geophysical Union*. 2007b. V. 172. P. 1–41.
- Portnyagin M., Savelyev D., Hoernle K. et al.* Mid-Cretaceous Hawaiian tholeiites preserved in Kamchatka // *Geology*. 2008. V. 36. Iss. 11. P. 903–906.
- Portnyagin M., Hoernle K., Savelyev D.* Ultra-depleted melts from Kamchatkan ophiolites: Evidence for the interaction of the Hawaiian plume with an oceanic spreading center in the Cretaceous? // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2009. V. 287. Iss. 1–2. P. 194–204.
- Savelyev D.P., Kamenetsky V.S., Danyushevsky L.V. et al.* Immiscible sulfide melts in primitive oceanic magmas: Evidence and implications from picrite lavas (Eastern Kamchatka, Russia) // *Amer. Mineral.* 2018. V. 103. Iss. 6. P. 886–898.
- Shaw D.M.* Trace element fractionation during anatexis // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1970. V. 34. P. 237–243.
- Sides I.R., Edmonds M., Maclennan J. et al.* Eruption style at Kilauea Volcano in Hawai'i linked to primary melt composition // *Nat. Geosci.* 2014. V. 7. Iss. 6. P. 464–469.
- Smythe D.J., Wood B.J., Kiseeva E.S.* The S content of silicate melts at sulfide saturation: New experiments and a model incorporating the effects of sulfide composition // *Amer. Mineral.* 2017. V. 102. Iss. 4. P. 795–803.
- Sobolev A.V., Shimizu N.* Ultra-depleted primary melt included in an olivine from the Mid-Atlantic Ridge // *Nature*. 1993. V. 363. Iss. 6425. P. 151–154.
- Stolper E., Newman S.* The role of water in the petrogenesis of Mariana trough magmas // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1994. V. 121. Iss. 3–4. P. 293–325.
- Volynets A.O., Churikova T.G., Wörner G. et al.* Mafic Late Miocene–Quaternary volcanic rocks in the Kamchatka back arc region: implications for subduction geometry and slab history at the Pacific–Aleutian junction // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2010. V. 159. Iss. 5. P. 659–687.
- Workman R.K., Hart S.R.* Major and trace element composition of the depleted MORB mantle (DMM) // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2005. V. 231. Iss. 1–2. P. 53–72.
- Yaxley G.M., Kamenetsky V.S., Kamenetsky M. et al.* Origins of compositional heterogeneity in olivine-hosted melt inclusions from the Baffin Island picrites // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2004. V. 148. Iss. 4. P. 426–442.
- Zou H.* Trace element fractionation during modal and non-modal dynamic melting and open-system melting: a mathematical treatment // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1998. V. 62. Iss. 11. P. 1937–1945.

Variations of Source Composition and Melting Degrees of Olivine-Phyric Rocks from Kamchatsky Mys: Results of the Geochemical Modeling of Trace Elements Contents in Melts

N. Nekrylov^{1,2}, A. A. Korneeva^{2,3}, D. P. Savelyev⁴, and T. N. Antsiferova^{1,5}

¹*Fersman Mineralogical Museum, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Institute of Experimental Mineralogy, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia*

³*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

⁴*Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

⁵*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

We conducted the geochemical modeling of trace elements contents for primary melts of olivine-phyric rocks from Kamchatsky Mys. This modeling reveals substantial chemical heterogeneity of their source while the average source composition is close to the E-DMM. The average estimation of the melting degree is in the range from $9.1 \pm 3.8\%$ for the model of modal batch melting to $15.4 \pm 5.2\%$ for the model of accumulated fractional melting, which is slightly higher than the estimation for primitive MORB glasses (7.4 ± 2.2 and $12.5 \pm 3.8\%$ respectively). It is in a good agreement with high melting degrees estimated earlier for other rocks of the Kamchatsky Mys ophiolites. Low pressure of mantle melting caused by the elevated speed of decompression relatively to the average MORB could explain elevated melting degrees estimated for Kamchatsky Mys ophiolites as well as their characteristic Sr-anomalies and sulfide saturation on the earliest stages of magmatic evolution.

Keywords: Kamchatsky Mys, mantle melting, olivine, melt inclusions