

УДК 548.4

ПЕТРОГЕННЫЕ, ЛЕТУЧИЕ, РУДНЫЕ И РЕДКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ В МАГМАТИЧЕСКИХ РАСПЛАВАХ ГЛАВНЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ОБСТАНОВОК ЗЕМЛИ. II. СХОДСТВА И РАЗЛИЧИЯ

© 2024 г. В. Б. Наумов^{a, *}, А. В. Гирнис^{b, **}, В. А. Дорофеева^a

^aИнститут геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН,
ул. Косыгина, 19, Москва, 119991 Россия

^bИнститут геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия

*e-mail: naumov@geokhi.ru

**e-mail: girnis@igem.ru

Поступила в редакцию 06.02.2023 г.

После доработки 18.05.2023 г.

Принята к публикации 26.06.2023 г.

На основании средних и стандартных отклонений содержаний элементов, оцененных в первой части (Наумов и др., 2023), проводится детальное сопоставление выделенных геохимических обстановок. Для сравнения основных расплавов введена поправка на изменение составов при фракционировании основных минералов. Используя численные критерии, определена последовательность элементов по степени когерентности при выплавлении и кристаллизации основных магматических расплавов. В рамках этой последовательности установлено закономерное изменение содержаний элементов, нормированных на средний состав расплавов океанических островов. Расплавы срединно-океанических хребтов демонстрируют монотонное увеличение нормативных содержаний от наиболее некогерентных (Cs, Ba, U, La и др.) к когерентным элементам (Sc, Ni, Cr). Обстановки конвергентных границ плит характеризуются относительным обогащением наиболее некогерентными элементами и заметной отрицательной Ta-Nb аномалией относительно элементов с близкой степенью когерентности. Магмы континентальных рифтов в наибольшей степени обогащены наиболее некогерентными элементами, а также Pb, Li и некоторыми другими элементами. Выделены индикаторные отношения элементов в основных расплавах, характеризующиеся значительными различиями между обстановками. Ряд отношений в основных расплавах идентичны (с учетом разброса значений) в разных обстановках. Сравнение средних отношений элементов в основных, средних и кислых магмах выявило три типа их поведения. Ряд отношений в средних и кислых магмах наследуется от составов основных расплавов. В эту группу попадают, в частности, «канонические» отношения, например, Nb/Ta и Zr/Hf. Некоторые отношения испытывают незакономерные вариации при переходе от основных к кислым расплавам (Sr/Cr, F/Th и др.). Кроме того, есть отношения, монотонно и существенно меняющиеся в ряду основные–кислые расплавы (Ni/Yb, Lu/P и др.). Вариации отношений связаны с кристаллизационной дифференциацией расплавов и образованием первичных магм за счет смешения расплавов, полученных при плавлении контрастных геохимических резервуаров.

Ключевые слова: редкие элементы, кристаллизационная дифференциация, степень когерентности, индикаторное отношение, источник магм

DOI: 10.31857/S0016752524010026, EDN: MVSCRI

В первой части (Наумов и др., далее Часть 1) мы оценили средние составы магматических расплавов на основании наиболее полной базы данных, включающей анализы расплавных включений в минералах и стеклах магматических пород. Все анализы разделены на 6 геохимических обстановок. Для каждой из обстановок определены средние содержания главных, редких и летучих элементов и по-

казано, что между составами расплавов существуют значимые различия. Во второй части мы более детально рассмотрим средние составы и попытаемся определить главные причины сходств и различий расплавов близкого состава из разных геохимических обстановок и расплавов разного состава из одной геохимической обстановки. Поскольку мы рассматриваем только средние значения большо-

го количества анализов, многие процессы, а также вещество, участвующее в образовании и эволюции магматических комплексов, останутся за рамками данной статьи. Мы рассмотрим только наиболее общие особенности составов расплавов, влияющие на глобальные средние значения. Многочисленные примеры детального анализа конкретных магматических комплексов с определением роли различных процессов и источников вещества можно найти в использованных источниках (Часть 1).

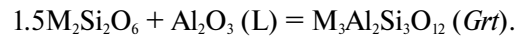
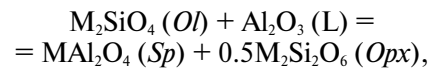
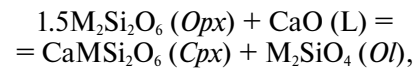
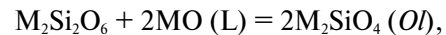
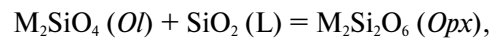
СОСТАВЫ ОСНОВНЫХ МАГМ

Влияние кристаллизационной дифференциации – одна из очевидных проблем, возникающих при сравнении средних составов расплавов из разных геодинамических обстановок. Атомное отношение $Mg\# = Mg/(Mg+Fe)$ в средних мафических составах варьирует от ~ 0.6 в обстановках I и VI (Часть 1) до ~ 0.53 в остальных обстановках. Первичные расплавы в равновесии с остаточной мантийной ассоциацией должны иметь более высокие значения $Mg\# \sim 0.7$ (Frey et al., 1978). При этом высокомагнезиальные составы характеризуются относительно низкими содержаниями наиболее некогерентных элементов. До какой степени такое относительное обеднение могло быть связано с меньшей степенью дифференциации магм срединно-океанических хребтов? В предыдущих работах мы не рассматривали этот вопрос, полагая, что это влияние значительно меньше, чем различие между составами расплава, обусловленное разнообразием мантийных источников (Niu et al., 1996; Hofmann, 1997; Storch et al., 2022; Tilhac et al., 2022; и др.). Кроме того, кристаллизация небольшого количества главных минералов (оливина, плагиоклаза, пироксена) слабо влияет на отношения концентраций большинства некогерентных элементов. Тем не менее оценка этого эффекта является, безусловно, интересной и важной.

С этой целью мы рассчитали составы «псевдопервичных» расплавов, используя средние составы стекол из Части I и данные экспериментальных исследований. Поскольку мы оперируем средними составами большого количества расплавов, которые могли образоваться из разных источников при разных температурах и давлениях, мы можем провести только самые приблизительные оценки. Поэтому полученные составы мы называем псевдопервичными, и целью данных расчетов является приведение средних составов к некоторому единому уровню. Предполагается, что в первом приближении можно считать, что первичные магмы образуются путем плавления лерцолитовой мантии, а при эволюции первичных расплавов возможно удаление оливина, плагиоклаза и клинопироксена

как наиболее распространенных минералов-вкрапленников в основных магматических породах.

Составы мантийных источников могут различаться, особенно в отношении второстепенных элементов (Ti, щелочи и др.). Но присутствие в респите оливина, пироксенов и глиноземистой фазы (шпинели или граната) накладывает ограничения на активности ряда главных элементов, вследствие буферирующего влияния следующих реакций ($M = Mg+Fe$; *Ol* – оливин, *Opx* – ромбический пироксен, *Cpx* – моноклинный пироксен, *Sp* – шпинель, *Grt* – гранат, *L* – расплав):



Принимая во внимание эти реакции, мы рассматриваем плавление мантийного перидотита в упрощенной системе $SiO_2-Al_2O_3-MgO-FeO-CaO$. В этой проекции определялись приблизительные составы частичных расплавов вблизи солидуса мантийного перидотита в поле гранатового и шпинелевого перидотита. Для этого были выбраны экспериментальные данные по составу расплавов в равновесии с ассоциацией оливин-ортопироксен-клинопироксен-гранат при 2.5–3.5 ГПа и $T < 1450^\circ C$ (Elthon, Scarfe, 1984; Yaxley, Green, 1998; Mallmann, O'Neill, 2007; Davis et al., 2011, 2013; Mallik, Dasgupta, 2012; Barr, Grove, 2013; Davis, Hirschmann, 2013) и оливин-ортопироксен-клинопироксен-шпинель при 0.5–1.5 ГПа и $T < 1280^\circ C$ (Meen, 1990; Takahashi, Kushiro, 1983; Draper, Johnston, 1992; Baker et al., 1995; Sen, 1982; Schwab, Johnston, 2001; Pickering-Witter, Johnston, 2000; Bulatov et al., 2000, 2002; Laporte et al., 2004, 2014; Lambart et al., 2009; Chalot-Prat et al., 2010, 2013; Collinet et al., 2015). Предполагалось, что родоначальные мантийные выплавки базальтовых расплавов могут быть аппроксимированы линейной комбинацией расплавов из источников, содержащих гранат и шпинель. Очевидно, составы первичных расплавов могли быть модифицированы за счет кристаллизации минералов-вкрапленников. Таким образом, средний состав расплавов может быть аппроксимирован следующей линейной комбинацией:

$$C_i^L = a_1 C_i^{GM} + a_2 C_i^{SM} - a_3 C_i^{Ol} - a_4 C_i^{Pl} - a_5 C_i^{Cpx},$$

где C_i^j – содержание элемента i в фазе j (GM – выплавка из гранатового лерцолита, SM – выплавка из шпинелевого лерцолита), а коэффициенты $a_1 \dots a_5$ – массовые доли фаз. Состав первичного расплава определяется как сумма мантийных выпла-

вок, $a_1C_1^{GM} + a_2C_1^{SM}$, нормализованная к общей массовой доле расплава:

$$C_i^{PM} = (C_i^L + a_3C_i^{OI} + a_4C_i^{PI} + a_5C_i^{CPX}) / (a_1 + a_2).$$

Количество кристаллизующегося клинопироксена всегда оказывалось небольшим и сильно менялось при небольших изменениях составов минералов. Поэтому было принято $a_5 = 0$ и учитывалась только кристаллизация оливина и плагиоклаза. Такое упрощение связано с тем, что в данной работе мы рассматриваем только средние величины концентраций, полученные на основании обобщения данных для множества комплексов, характеризующихся уникальными составами своих первичных расплавов. При рассмотрении конкретных комплексов, для которых возможно определение состава единой первичной магмы, необходим учет влияния не только пироксенов, но и других возможных фаз, например, шпинелей и сульфидов, но в данной статье мы такую задачу не ставили. Коэффициенты a_1 - a_4 определялись методом наименьших квадратов. В результате оказывается, что для перехода к псевдопервичным расплавам необходимо добавить к средним составам 15–27% оливина и 4–14% плагиоклаза. С учетом этих оценок корректировались также содержания редких элементов, используя экспериментально определенные коэффициенты распределения элементов между минералами и расплавом (Наумов и др., 2022). Надо сказать, что, учитывая большую неопределенность в средних составах расплавов, основной эффект для редких элементов был связан с «разбавлением» рассчитанного состава оливином и плагиоклазом, поскольку

содержания большей части редких элементов в оливине и плагиоклазе очень низкие. Исключение составляет Ni и Co в оливине и Sr в плагиоклазе. Полученные оценки составов псевдопервичных расплавов приведены в табл. 1.

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕМЕНТОВ

На рис. 1 представлены отношения концентраций элементов к показателям примитивной мантии (Palme, O'Neill, 2014). На этом рисунке элементы расположены приблизительно в порядке увеличения степени когерентности с мантийными минералами. Отдельно выделены летучие компоненты и редкие металлы. В целом концентрации падают с увеличением степени когерентности. Достаточно четко выделяется группа элементов с большими различиями между геодинамическими обстановками (от Cs до Pb), умеренными различиями (от P до Sn) и элементы, концентрации которых в средних составах расплавов практически идентичны для всех обстановок (от Na до Co). Летучие компоненты существенно варьируют в зависимости от геодинамической обстановки, а редкие металлы (кроме Au и Ag) характеризуются очень низкими нормированными концентрациями.

На рис. 1 хорошо видно, что отношения многих элементов также сильно варьируют в зависимости от обстановки. Анализ этих вариаций представляет большой интерес, поскольку отношения элементов значительно меньше меняются при изменении

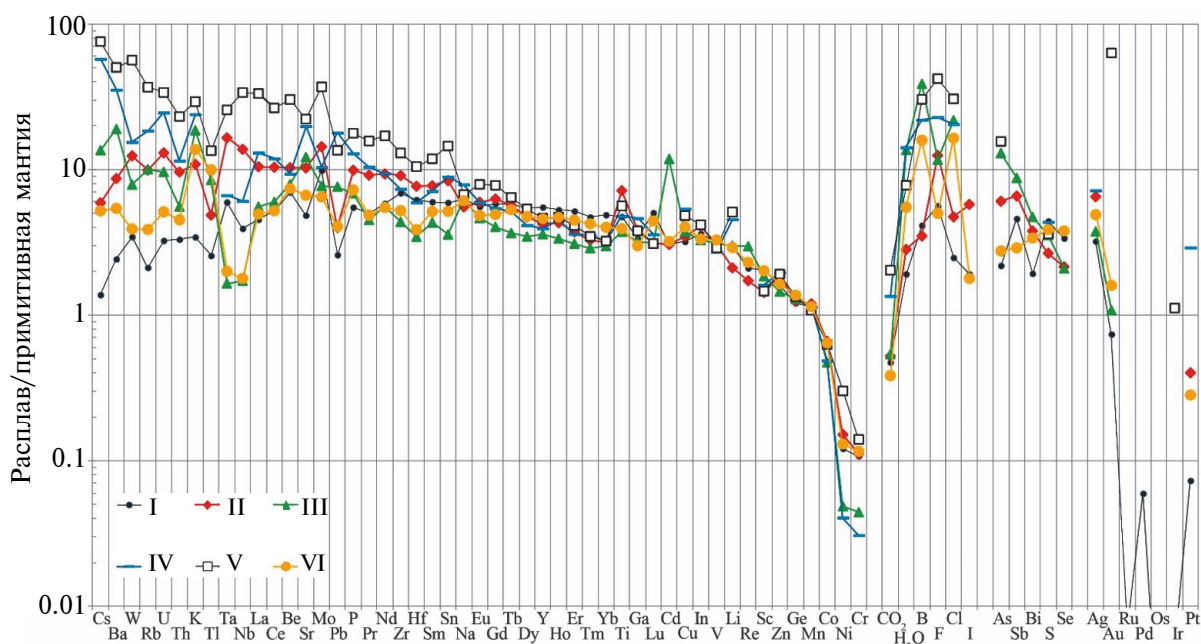


Рис. 1. Средние содержания редких компонентов в псевдопервичных мафических расплавах различных геодинамических обстановок (I–VI), нормализованные к составу примитивной мантии (Palme, O'Neill, 2014).

Таблица 1. Средние содержания элементов в псевдопервичных основных расплавах разных геодинамических обстановок, рассчитанные с учетом удаления оливина и плагиоклаза при кристаллизации первичных магм – I II III IV V VI

Компонент	I	II	III	IV	V	VI
SiO ₂ , wt %	48.8	47.4	48.8	48.7	46.9	48.3
TiO ₂	1.0	1.51	0.79	1.01	1.19	0.83
Al ₂ O ₃	13.8	13.5	14.8	15.3	13.9	13.4
FeO	9.07	9.83	8.84	9.0	9.06	8.57
MnO	0.16	0.16	0.16	0.15	0.15	0.16
MgO	14.0	14.5	11.8	11.2	12.8	14.8
CaO	10.25	9.91	9.57	8.90	9.26	9.66
Na ₂ O	2.19	1.93	2.17	2.75	2.35	2.13
K ₂ O	0.11	0.34	0.58	0.75	0.92	0.43
P ₂ O ₅	0.11	0.20	0.14	0.26	0.35	0.14
H ₂ O	0.21	0.30	1.47	1.53	0.84	0.59
Cl, ppm	74.4	142	654	613	917	492
F	140	312	291	571	1053	125
S	884	532	709	874	722	773
CO ₂	174	191	197	496	744	141
Li	4.7	3.4	4.8	7.3	8.2	4.7
Be	0.43	0.64	0.49	0.58	1.88	0.46
B	1.07	0.91	10.1	5.7	7.9	4.13
Sc	33.3	23.5	30.3	26.4	24.0	33.0
V	274	266	269	234	249	282
Cr	271	280	111	77.3	352	292
Co	64.9	67.4	48.2	49.5	64.0	65.7
Ni	225	281	90.4	75.4	561	241
Cu	63.9	69.2	74.6	107	96.5	80.7
Zn	86.2	101	77.5	105	102	87.7
Ga	14.8	16.8	14.0	20.4	16.7	13.2
Ge	1.45	1.49	1.55	–	1.60	1.64
As	0.15	0.41	0.89	–	1.06	0.19
Se	256	163	159	–	–	288
Br	0.35	–	–	–	4.9	0.81
Rb	1.28	5.99	6.07	11.2	22.2	2.35
Sr	107	226	268	436	488	146
Y	22.7	17.5	14.8	16.2	19.1	18.9
Zr	71.0	93.6	45.0	75.7	134	53.8
Nb	2.34	8.18	1.02	3.61	20.1	1.06
Mo	0.46	0.67	0.36	0.49	1.74	0.30
Ru	0.053	–	–	–	–	–
Pd	0.42	–	–	–	–	–
Ag	19.3	39.0	22.5	43.0	–	29.4
Cd	107	107	414	–	–	112
In	65.3	73.2	58.9	–	75.1	60.1
Sn	0.83	1.17	0.50	1.25	2.03	0.72
Sb	0.025	0.035	0.047	–	–	0.016

Компонент	I	II	III	IV	V	VI
Te	0.0025	—	—	—	—	—
I	13.4	40.3	—	—	—	12.5
Cs	0.025	0.11	0.24	1.03	1.36	0.09
Ba	16.6	59.4	130	242	344	37.0
La	3.10	7.13	3.80	8.89	22.7	3.38
Ce	9.1	18.2	10.5	20.8	46.4	9.13
Pr	1.32	2.43	1.20	2.77	4.17	1.29
Nd	7.83	12.5	7.52	12.6	22.9	7.35
Sm	2.60	3.36	1.88	3.09	5.15	2.23
Eu	0.93	0.99	0.77	0.99	1.32	0.80
Gd	3.41	3.67	2.36	3.17	4.56	2.88
Tb	0.62	0.61	0.39	0.55	0.69	0.57
Dy	3.92	3.42	2.50	3.00	3.87	3.45
Ho	0.84	0.69	0.54	0.71	0.75	0.75
Er	2.42	1.74	1.45	1.69	1.93	2.10
Tm	0.35	0.24	0.21	0.26	0.26	0.31
Yb	2.33	1.50	1.42	1.53	1.54	1.91
Lu	0.36	0.22	0.22	0.25	0.22	0.31
Hf	1.87	2.31	1.04	1.79	3.16	1.16
Ta	0.26	0.71	0.071	0.29	1.11	0.086
W	0.041	0.15	0.094	0.18	0.68	0.047
Re	0.74	0.60	1.04	—	—	0.80
Os	0.0041	—	—	—	—	—
Ir	0.018	—	—	—	3.91	—
Pt	0.55	3.05	—	22.1	—	2.15
Au	1.26	—	1.83	—	108	2.72
Tl	10.5	19.9	34.7	—	55.3	40.8
Pb	0.48	0.74	1.41	3.31	2.50	0.75
Bi	0.0058	0.011	0.014	—	—	0.010
Th	0.28	0.82	0.47	0.97	1.96	0.38
U	0.074	0.30	0.22	0.56	0.77	0.12

степени плавления источника и дифференциации магм по сравнению с содержаниями отдельных элементов. В качестве количественной характеристики степени вариативности отношений двух элементов (E_1 и E_2) будем использовать следующий параметр:

$$Q(E_1/E_2) = (\max(E_1/E_2) - \min(E_1/E_2)) / (\bar{E}_1/\bar{E}_2),$$

где \bar{E}_1 и \bar{E}_2 – средние значения концентраций элементов в мафических расплавах всех геодинамических обстановок.

Значения Q обнаруживают любопытные закономерные вариации. Рассмотрим диаграмму для редкоземельных элементов (РЗЭ), к которой добавим Cs, как один из самых некогерентных эле-

ментов при плавлении мантии и кристаллизации ультраосновных и основных расплавов. Диаграммы значений Q , построенные для отношений РЗЭ к разным элементам, показаны на рис. 2 (в качестве примера приведены компоненты с сильно различающейся степенью некогерентности – Rb, H_2O , Hf и Y). Для $Q(REE/Hf)$ наблюдается отчетливый минимум между Nd и Sm. Это означает, что отношение Nd/Hf и Sm/Hf варьирует незначительно при переходе от одной геодинамической обстановки к другой, и Hf можно считать геохимическим «родственником» Nd и Sm. Сходные минимумы наблюдаются и для отношений REE к другим элементам, но положение минимума сдвигается вправо для более когерентных элементов (Y) и влево для

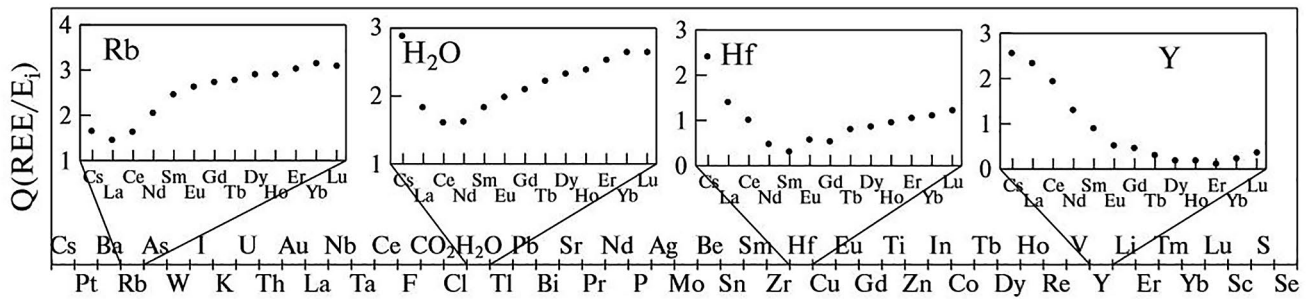


Рис. 2. Оценка геохимического сходства элементов в процессах образования и эволюции основных магм различных геохимических обстановок на основании отношения $Q(PЗЭ/E_i) = \frac{\max(PЗЭ/E_i) - \min(PЗЭ/E_i)}{(PЗЭ/E_i)}$, где $PЗЭ/E_i$ – отношение содержаний РЗЭ к рассматриваемому элементу в каждой обстановке, $PЗЭ/E_i$ – отношение средних значений во всех обстановках. Положение элемента в ряду определяется минимумом функции Q .

менее когерентных (H_2O , Rb) вплоть до выхода за пределы интервала РЗЭ (рис. 2). Рассматривая последовательно все элементы, можно расположить их в порядке геохимического сходства от наиболее некогерентных в левой части диаграммы к наиболее когерентным – в правой части (рис. 3). В этой последовательности находят свое место и летучие компоненты. Парадоксально, S и Se оказываются наиболее близкими к максимально когерентным элементам, т.е. отношения Sc/S и Sc/Se оказываются наиболее постоянными среди отношений элементов к S и Se в рассмотренных геодинамических обстановках. В некоторых случаях не наблюдаются выраженные минимумы Q , но таких элементов очень немного – В, Cr, Ni, Ga, Ge, Cd, Sb и Na. В общих чертах установленная последовательность элементов оказывается сходной с теми последовательностями, которые обычно принимаются при построении многоэлементных спайдер-диаграмм (Hofmann, 1988; Sun, McDonough, 1989), но в нашем случае порядок элементов определяется на количественной основе. Интересно, что сидерофильные и халькофильные элементы (Pt, Au, Bi, Ag, Cu, Zn, Se) оказались разбросанными по всей шкале. Это свидетельствует о том, что сульфидный контроль не является основным в формировании средних содержаний этих элементов и главную роль, вероятно, играла степень некогерентности в силикатных фазах. С другой стороны, для многих из этих элементов данных пока немного, и содержания их часто очень низкие, что предполагает невысокую точность анализов. Вполне вероятно, что порядок элементов в дальнейшем может измениться.

СРАВНЕНИЕ СРЕДНИХ СОСТАВОВ ОСНОВНЫХ МАГМ

Перейдем теперь к сравнению средних составов псевдопервичных расплавов из разных геодинамических обстановок. Используем для этого полученную последовательность элементов и составы расплавов разных обстановок нормализуем к среднему

составу расплавов океанических островов (OIB, обстановка II). Нормализация к этому составу удобна, поскольку отношения элементов в нем наиболее близки к значениям в примитивной мантии, что позволяет наглядно выделять обедненные и обогащенные расплавы. Рассмотрим вначале составы геохимических резервуаров и сред, которые могут оказать влияние на составы магм.

На рис. 3 приведены нормализованные средние составы континентальной коры (Rudnick, Gao, 2014), осадков в зонах субдукции (GLOSS II по Plank, 2014), водного флюида в равновесии с эклогитом при 4 ГПа (Kessel et al., 2005) и океанических карбонатитов (Hoernle et al., 2002). Континентальная кора характеризуется почти недифференцированными спектрами умеренно-некогерентных элементов (от Sr до Se) и быстрым нарастанием концентраций наиболее некогерентных элементов (возрастание от Ce до Cs почти на порядок). Характерными метками континентальной коры являются высокие концентрации Tl, Pb и Bi, в меньшей степени – Li и Be и низкие – Nb и Ta. Почти такими же характеристиками обладает состав GLOSS II (Plank, 2014) при немного более высоких содержаниях редких элементов. Карбонатитовые расплавы очень сильно обогащены всеми REE, но относительно обеднены Ti, Zr, Hf, K и Rb. Таким образом, участие карбонатного метасоматоза в образовании первичных магм должно отражаться в повышенных отношениях REE к высокозарядным элементам. Водные флюиды способны транспортировать наиболее некогерентные элементы (Cs, Ba, U, La), но стерильны в отношении более когерентных элементов (начиная с Sm, Zr и Hf).

Рассмотрим теперь средние составы псевдопервичных расплавов разных геохимических обстановок. На рис. 3 состав обстановки II совпадает с линией $y = 1$. Состав магмы срединно-океанических хребтов образует почти монотонно убывающую последовательность от значений ~ 1.5 для наиболее когерентных элементов (Lu, Sc, S, Se) до ~ 0.2

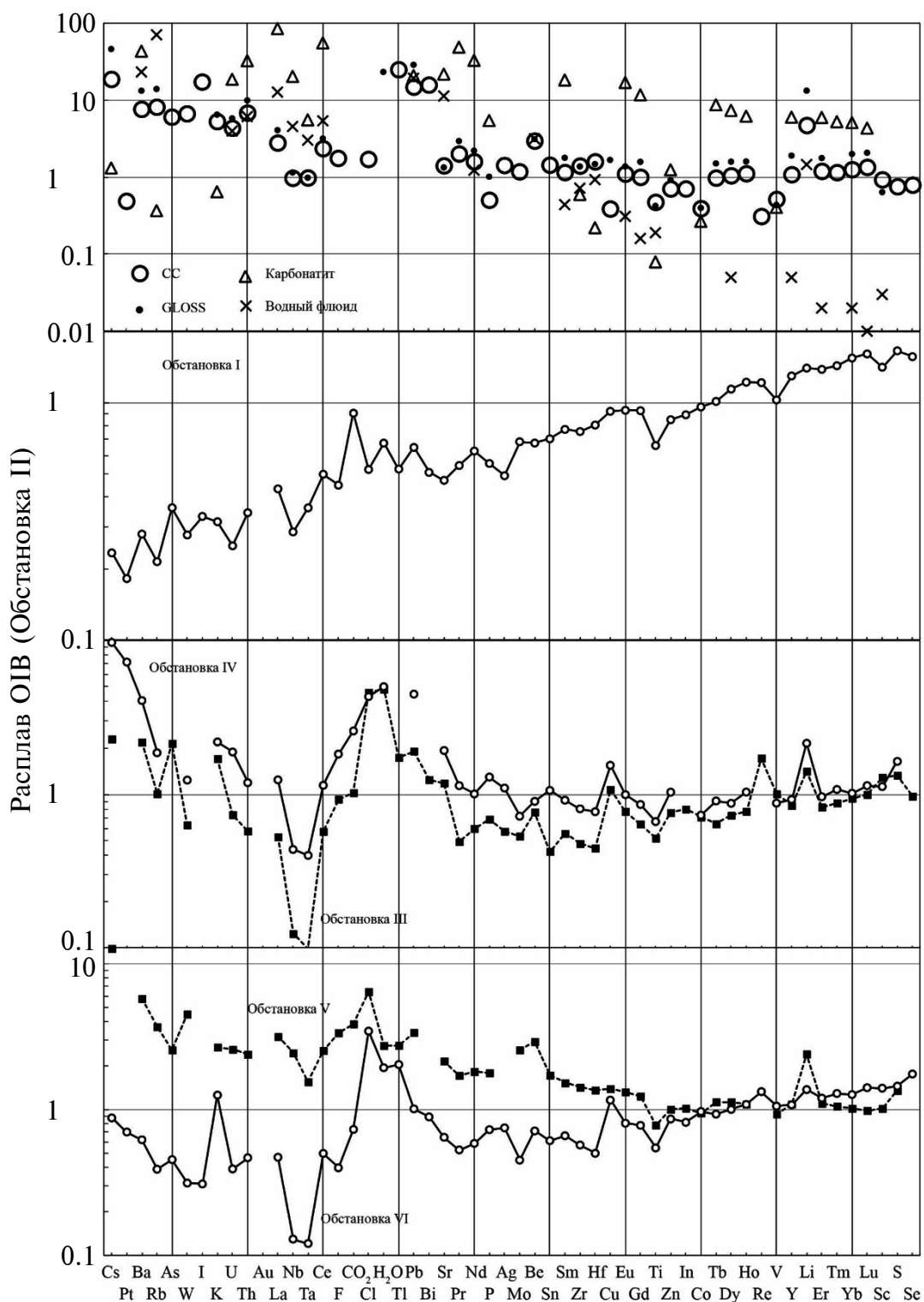


Рис. 3. Содержания элементов в различных геохимических резервуарах и средах и средних составах псевдопервичных мафических расплавов из разных геодинамических обстановок, нормализованные к среднему составу расплавов океанических островов (обстановка II). CC – средний состав континентальной коры (Rudnick, Gao, 2014), GLOSS – состав субдукционных осадков (Plank, 2014), карбонатит – средний состав океанических карбонатитов (Hoernle et al., 2002), как оценка состава карбонатитового расплава – агента мантийного метасоматоза, водный флюид – состав водного флюида в равновесии с эклогитом при 4 ГПа (Kessel et al., 2005), как оценка состава флюида, отделяющегося от океанической коры в зонах субдукции и модифицирующего породы мантийного клина.

для Cs, Ba, Rb. Никаких существенных аномалий на этом графике не наблюдается, что предполагает отсутствие заметного вклада обогащенных резервуаров и метасоматических процессов в формирование средних составов псевдопервичных магм обстановок I и II. Кроме того, очевидно, что процессы частичного плавления и кристаллизации не могут обеспечить закономерного увеличения степени обеднения расплавов срединно-океанических хребтов. Ни один из этих процессов не может привести к увеличению таких отношений, как La/Cs, в два раза. Таким образом, мы приходим к предположению о существовании не менее двух геохимически различных мантийных резервуаров. Один из резервуаров характеризуется отношениями наиболее некогерентных элементов практически такими же, как в примитивной мантии, а второй существенно обеднен, причем степень обеднения прямо коррелирует со степенью некогерентности. Надо отметить, что гетерогенность источников океанических базальтов установлена на основании многочисленных геохимических данных (Zinler, Hart, 1986; Hofmann, White, 1972; и др.).

Расплавы, связанные с обстановками континентальных окраин, резко отличаются от составов обстановок I и II (рис. 3). Для обстановки островных дуг (III) характерно постепенное снижение концентраций в правой части спектра, что указывает на ее сходство с расплавами из обедненного мантийного резервуара. Но это постепенно нарастающее обеднение не продолжается в левой части спектра, более того, отмечается умеренное обогащение наиболее некогерентными элементами (Cs, Ba, K). Отчетливо выражены другие коровые метки, например, относительное обогащение Li, Pb, Ti (Rudnick, Gao, 2014). Хорошо выражена отрицательная Ta–Nb аномалия – одна из наиболее ярких геохимических особенностей окраинных обстановок (Pearce, 1982). Таким образом, в образовании расплавов обстановки III, вероятно, участвовала обедненная мантия и континентальная кора.

Расплавы активных окраин (обстановка IV) сходны с расплавами островных дуг, но есть и определенные отличия (рис. 3). Так, в правой части спектра нет признаков обеднения – все элементы располагаются вблизи 1, т.е. идентичны расплавам океанических островов. Признаки корового резервуара также присутствуют, причем даже в несколько большей степени по сравнению с обстановкой III (например, обогащение Cs и Ba значительно более выражено). Присутствует также отрицательная Ta–Nb аномалия. Таким образом, расплавы этой обстановки могли образоваться при участии необедненного или слабо обедненного мантийного резервуара с добавлением коровых компонентов.

Расплавы континентальных рифтов (V) характеризуются плоским распределением в правой части спектра (от Ti до Sc) и умеренным обогащением более некогерентными элементами. При этом признаки влияния континентальной коры проявлены слабо. Также слабо выражена или отсутствует Ta–Nb аномалия, хотя такая аномалия часто устанавливается в континентальных породах (Hofmann, 1988). Обогащенная часть тренда (влево от Gd) примерно совпадает с интервалом элементов, которые могут эффективно переноситься водными флюидами (Kerpler, 1996; Kessel et al., 2005). Таким образом, в качестве источника расплавов можно предположить метасоматически измененную исходно необедненную мантию.

Расплавы задуговых бассейнов (обстановка VI) сходны с составами магм островных дуг (рис. 3). Для них также можно предположить обедненный мантийный источник и влияние корового материала. Вклад коровых компонентов, связанных с субдукцией, устанавливается для многих основных пород задуговых бассейнов (Stern, 2002).

Отметим, что ни для одной из обстановок нет признаков участия карбонатитовых расплавов (высокие концентрации REE при умеренных Ti, Zr). Это, конечно, не означает, что метасоматоз при участии карбонатных расплавов в мантии отсутствует. Но этот процесс, по-видимому, играет второстепенную роль и практически не сказывается на средних составах мафических магм.

ОТНОШЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ

Отношения редких элементов с успехом используются для определения характеристик источников расплавов (Weaver, 1991; Willbold, Stracke, 2006; Arevalo, McDonough, 2010; Turner, Langmuir, 2015). Для выбора индикаторных отношений целесообразно применять следующий критерий: отношение должно характеризоваться низкими вариациями в пределах каждой из геодинамических обстановок и значительной разницей между геодинамическими обстановками. Для количественной оценки эффективности отношений мы использовали следующий параметр:

$$\Psi = (\max(R_i) - \min(R_i)) / \sigma_M,$$

где R_i – рассматриваемое отношение, а σ_M – среднее стандартное отклонение R_i , вычисляемое по формуле:

$$\sigma_M = [(\sum \sigma(R_i)^2 (n_i - 1)) / (\sum n_i - 6)]^{1/2},$$

где суммирование производится по всем геодинамическим обстановкам, $\sigma(R_i)$ – стандартное отклонение отношения i в отдельной обстановке, а n_i – соответствующее число измерений. В каче-

стве потенциально информативных выбирались отношения, для которых значение параметра Ψ значительно превышало 1 (в большинстве случаев в интервале 2–3).

Некоторые информативные отношения элементов приведены в табл. 2. Значительные различия средних значений отношений между отдельными обстановками и группами обстановок отражают специфику первичных расплавов и источников.

Обстановка I характеризуется наиболее высокими отношениями Lu/P, Y/K и Yb/Wa. Отношения Cl/Ta, Cu/Ni, H₂O/Hf, Ni/V и Sr/Ta в обстановках I и II практически идентичны, но по некоторым параметрам обстановки I и II четко различаются (Hf/Yb, Li/Ta, Sc/Nb и др.). Обстановки, связанные с границами плит (III и IV), отчетливо выделяются по многим отношениям. Наблюдается отчетливый Ta–Nb минимум в обстановке III и низкие содержания Ta и Nb относительно соседних элементов (La, Ce) в обстановке IV. Характерны высокие отношения Cl/Ta, Cu/Ta, Li/Ta, Pb/Ta, Sr/Ta, Cu/Ni, H₂O/Hf, Pb/Lu и Sr/Cr. Напротив, значения Ni/V и Ni/Yb относительно низкие. По большинству отношений обстановки III и IV различаются незначительно, но есть исключения, например, относительно высокие отношения Cl/Ta и Sc/Nb в обстановке III. Континентальные магмы (обстановка V) выделяются отчетливым обогащением Mo и W (высокие отношения Mo/Lu, W/Hf, W/Lu), а также высокими отношениями Hf/Yb, Ni/V, Ni/Yb и низкими Cu/Ta, Lu/P, Sc/Nb. Обстановка VI занимает промежуточное положение. Некоторые отношения аналогичны значениям, характерным для океанических обстановок (I и II): Cu/Ni, Lu/P, Ni/V, Ni/Yb, Pb/Lu, Sr/Cr, Sr/Yb. По другим параметрам обстановка VI ближе к субдукционным магмам (III, IV): Cl/Ta, Cu/Ta, Li/Ta, Sc/Nb, что очевидно отражает наличие отрицательной Nb–Ta аномалии.

Используя значения Ψ , можно также выделить отношения с минимальными вариациями между обстановками (например, $\Psi < 0.25$). Такие постоянные отношения выделяются иногда в качестве «канонических» (Workman, Hart, 2005). Некоторые из таких отношений показаны в табл. 2. Мы не включили наиболее очевидные случаи отношений геохимически подобных элементов (например, многочисленные отношения соседних REE). Большинство из этих отношений близко к уровню примитивной мантии (Palme, O'Neill, 2014), что указывает на то что (1) космохимические оценки состава примитивной мантии достаточно достоверно отражают состав силикатной Земли в отношении многих элементов и (2) процессы дифференциации, приведшие к образованию глобальных геохимических резервуаров, не повлияли на отношения ряда элементов. К числу последних относятся отношения, значения которых

в континентальной коре (Rudnick, Gao, 2014) практически не отличаются от значений в средних составах расплавов и примитивной мантии: Zr/Sn, Nb/Ta, Y/No. В некоторых случаях средние значения в мафических расплавах попадают между значениями примитивной мантии и континентальной коры: K/Cl, Na/S, Co/Dy, Ce/La, Yb/Lu, Zr/Sm. Интересны отношения, заметно выходящие за интервал между примитивной мантией и континентальной корой. Среди них – F/Th, S/Sc, La/Th, Rb/U. Очевидно, образование континентальной коры не может обеспечивать наблюдаемые различия этих отношений. Интересно, что значения Zr/Hf почти идентичны в примитивной мантии (34) и континентальной коре (35.7), но более высокие в мафических расплавах всех геодинамических обстановок (38–46). Это указывает на то, что магматические процессы, вероятно, приводили к образованию остаточного резервуара с высоким Zr/Hf отношением.

СРЕДНИЕ И КИСЛЫЕ РАСПЛАВЫ

В отличие от основных расплавов, мы не можем выделить один основной процесс и набор минералов, которые могли бы описать вариации концентраций и отношений элементов в средних и кислых расплавах. Помимо кристаллизационной дифференциации основных расплавов, ведущую роль может играть частичное плавление коровых пород, ассимиляция, смешение магм, флюидный массоперенос и пр. Поэтому для этих расплавов мы проводим сравнение средних составов из разных обстановок с соответствующими характеристиками псевдопервичных основных расплавов. Один из важных вопросов – существует ли унаследование геохимических характеристик мафических расплавов и их источников в составах средних и кислых расплавов.

К сожалению, данные для кислых и средних расплавов срединно-океанических хребтов ограничены, поэтому дальше мы рассматриваем только обстановки II–VI. Сравнение спайдер-диаграмм (рис. 1) указывает на то, что некоторые закономерности определенно сохраняются. В частности, в кислых и средних расплавах наблюдаются отчетливые Ta–Nb аномалии в крайних обстановках (III, IV). Но есть и явные отличия от основных магм, например, отрицательные аномалии по Sr, P, Sc. Интересны также сравнительно небольшие различия в содержаниях летучих компонентов. Для более детального сравнения проследим вариации характерных отношений элементов (табл. 2) в ряду от основных расплавов к кислым.

На рис. 4 показаны вариации средних отношений элементов. В первом приближении можно выделить три типа вариаций. Некоторые отношения почти не меняются при переходе от основных рас-

плавов к кислым. Такие отношения используются для выявления особенностей источников и механизмов образования и преобразования магм. Типичным примером является отношение Nb/Ta, которое находится на уровне примитивной мантии во

всех типах расплавов из всех геодинамических обстановок. Другие подобные стабильные отношения геохимически близких элементов – Zr/Hf, Y/Ho, Ce/La, Rb/U. При этом небольшие закономерные вариации прослеживаются и для некоторых из этих

Таблица 2. Средние отношения элементов в мафических расплавах разных геодинамических обстановок, примитивной мантии (PM, Palme, O'Neill, 2014) и континентальной коре (CC, Rudnick, Gao, 2014)

Отношение	I	II	III	IV	V	VI	PM	CC
Отношения с значимыми различиями между обстановками								
10^{-3}Cl/Ta	0.29	0.2	9.2	2.15	0.83	5.7	0.7	0.35
Cu/Ni	0.28	0.25	0.83	1.4	0.17	0.33	0.01	0.46
10^{-3}Cu/Ta	0.25	0.1	1.1	0.38	0.09	0.94	0.47	0.039
$10^{-3}\text{H}_2\text{O/Dy}$	0.53	0.89	5.9	5.1	2.2	1.7	1.5	–
$10^{-3}\text{H}_2\text{O/Hf}$	1.1	1.3	14.2	8.5	2.7	5.1	3.6	–
Hf/Yb	0.8	1.5	0.7	1.2	2.1	0.6	0.6	1.95
Li/Ta	18.5	4.8	67.6	25.4	7.4	54.1	37.2	22.9
10^3Lu/P	0.75	0.26	0.37	0.23	0.14	0.5	0.8	0.69
Mo/Lu	1.3	3	1.6	1.9	7.9	0.97	0.66	2.7
Ni/V	0.8	1.1	0.34	0.32	2.25	0.86	21.6	0.43
10^{-2}Ni/Yb	0.97	1.9	0.64	0.49	3.6	1.3	39	0.31
Pb/Lu	1.3	3.3	6.4	13.1	11.4	2.4	2.6	37
Pb/Ta	1.9	1	19.9	11.6	2.3	8.7	4.3	15.7
Sc/Nb	14.2	2.9	29.6	7.3	1.2	31.1	27.5	2.7
Sr/Cr	0.4	0.8	2.4	5.6	1.4	0.5	0.009	2.4
10^{-3}Sr/Ta	0.42	0.32	3.8	1.5	0.44	1.7	0.51	0.46
10^{-2}Sr/Yb	0.5	1.5	1.9	2.8	3.2	0.8	0.46	1.7
W/Hf	0.02	0.06	0.09	0.1	0.21	0.04	0.04	0.27
W/Lu	0.12	0.7	0.43	0.7	3.1	0.15	0.17	3.3
10^2Y/K	2.6	0.62	0.31	0.26	0.25	0.53	1.6	0.13
10^2Yb/Ba	14	2.5	1.1	0.6	0.45	5.2	7	0.42
Отношения с незначительными различиями между обстановками								
K/Cl	12	20	7.4	10	8.3	7.2	8.7	61
10^{-2}F/Th	5	3.8	6.2	5.9	5.4	3.3	2.9	1
Na/S	18.4	27	23	23	24	20	13	57
S/Sc	26.6	22.7	23.4	33	30	23	12.2	18
10^{-2}S/Yb	3.8	3.5	5.0	5.7	4.7	4.0	4.2	2.1
Co/Dy	16.6	19.7	19.2	16.5	16.5	19	141	7.4
Zr/Sn	86	80	90	61	66	74	74	78
Zr/Hf	38	40	43	42	42	46	34	35.7
Nb/Ta	9.1	11.5	14.4	12.6	18.2	12.4	13.8	11.4
Ce/La	2.9	2.5	2.8	2.3	2	2.7	2.6	2.2
Yb/Lu	6.5	6.8	6.4	6.1	7	6.1	6.7	6.3
Zr/Sm	27	28	24	24.5	26	24	23.7	34
Y/Ho	27	25	28	23	25	25	26	25
La/Th	11	8.7	8	9.1	11.5	8.8	8	3.6
Rb/U	17.2	20	27.5	20	28.7	20	26	38

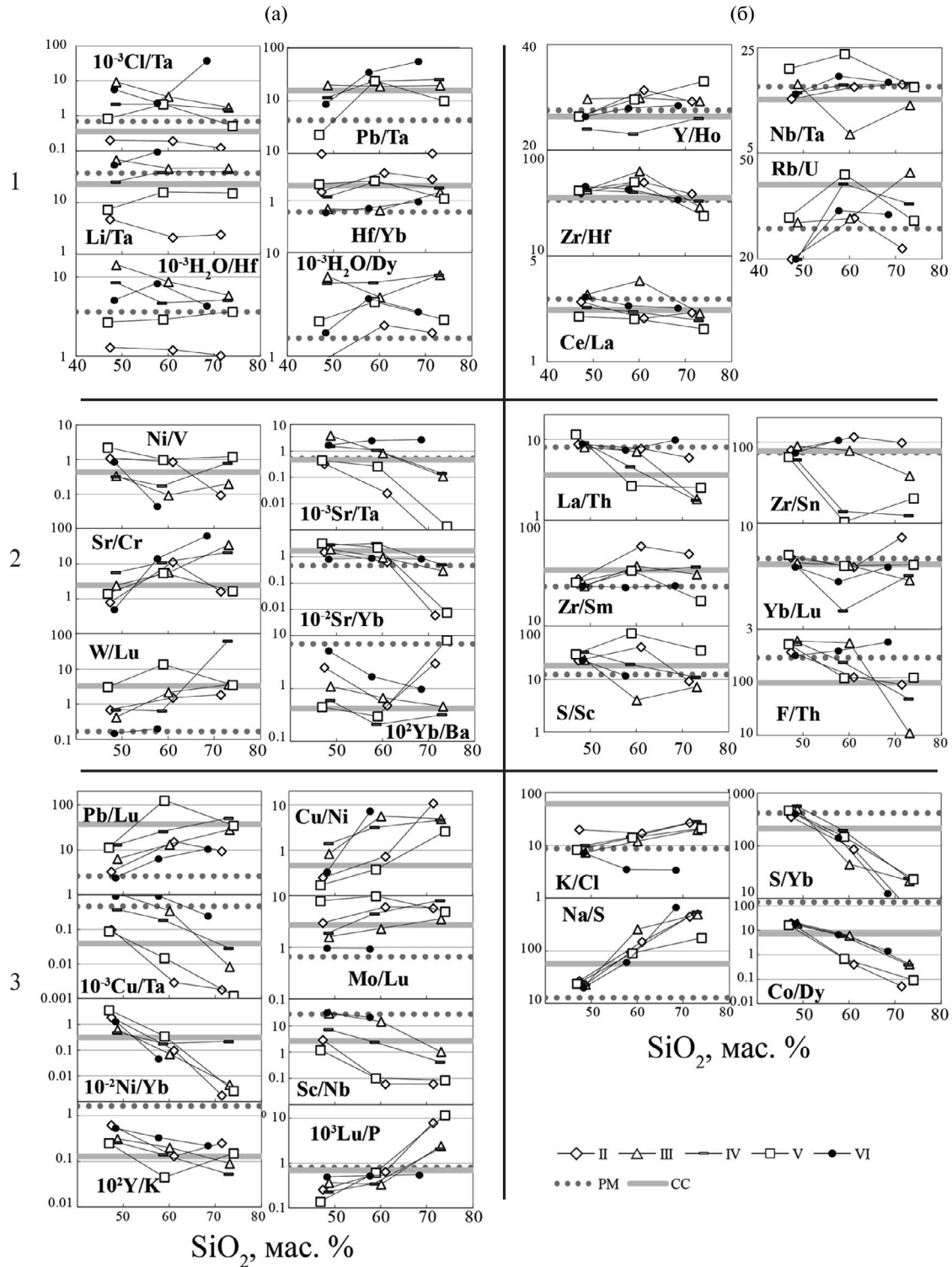


Рис. 4. Вариации отношений содержаний элементов в средних составах основных, средних и кислых расплавах из геодинамических обстановок II–VI. Отношения разбиты на группы следующим образом. Колонки выделяются по сходству или различию средних составов мафических расплавов из разных геодинамических обстановок: а – индикаторные отношения со значимыми различиями между обстановками; б – отношения, практически идентичные для всех обстановок. Ряды объединяют разные типы изменения отношений от основных расплавов к кислым: 1 – значения в средних и кислых расплавах идентичны таковым в основных расплавах; 2 – незакономерные знакопеременные вариации; 3 – систематические параллельные изменения, иногда на несколько порядков. Приведены также средние значения отношений в примитивной мантии (PM; Palme, O’Neill, 2014) и континентальной коре (CC; Rudnick, Gao, 2014).

отношений. В частности, средние отношения Zr/Hf и Ce/La несколько ниже во всех обстановках в кислых расплавах по сравнению с основными. Эти различия находятся на уровне стандартных отклонений, но одинаковое поведение во всех обстановках позволяет предполагать, что эти вариации отражают реальные процессы.

Очень слабые вариации при переходе от основных расплавов к кислым наблюдаются и для некоторых отношений, значимо различающихся в разных обстановках. Так, значение Li/Ta (рис. 4) остается минимальным в обстановке II, максимальным в обстановках III, IV и промежуточным в обстановке V, т.е. наследуется в кислых составах от мафических магм и их источников. Таким же образом ведут себя и некоторые другие отношения: Cl/Ta, Pb/Ta, Hf/Yb, H₂O/Hf и H₂O/Dy.

Существует большое количество отношений, для которых характерны незакономерные изменения при переходе от основных расплавов к средним и кислым. Интервал вариаций отношений при этом может быть небольшим, но в результате такого поведения разброс отношений в кислых расплавах становится намного больше по сравнению с мафическими расплавами (например, Zr/Sm на рис. 4). Для индикаторных отношений, характеризующихся значительными отклонениями отдельных обстановок в мафических расплавах, такие вариации могут приводить к изменению относительного положения средних содержаний. Например, наибольшее значение W/Lu в мафических расплавах характерно для континентальной обстановки (рис. 4). В кислых расплавах максимальное значение наблюдается уже в обстановке IV, а разница обстановок V, III и VI нивелируется. Такое поведение характерно для многих отношений: Ni/V, Sr/Ta, Sr/Cr, Sr/Yb, W/Lu, Yb/Ba, La/Th, Zr/Sn, Zr/Sm, Yb/Lu, S/Sc и F/Th (рис. 4).

Существуют отношения, демонстрирующие монотонное и значительное изменение от основных расплавов к кислым, причем примерно параллельное для всех обстановок, например, Sc/Nb и S/Yb. В первом случае сохраняется заметно более высокое отношение в обстановках III и IV, а отношения S/Yb остаются примерно одинаковыми для всех обстановок, но по крайней мере на порядок меньше, чем в основных расплавах. К числу таких закономерно меняющихся отношений относятся Pb/Lu, Cu/Ni, Cu/Ta, Mo/Lu, Ni/Yb, Sc/Nb, Y/K, Lu/P, K/Cl, S/Yb, Na/S и Co/Dy.

Изменения направлены от мантийных значений к составу континентальной коры, но в некоторых случаях отношения в кислых расплавах оказываются намного больше или меньше коровых. С другой стороны, отношение Lu/P, например, значительно увеличивается при переходе от ос-

новных к кислым, а его значения в мантии и коре практически идентичны.

Рассматривая вариации отношений элементов, нетрудно заметить определенную корреляцию с коэффициентами распределения элементов между минералами и расплавами (Наумов и др., 2022), что предполагает важный вклад перераспределения элементов при частичном плавлении и кристаллизации. Очевидно также, что это не единственный фактор. Достаточно четко проявлено снижение отношений халькофильных элементов и серы к литофильным (Ni/Yb, Co/Dy, S/Yb и др.), что может быть следствием удаления сульфидов. Но, с другой стороны, отношение Pb/Lu заметно возрастает, а Ni/V почти не меняется. Кроме того, простое удаление сульфидов вряд ли может обеспечить увеличение Cu/Ni отношения почти на порядок, поскольку оба металла являются примерно в одинаковой степени халькофильными. Вероятно, большое значение имеет также удаление Ni с силикатами. Значительное увеличение значения Lu/P в кислых расплавах можно приписать влиянию апатита. Этот же минерал может отвечать за небольшое снижение отношения Ce/La в кислых расплавах.

Постоянство отношений содержания H₂O к литофильным элементам (Hf, Dy), а также отношения Cl/Ta свидетельствует о том, что дегазация не входит в число главных процессов, контролирующих средние составы расплавов. При этом мы ни в коей мере не ставим под сомнение важную роль дегазации в эволюции конкретных магматических комплексов. Поведение Nb и Ta заслуживает особого внимания, поскольку это один из главных индикаторов участия субдукционных процессов. Проявление Nb-Ta минимума в расплавах любых составов обстановок III и IV можно связать с кристаллизацией рутила или сохранением этого минерала в рестите (Green, Pearson, 1987; Xiong et al., 2005, 2011). Интересно при этом, что отношение Nb/Ta является постоянным и не зависит от состава расплава и геодинамической обстановки. Средние значения этого отношения очень близки также к значениям для примитивной мантии и континентальной коры. Но при этом коэффициенты распределения Nb и Ta между рутилом и расплавом заметно различаются и удаление даже небольшого количества рутила должно влиять на отношение Nb/Ta. Поэтому надо рассматривать и альтернативные причины появления Nb-Ta аномалий, включая влияние флюидного переноса (Baier et al., 2008; Rustioni et al., 2021) и вклад компонентов осадочного материала (Elliott et al., 1997).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, мы показали, что между средними составами основных расплавов разных геодинамических

обстановок существуют принципиальные различия. Наиболее очевидное объяснение этих различий предполагает существование нескольких контрастных геохимических резервуаров. При этом есть много геохимических характеристик расплавов, которые практически не зависят от геодинамической обстановки, что предполагает близкое сходство мантийных резервуаров в отношении большого количества элементов. В этом результате нет ничего принципиально нового, но важно, что такой вывод получен на основании анализа практически всех имеющихся к настоящему времени данных по составам включений в минералах и стеклах пород.

Что касается ответа на вопрос о унаследовании характеристик составов основных магм в средних и кислых расплавах, то ответ здесь будет положительным. Это определяется наличием большого количества отношений элементов, не меняющихся при переходе от основных составов к кислым, а также отношений, закономерно уменьшающихся или увеличивающихся в этом направлении. При этом некоторые отношения элементов говорят о том, что связь основных и кислых расплавов не может определяться одним процессом (кристаллизационная дифференциация или частичное плавление). В пользу этого говорят незакономерные вариации некоторых характеристических отношений, а также очень большие интервалы вариаций ряда отношений, которые трудно описать одностадийным процессом. Так, отношения Ni/Yb, Cu/Ta и Co/Du меняются более, чем на два порядка при переходе от основных расплавов к кислым, в то время как удаление примерно 1% сульфида (фаза, наиболее сильно влияющая на отношения элементов) может изменить эти отношения менее чем на один порядок. Некоторые отношения литофильных элементов также демонстрируют очень высокие вариации: например, значения Sr/Ta в некоторых обстановках падают более, чем на два порядка. Таким образом, в образовании средних и кислых расплавов необходимо присутствие дополнительных контрастных по составу источников, имеющих глобальное распространение.

Созданная нами база данных по составам стекол из включений в минералах и основной массы пород позволяет ставить и решать разные вопросы, связанные с наиболее общими закономерностями магматизма Земли и их связей с геодинамическими процессами. По мере накопления опубликованных данных повышается точность определения средних содержаний элементов, что дает возможность использовать эти параметры для выявления черт сходства и различия геодинамических обстановок. Мы установили, что существуют значимые различия между основными расплавами разных геодинамических обстановок, причем эти различия в первом

приближении коррелируют со степенью когерентности элементов при плавлении мантии и кристаллизации основных расплавов. Достаточно четко выявляется участие обедненных и обогащенных источников расплавов. Кроме того, для обстановок, связанных с субдукционными зонами и континентальными областями характерны аномалии в отношении отдельных элементов (Ta, Nb, Pb и др.). На основании количественных критериев выделены отношения редких и летучих элементов, которые могут быть использованы для уточнения геодинамической позиции расплавов. В первую очередь, это касается основных расплавов. Средние и кислые расплавы наследуют часть геохимических индикаторов основных магм, но некоторые показатели меняются, что ставит задачу выявления геохимических индикаторов специально для таких расплавов. В заключение следует отметить, что многие выводы, к которым мы пришли при анализе средних составов, повторяют заключения геохимиков, исследовавших отдельные магматические комплексы или их группы. Однако наше исследование представляет интерес, поскольку оно определяет геохимический фон в пределах наиболее крупного геодинамического расчленения Земли, на котором развивается все многообразие магматических проявлений.

Авторы благодарны Н.Л. Миронову, С.З. Смирнову, О.А. Луканину и анонимному рецензенту за конструктивную критику и ценные советы.

Работа выполнена в рамках тем Государственного задания ГЕОХИ РАН и ИГЕМ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Наумов В.Б., Гирнис А.В., Дорофеева В.А., Коваленкер В.А. (2022) Летучие, редкие и рудные элементы в магматических расплавах и природных флюидах по данным изучения включений в минералах II. Влияние кристаллизационной дифференциации на концентрации элементов. *Геохимия*. **67**(6), 534–548.
- Naumov V.B., Girnis A.V., Dorofeeva V.A. and Kovalenker V.A. (2022) Volatile, Trace, and Ore Elements in Magmatic Melts and Natural Fluids: Evidence from Mineral-Hosted Inclusions. II. Effect of Crystallization Differentiation on the Concentrations of Ore Elements. *Geochem. Int.* **67**(6), 537–550.
- Наумов В.Б., Дорофеева В.А., Гирнис А.В. (2023) Петрогенные, летучие, рудные и редкие элементы в магматических расплавах главных геодинамических обстановок Земли. I. Средние содержания. *Геохимия*. **68**(12), 1253–1272.
- Arevalo Jr. R., McDonough W.F. (2010) Chemical variations and regional diversity observed in MORB. *Chem. Geol.* **271**, 70–85.
- Baier J., Audetat A., Keppler H. (2008) The origin of the negative niobium tantalum anomaly in subduction zone magmas. *Earth Planet. Sci. Lett.* **267**, 290–300.
- Baker M.B., Hirschmann M.M., Ghiorso M.S., Stolper E.M. (1995) Compositions of near-solidus peridotite melts from

- experiments and thermodynamic calculations. *Nature*. **375**, 308–311.
- Barr J.A., Grove T.L. (2013) Experimental petrology of the Apollo 15 group A green glasses: Melting primordial lunar mantle and magma ocean cumulate assimilation. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **106**, 216–230.
- Bulatov V.K., Gurnis A.V., Brey G.P. (2000) Primary magmas of mid-ocean ridges: Analysis of experimental modeling. *Geochem. Int.* **38**, Suppl. 1, S108–S122.
- Bulatov V.K., Gurnis A.V., Brey G.P. (2002) Experimental melting of a modally heterogeneous mantle. *Mineral. Petrol.* **75**, 131–152.
- Chalot-Prat F., Falloon T.J., Green D.H., Hibberson W.O. (2010) An experimental study of liquid compositions in equilibrium with plagioclase spinel lherzolite at low pressures (0.75 GPa). *J. Petrol.* **51**, 2349–2376.
- Chalot-Prat F., Falloon T.J., Green D.H., Hibberson W.O. (2013) Melting of plagioclase + spinel lherzolite at low pressures (0.5 GPa): An experimental approach to the evolution of basaltic melt during mantle refertilisation at shallow depths. *Lithos*. **172–173**, 61–80.
- Collinet M., Medard E., Charlier B., Vander Auwera J., Grove T.L. (2015) Melting of the primitive martian mantle at 0.5–2.2 GPa and the origin of basalts and alkaline rocks on Mars. *Earth Planet. Sci. Lett.* **427**, 83–94.
- Davis F.A., Hirschmann M.M. (2013) The effects of K₂O on the compositions of near-solidus melts of garnet peridotite at 3 GPa and the origin of basalts from enriched mantle. *Contrib. Mineral. Petrol.* **166**, 1029–1046.
- Davis F.A., Hirschmann M.M., Humayun M. (2011) The composition of the incipient partial melt of garnet peridotite at 3 GPa and the origin of OIB. *Earth Planet. Sci. Lett.* **308**, 380–390.
- Davis F.A., Humayun M., Hirschmann M.M., Cooper R.S. (2013) Experimentally determined mineral/melt partitioning of first-row transition elements (FRTE) during partial melting of peridotite at 3 GPa. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **104**, 232–260.
- Draper D.S., Johnston A.D. (1992) Anhydrous PT phase relations of an Aleutian high-MgO basalt: an investigation of the role of olivine-liquid reaction in the generation of arc high-alumina basalts. *Contrib. Mineral. Petrol.* **112**, 501–519.
- Elliott T., Plank T., Zindler A., White W., Bourdon B. (1997) Element transport from slab to volcanic front at the Mariana arc. *J. Geophys. Res.* **102** (B7), 14991–15019.
- Elthon D., Scarfe C.M. (1984) High-pressure phase equilibria of a high-magnesia basalt and the genesis of primary oceanic basalts. *Am. Mineral.* **69**, 1–15.
- Frey F.A., Green D.H., Roy S.D. (1978) Integrated model of basalt petrogenesis: a study of quartz tholeiites to olivine melilitites from southeast Australia utilizing geochemical and experimental petrologic data. *J. Petrol.* **19**, 463–513.
- Green T.H., Pearson N.J. (1987) An experimental study of Nb and Ta partitioning between Ti-rich minerals and silicate liquids at high pressure and temperature. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **51**, 55–62.
- Hoernle K., Tilton G., Le Bas M.J., Duggen S., Garbe-Schonberg D. (2002) Geochemistry of oceanic carbonatites compared with continental carbonatites: mantle recycling of oceanic crustal carbonate. *Contrib. Mineral. Petrol.* **142**, 520–542.
- Hofmann A., White W. (1982) Mantle plumes from ancient oceanic crust. *Earth Planet. Sci. Lett.* **57**(2), 421–436.
- Hofmann A.W. (1988) Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust. *Earth Planet. Sci. Lett.* **90**, 297–314.
- Hofmann A.W. (1997) Mantle geochemistry: the message from oceanic volcanism. *Nature*. **385**, 219–229.
- Keppler H. (1996) Constraints from partitioning experiments on the composition of subduction-zone fluids. *Nature*. **380**, 237–240.
- Kessel R., Schmidt M. W., Ulmer P. and Pettke T. (2005) Trace element signature of subduction-zone fluids, melts and supercritical liquids at 120–180 km depth. *Nature*. **437**, 724–727.
- Lambart S., Laporte D., Schiano P. (2009) An experimental study of focused magma transport and basalt–peridotite interactions beneath mid-ocean ridges: implications for the generation of primitive MORB compositions. *Contrib. Mineral. Petrol.* **157**, 429–451.
- Laporte D., Toplis M.J., Seyler M., Devidal J.-L. (2004) A new experimental technique for extracting liquids from peridotite at very low degrees of melting: application to partial melting of depleted peridotite. *Contrib. Mineral. Petrol.* **146**, 463–484.
- Laporte D., Lambart S., Schiano P., Ottolini L. (2014) Experimental derivation of nepheline syenite and phonolite liquids by partial melting of upper mantle peridotites. *Earth Planet. Sci. Lett.* **404**, 319–331.
- Mallik A., Dasgupta R. (2012) Reaction between MORB-eclogite derived melts and fertile peridotite and generation of ocean island basalts. *Earth Planet. Sci. Lett.* **329–330**, 97–108.
- Mallmann G., O'Neill H.St.C. (2007) The effect of oxygen fugacity on the partitioning of Re between crystals and silicate melt during mantle melting. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **71**, 2837–2857.
- Meen J.K. (1990) Elevation of potassium content of basaltic magma by fractional crystallization: The effect of pressure. *Contrib. Mineral. Petrol.* **104**, 309–331.
- Niu Y., Waggoner D.G., Sinton J.M., Mahoney J.J. (1996) Mantle source heterogeneity and melting processes beneath seafloor spreading centers: The East Pacific Rise, 18°–19° S. *J. Geophys. Res.* **101**, 27711–27733.
- Palme H., O'Neill H.St.S. (2014) Cosmochemical estimates of mantle composition. In *Treatise on Geochemistry*. 2nd Ed. **3**, 1–39.
- Pearce J.A. (1982) Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: Thorpe R.S. (Ed.) *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks*. Wiley, Chichester. 526–547.
- Pickering-Witter J., Johnston A.D. (2000) The effect of variable bulk composition on the melting systematics of fertile peridotitic assemblages. *Contrib. Mineral. Petrol.* **140**, 190–211.
- Plank T. (2014) The chemical composition of subducting sediments. In *Treatise on Geochemistry* 2nd Ed. **4**, 607–629.
- Rudnick R.L., Gao S. (2014) Composition of the continental crust. In *Treatise on Geochemistry*. 2nd Ed. **4**, 1–51.
- Rustioni G., Audetat A., Keppler H. (2021) The composition of subduction zone fluids and the origin of the trace element enrichment in arc magmas. *Contrib. Mineral. Petrol.* **176**, 51.
- Schwab B.E., Johnston A.D. (2001) Melting systematics of modally variable, compositionally intermediate peridotites and the effect of mineral fertility. *J. Petrol.* **42**, 1789–1811.

- Sen G. (1982) Composition of basaltic liquids generated from a partially depleted lherzolite at 9 kbar pressure. *Nature*. **299**, 336–338.
- Stern R.J. (2002) Subduction zones. *Rev. Geophys.* **40**, 1012. doi:10.1029/2001RG000108.
- Storch B., Regelous M., Noebel K.M., Haase K.M., Bauer J. (2022) Extreme geochemical heterogeneity beneath the North Tonga Arc: Interaction of a subduction zone with intraplate seamount chains. *Chem. Geol.* **603**, 120903. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2022.120903>
- Sun S., McDonough W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In Saunders A.D. and Norry M.J. (Eds.) *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society of London, Special Publication. **42**, 313–345.
- Takahashi E., Kushiro I. (1983) Melting of a dry peridotite at high pressure and basalt magma genesis. *Am. Mineral.* **68**, 859–879.
- Tilhac R., Begg G.C., O'Reilly S.Y., Griffin W.L. (2022) A global review of Hf-Nd isotopes: New perspectives on the chicken-and-egg problem of ancient mantle signatures. *Chem. Geol.* **609**, 121039 <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2022.121039>
- Turner S.J., Langmuir C.H. (2015) The global chemical systematics of arc front stratovolcanoes: Evaluating the role of crustal processes. *Earth Planet. Sci. Lett.* **422**, 182–193.
- Weaver B.L. (1991) Trace element evidence for the origin of ocean-island basalts. *Geology*. **19**, 123–126.
- Willbold M., Stracke A. (2006) Trace element composition of mantle end-members: Implications for recycling of oceanic and upper and lower continental crust. *Geochim. Geophys. Geosyst.* **7** (4), Q04004, doi:10.1029/2005GC001005
- Workman R.K., Hart S.R. (2005) Major and trace element composition of the depleted MORB mantle (DMM). *Earth Planet. Sci. Lett.* **231**, 53–72.
- Xiong, X.L., Adam J., Green T.H. (2005) Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: implications for TTG genesis. *Chem. Geol.* **218**, 339–359.
- Xiong X., Keppler H., Audétat A., Ni H., Sun W., Li Y. (2011) Partitioning of Nb and Ta between rutile and felsic melt and the fractionation of Nb/Ta during partial melting of hydrous metabasalt. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **75**, 1673–1692.
- Yaxley G.M., Green D.H. (1998) Reactions between eclogite and peridotite: mantle refertilization by subduction of oceanic crust. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.* **78**, 243–255.
- Zindler A., Hart S. (1986) Chemical geodynamics. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **14**, 493–571.

MAJOR, VOLATILE, ORE, AND TRACE ELEMENTS IN MAGMATIC MELTS FROM MAIN GEODYNAMIC SETTINGS.

II. SIMILARITY AND DIFFERENCES

V. B. Naumov^{a,*}, A. V. Girnits^{b,**}, V. A. Dorofeeva^a

^a Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences, Kosygina, 19, Moscow, 119991 Russia

^b Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Starominetny, 35, Moscow, 119017 Russia

*e-mail: naumov@geokhi.ru

**e-mail: girnits@igem.ru

Based on the mean contents of elements and their standard deviations estimated in the first part of this research project (Naumov et al, 2022), we compared in detail the distinguished geodynamic settings. In order to compare the compositions of mafic melts, a correction to take into account changes related to the fractionation of main minerals was introduced. The use of numerical criteria made it possible to determine the sequence of elements by the degree of coherence during melting and crystallization of the main magmatic melts. Within this sequence, a regular variation in elemental contents normalized to the average composition of oceanic island melts was established. The melts of mid-ocean ridges show a monotonous increase in normalized contents from the most incompatible (Cs, Ba, U, La, etc.) to compatible elements (Sc, Ni, Cr). The settings of convergent plate boundaries show relative enrichment in the most incompatible elements and significant negative Ta-Nb anomalies relative to neighboring elements. The magmas of continental rifts show the highest enrichment in the most incompatible elements, as well as Pb, Li, and some other elements. Indicator element ratios showing significant variations between the settings were distinguished for mafic melts. Some element ratios are almost identical (within observed variations) in mafic melts from all the settings. The mean element ratios in mafic, intermediate, and silicic magmas show three types of behavior. Some ratios (including the canonic ratios Nb/Ta, Zr/Hf, etc.) in intermediate and silicic magmas are inherited from the composition of mafic melts. Some ratios show irregular changes from mafic to silicic melts (Sr/Cr, F/Th, etc.). There are ratios that changes monotonously and significantly in the sequence from mafic to silicic melts (Ni/Yb, Lu/P, etc.). The variations of element ratios are related to the crystallization differentiation of melts and contributions of geochemically contrasting reservoirs.

Keywords: trace elements, crystallization differentiation, degree of compatibility, indicator ratio, magma source