

ЛЕТУЧИЕ, РЕДКИЕ И РУДНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В МАГМАТИЧЕСКИХ РАСПЛАВАХ И ПРИРОДНЫХ ФЛЮИДАХ ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ ВКЛЮЧЕНИЙ В МИНЕРАЛАХ. I. СРЕДНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ 45 ЭЛЕМЕНТОВ В ГЛАВНЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ОБСТАНОВКАХ ЗЕМЛИ

© 2022 г. В. Б. Наумов^a *, В. А. Дорофеева^a, А. В. Гирнис^b **, В. А. Коваленкер^b

^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 04.03.2021 г.

После доработки 29.07.2021 г.

Принята к публикации 28.09.2021 г.

На основании обобщения опубликованных данных по составам включений в минералах и закалочных стекол пород рассчитаны средние концентрации 45 летучих, редких и рудных элементов в магматических силикатных расплавах главных геодинамических обстановок Земли и в природных флюидах. Выделены следующие геодинамические обстановки, различающиеся по условиям формирования и эволюции магматических расплавов: I – зоны спрединга океанических плит (срединно-океанические хребты); II – проявления мантийных плюмов в условиях океанических плит (океанические острова и лавовые плато); III и IV – обстановки, связанные с субдукционными процессами (III – зоны островодужного магматизма, IV – зоны магматизма активных континентальных окраин); V – внутриконтинентальные рифты и области континентальных горячих точек; VI – зоны задугового спрединга, связанные с субдукцией. Проведено сравнение концентраций этих элементов в основных и кислых расплавах для III, IV и V обстановок. Показано, что различия в степени обогащения рудных элементов в зависимости от геодинамической обстановки могут быть связаны с разным вкладом флюидов в перенос и накопление элементов. Рассчитаны отношения содержаний элементов в каждой геодинамической обстановке к средним содержаниям элемента по всем обстановкам Земли.

Ключевые слова: расплавные и флюидные включения, летучие компоненты, редкие и рудные элементы, геодинамические обстановки

DOI: 10.31857/S0016752522040033

Лавинообразный рост числа публикаций, содержащих данные о концентрациях летучих, редких и рудных элементов в магматических силикатных расплавах и в природных флюидных включениях в минералах, кристаллизовавшихся из гидротермальных растворов, свидетельствует о востребованности исследований включений в минералах (табл. 1). Результаты этих исследований нашли широкое применение при решении ключевых проблем рудной геологии и металлогении, они используются при реконструкции петрологических процессов, выявлении физико-химических обстановок формирования обогащенных металлами, летучими компонентами и водой магм. Результаты этих работ вносят значительный вклад в понимание генезиса магматогенных

рудных месторождений, которые играют выдающуюся роль в обеспечении мировой экономики стратегическими и высокотехнологичными металлами.

Изучение расплавных и флюидных включений в минералах рудно-магматических систем направлено, прежде всего, на выявление специфики их формирования в разных геодинамических обстановках, как базиса генетических моделей – основы для прогноза, поисков и оценки территорий с экономически важными минеральными месторождениями (Richards, Kerrich, 1993; Hedenquist, Lowenstern, 1994; Haber et al., 1998; Lang, Baker, 2001; Kovalenker et al., 2001; Richards, 2003; Sillitoe, 2003; Sillitoe, Hedenquist, 2003; Коваленкер и др., 2004, 2011, 2016; Сафонов и др.,

Таблица 1. Количество публикаций и определений с данными о концентрациях летучих, редких и рудных элементов в магматических силикатных расплавах и в природных флюидах в разные периоды времени

Период	Магматические расплавы		Природные флюиды	
	количество		количество	
	публикаций	определений	публикаций	определений
1975–1980	23	145	—	—
1981–1990	137	905	—	—
1991–2000	391	5974	19	314
2001–2010	615	21253	112	3361
2011–2020	664	63229	143	7860
1975–2020	1830	91506	274	11 535

Примечания. Основные публикации по расплавам и флюидам за период 1975–2014 гг. опубликованы ранее (Наумов и др., 2016).

2006; Tomkins et al., 2009; Наумов и др., 2013; Волков и др., 2014; Naumov et al., 2014; Fiedrich et al., 2020 и многие другие). Полученная при этих исследованиях информация имеет большое значение (наряду с изотопно-геохимическими данными) для оценки роли возможных источников рудных компонентов, которые ответственны за геохимический профиль формирующейся рудной минерализации и опосредованно указывают на связь с магматическими телами того или иного состава. Так известно, что с магматическими телами основного-ультраосновного состава ассоциируют месторождения Ni, Cu, Cr, Co, платиноидов, со средними и кислыми магмами — месторождения Cu, Au, Ag, Mo, W и Sn, со щелочными — редких и редкоземельных элементов. Это означает, что металлогеническая специализация регионов во многих случаях определяется распространением в их пределах магматических образований конкретных типов и состава. Ярким примером могут служить хорошо задокументированные тесные генетические связи между субдукционными известково-щелочными магмами и месторождениями порфирового (Cu, Au, Mo) и эпитермального (Au, Ag, Cu, Pb, Zn) типов (Hedenquist, Lowenstern, 1994; Sawkins, 1990) в обстановках активных континентальных окраин и островных дуг. Очевидно, что знание таких закономерностей может способствовать существенному уточнению круга поисковых объектов.

Еще одним ярким примером служит ассоциация порфировых и эпитермальных месторождений мирового класса (Au, Cu, Te) с высококалорийными щелочными магмами. Объем продуктов такого магматизма в островных дугах и активных континентальных окраинах не превышает 5–10%, но с ними ассоциирует 40% наиболее крупных месторождений мира этого типа (Sillitoe, 1997; Muller, Forrestal, 1998). Специфические особенности этих щелочных пород — низкие концентрации серы при высоких значениях fO_2 и содержаниях других летучих компонентов (Zhao et al., 2003).

Некоторые исследователи полагают, что источником металлов для ассоциированных с фельзитическим магматизмом месторождений в вулканоплутонических дугах могла служить или субдуцированная океаническая плита, или расположенный выше метасоматизированный мантийный клин (Sillitoe, 1997; Mungall, 2002). Другие привлекают анатексис нижней коры (Hedenquist, Lowenstern, 1994; Tomkins, Mavrogenes, 2003) или остаточную неоднородность мантии (Sillitoe, 1972). Предполагается также, что формирование рудопродуктивных магм может включать процессы смешения мантийного и корового материалов (Richards, 2003). С другой стороны, образованные вне вулканоплутонических дуг золоторудные минералообразующие системы, представленные интрузивно-связанными месторождениями (intrusion-related или granite-related deposits) обычно ассоциируют с восстановленными магмами, которые, вероятно, являются результатом частичного плавления коровых пород (Lang, Baker, 2001). Это ставит под сомнение представления о необходимости океанской плиты или мантии в качестве источника золота (Tomkins et al., 2009), поэтому актуальным остается выявление процессов, которые влияют на содержания металлов в этих коровых магмах.

С этой целью значительный объем исследований природных силикатных расплавов из разных геодинамических обстановок направлен на определение концентраций летучих компонентов (H_2O , F, Cl, S), редких и рудных элементов. Эти исследования стали особенно эффективными при использовании прецизионных и чувствительных локальных методов количественного химического анализа (электронный, ионный и протонный микрозонд, раман-спектроскопия, масс-спектрометрия с лазерной абляцией, локальная инфракрасная спектроскопия и др.) природных расплавленных и флюидных включений, а также закалочных стекол. В данной работе на основе обобщения многочисленных опубликованных данных нами предпринята попытка оценить и сопоставить концентрации некоторых элементов в

составе магматических расплавов и природных флюидов, формировавшихся в разных геодинамических обстановках. По сравнению с опубликованной нашей статьей (Наумов и др., 2016), в которой были рассчитаны средние концентрации 24 рудных элементов в магматических силикатных расплавах главных геодинамических обстановок Земли и в природных флюидах, в настоящей статье приведены результаты расчета средних концентраций уже 45 элементов по значительно большему количеству определений.

ХАРАКТЕРИСТИКА ИСПОЛЬЗОВАННОЙ БАЗЫ ДАННЫХ

В табл. 1 представлены данные о количестве публикаций и определений концентраций 45 летучих, редких и рудных элементов в магматических силикатных расплавах и в природных флюидах в разные периоды времени. Эти определения для расплавов появились в литературе с 1975 г., а для природных флюидов — с 1991 г., причем 70% таких данных получены и опубликованы в последние 10 лет (2011–2020 гг.). Мы не имеем возможности привести все публикации, поэтому в примечании к табл. 1 даны ссылки только на работы 2015–2020 гг., в которых содержится 50 или более анализов элементов в расплавах включений или закалочных стекол вулканических пород. Для флюидов выбраны работы с 30 и более анализами. Основные публикации по расплавам и флюидам за период 1975–2014 г.г. приведены в статье Наумова и др. (2016).

Основные публикации по магматическим расплавам за период 2015–2020 гг. — Chamberlain et al., 2015; Jenner et al., 2015; Loewen, Bindeman, 2015; Mercer et al., 2015; Schiavi et al., 2015; Szymanowski et al., 2015; Brandl et al., 2016; Chamberlain et al., 2016; Cooper et al., 2016; Forni et al., 2016; Husen et al., 2016; Myers et al., 2016; Ruth et al., 2016; Shimizu et al., 2016; Tamburrino et al., 2016; Tuohu et al., 2016; Walowski et al., 2016; Ancellin et al., 2017; Benson et al., 2017; Marschall et al., 2017; Rasmussen et al., 2017; Zhang, Audetat, 2017; Zwan et al., 2017; Audetat et al., 2018; Forni et al., 2018; Hartley et al., 2018; Hauri et al., 2018; Hulsbosch et al., 2018; Li et al., 2018; Swallow et al., 2018; Yang et al., 2018; Chamberlain et al., 2019; Jones et al., 2019; Le Voyer et al., 2019; Mallick et al., 2019; Miller et al., 2019; Myers et al., 2019; Schindlbeck et al., 2019; Shimizu et al., 2019; Taracsak et al., 2019; Walowski et al., 2019; Wieser et al., 2019; Woelki et al., 2019; Fiedrich et al., 2020; Ouyang et al., 2020; Portnyagin et al., 2020; Wolff et al., 2020.

Основные публикации по природным флюидам за период 2015–2020 гг. — Catchpole et al., 2015; Li et al., 2015; Pelch et al., 2015; Burisch et al., 2016; Essarraj et al., 2016; Hulsbosch et al., 2016; Kurosawa et al., 2016; Marquez-Zavalia, Heinrich, 2016; Morales et al.,

2016; Richard et al., 2016; Schindler et al., 2016; Fusswinkel et al., 2017; Hennings et al., 2017; Seo et al., 2017; Shu et al., 2017; Walter et al., 2017; Прокофьев и др., 2018; Chang et al., 2018; Damdinova et al., 2018; Gomes et al., 2018; Hurtig et al., 2018; Liu et al., 2018; Schlegel et al., 2018; Van Daele et al., 2018; Zhang, Audetat, 2018; Audetat, 2019; Audetat, Zhang, 2019; Berni et al., 2019; Chi et al., 2019; Keim et al., 2019; Legros et al., 2019; Martz et al., 2019; Mernagh, Mavrogenes, 2019; Mehrabi et al., 2019; Pan et al., 2019; Walter et al., 2019; Yang et al., 2019a, 2019b; Berni et al., 2020; de Graaf et al., 2020; Fiedrich et al., 2020; Prokofiev et al., 2020; Shelton et al., 2020.

Как и в наших ранних публикациях (Наумов и др., 2004, 2010, 2017, 2020) в настоящей статье выделены следующие геодинамические обстановки, различающиеся по условиям формирования и эволюции магматических расплавов: I — зоны спрединга океанических плит (срединно-океанические хребты); II — проявления мантийных плюмов в условиях океанических плит (океанические острова и лавовые плато); III и IV — обстановки, связанные с субдукционными процессами (III — зоны островодужного магматизма, IV — зоны магматизма активных континентальных окраин); V — внутриконтинентальные рифты и области континентальных горячих точек; VI — зоны задугового спрединга, связанные с субдукцией.

В наших предыдущих работах (Наумов и др., 2004, 2010, 2017) было показано, что средние геометрические значения предпочтительны по сравнению со средними арифметическими, поскольку распределение концентраций элементов близко к логнормальному. Для примера, такой тип распределения представлен на рис. 1 для некоторых элементов в магматических расплавах и на рис. 2 для элементов в природных флюидах. Средние геометрические содержания элементов рассчитывались при условии, что с вероятностью 95% величина отдельного определения не отклоняется от среднего значения более, чем на 2σ . Определения, которые не удовлетворяли этому условию, отбрасывались, а величина среднего значения вновь пересчитывалась. Для каждого значения среднего содержания приведены доверительные интервалы для 95% уровня достоверности: первая цифра — плюс к среднему, вторая цифра — минус от среднего. Полученные результаты приведены в табл. 2.

На рис. 3 представлены гистограммы распределения содержаний SiO_2 в природных магматических расплавах главных геодинамических обстановок по данным изучения гомогенных расплавных включений в минералах и закалочных стекол пород. Подчеркнем, что ранее мы отмечали систематическое различие средних составов расплавных включений и стекол пород (Наумов и др., 2017). Но эти различия для большинства

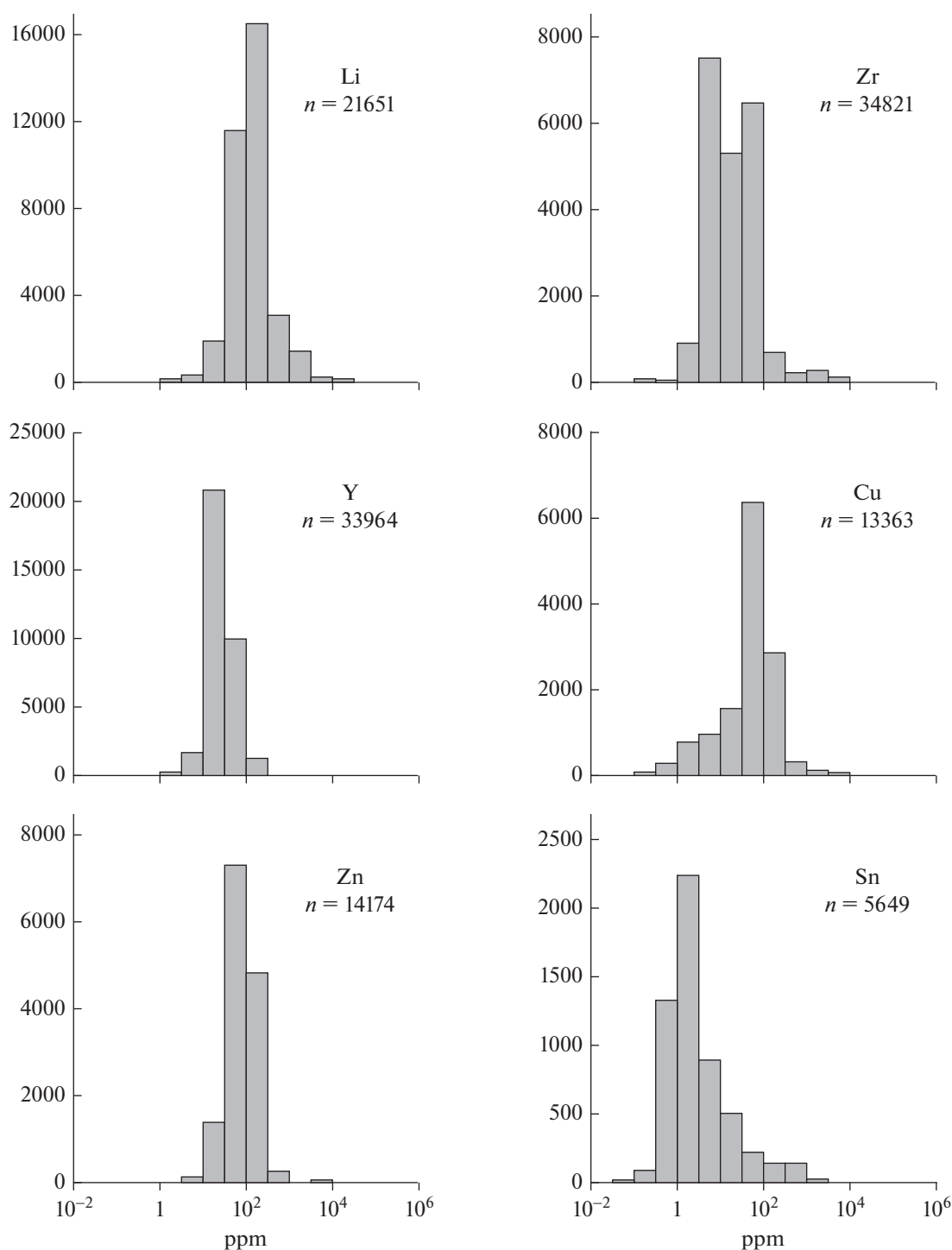


Рис. 1. Гистограммы распределения содержаний Li, Zr, Y, Cu, Zn, Sn в природных магматических расплавах всех геодинамических обстановок по данным изучения гомогенных расплавных включений и закалочных стекол пород (n – количество определений).

элементов связаны с разным уровнем дифференциации расплавов, поэтому совместная обработка двух групп данных правомерна. Отчетливо виден бимодальный тип распределения для островных дуг(III), активных континентальных окраин(IV) и внутриконтинентальных рифтов и областей горя-

чих точек(V). Поэтому для этих обстановок были рассчитаны средние содержания рудных элементов (и доверительные интервалы) для двух интервалов содержаний SiO_2 : 40–54 мас. % и более 66 мас. %. Полученные данные представлены в табл. 3.

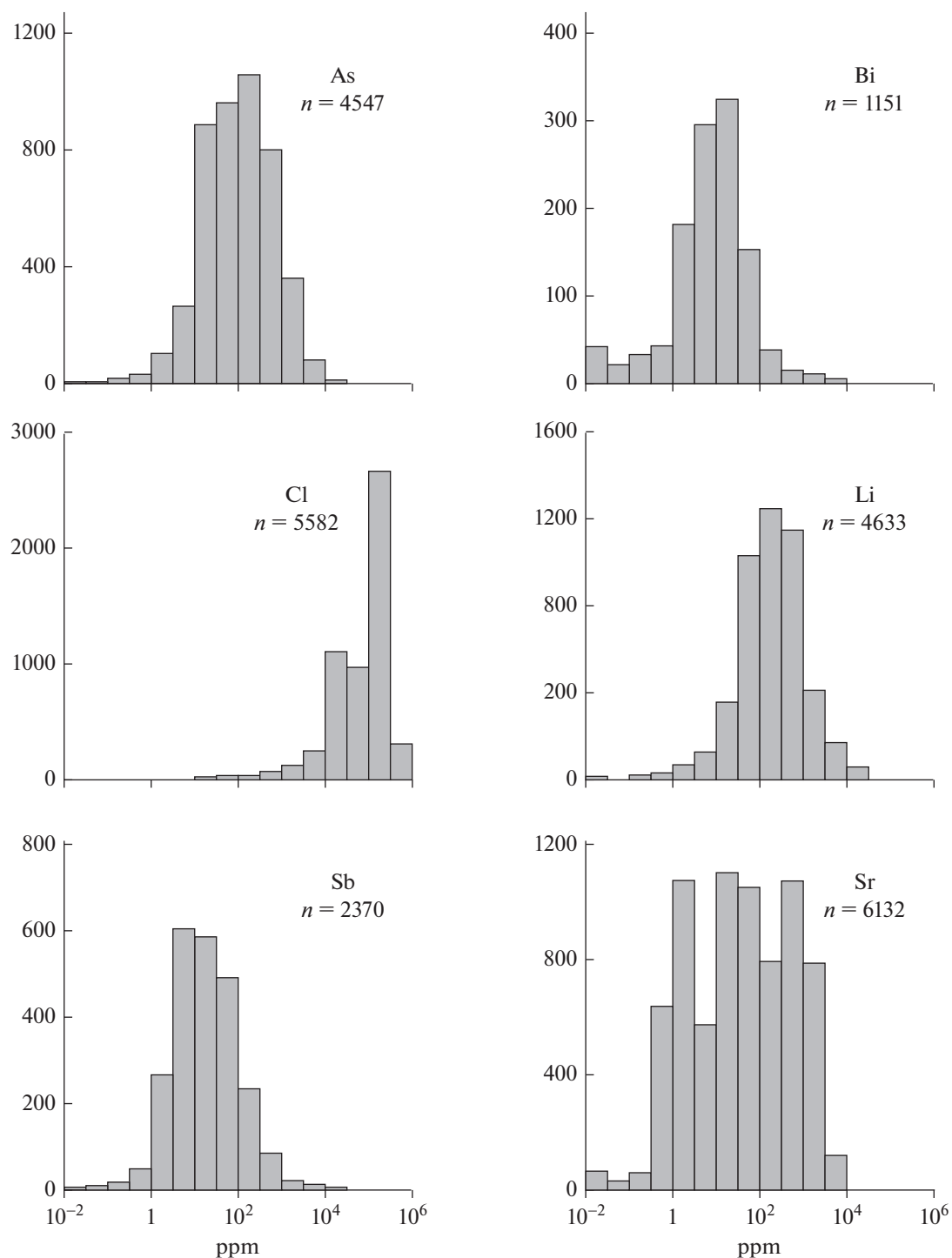


Рис. 2. Гистограммы распределения содержаний As, Bi, Cl, Li, Sb, Sr в природных флюидах (n – количество определений).

ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 2 приведены результаты расчета средних концентраций 45 элементов (летучие компоненты, редкие и рудные элементы) в магматических силикатных расплавах и природных флюидах из всех геодинамических обстановок Земли. Анализ этих данных показывает, что для рудных элементов ос-

новные тенденции, отмеченные ранее для 24 элементов (Наумов и др., 2016), сохраняются и при значительно большем количестве определений. В табл. 2 дополнительно приведены результаты расчета концентраций других элементов: Li, Be, B, F, S, Cl, Sc, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, I, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd и Sm. Поскольку фертильность магматических

Таблица 2. Концентрация (ppm) летучих, редких и рудных элементов в магматических силикатных расплавах ($\text{SiO}_2 \geq 40$ мас. %) и в природных флюидах по данным изучения включений в минералах и закалочных стекол вулканических пород различных геодинамических обстановок

Элемент	Магматические расплавы							Природные флюиды
	I*	II	III	IV	V	VI	Σ^{**}	
Li, ppm	5.54 (3630) +1.99/-1.46	5.98 (2911) +9.69/-3.69	18.27 (4966) +46.20/-13.09	20.58 (3005) +39.57/-13.54	44.70 (6647) +58.86/-25.40	6.10 (354) +3.35/-2.16	16.15 (21651) +52.81/-12.37	182 (4633) +765/-147
Be, ppm	0.52 (2823) +0.32/-0.20	0.93 (586) +1.91/-0.63	0.85 (1558) +1.53/-0.55	1.68 (896) +1.41/-0.77	6.84 (1381) +12.91/-4.47	0.68 (334) +0.48/-0.28	0.87 (7616) +2.11/-0.62	2.49 (149) +22.45/-2.24
B, ppm	1.31 (1282) +0.72/-0.47	1.69 (1937) +2.57/-1.02	25.56 (3707) +39.83/-15.57	32.63 (2185) +82.62/-23.39	28.09 (3052) +52.54/-18.30	6.02 (24) +10.88/-3.88	15.71 (12218) +64.07/-12.62	542 (3391) +1572/-403
F, ppm	170 (2632) +160/-80	610 (5376) +1500/-440	400 (14990) +870/-270	630 (3083) +1590/-450	2440 (6510) +6350/-1760	200 (345) +380/-130	540 (33234) +1850/-420	381 (404) +5547/-357
S, ppm	1070 (6162) +400/-290	660 (9237) +1330/-440	100 (22034) +520/-80	450 (6935) +2270/-380	630 (6599) +1750/-460	820 (508) +1150/-480	380 (51687) +1870/-310	998 (2562) +6890/-872
Cl, wt. %	0.010 (5813) +0.027/-0.007	0.032 (8153) +0.105/-0.025	0.117 (28211) +0.108/-0.056	0.091 (8842) +0.117/-0.051	0.222 (11745) +0.599/-0.162	0.098 (760) +0.251/-0.070	0.097 (64082) +0.214/-0.067	8.17 (5532) +28.93/-6.37
Sc, ppm	39.06 (5187) +6.24/-5.38	30.08 (3322) +17.71/-11.15	16.59 (3526) +28.20/-10.44	12.00 (2377) +25.60/-8.17	5.13 (4124) +5.86/-2.73	36.06 (418) +16.42/-11.28	21.79 (19081) +40.21/-14.13	145 (170) +803/-123
V, ppm	283.0 (4921) +81.1/-63.0	261.5 (3565) +218.9/-119.2	76.0 (3565) +571.1/-67.1	115.9 (2153) +471.7/-93.0	22.6 (3986) +20.3/-20.7	287.4 (572) +147.5/-97.5	164.9 (18937) +480.3/-122.7	1.03 (131) +19.63/-0.98
Cr, ppm	280.8 (5368) +201.8/-117.4	309.4 (3214) +503.4/-191.6	33.3 (2576) +459.7/-31.0	50.6 (1043) +182.1/-39.6	58.6 (2245) +1308.3/-56.1	198.1 (773) +855.4/-160.8	207.4 (15365) +704.2/-160.2	3.73 (123) +69.61/-3.54
Co, ppm	43.50 (3724) +5.74/-5.07	41.53 (1554) +24.85/-15.55	12.71 (1563) +42.21/-9.77	6.37 (1407) +34.54/-5.38	4.96 (1323) +23.47/-4.10	36.22 (437) +19.75/-12.78	29.24 (10077) +48.30/-18.21	2.48 (493) +26.17/-2.26
Ni, ppm	96.09 (4234) +58.28/-36.28	112.08 (2344) +146.53/-63.51	8.77 (1857) +69.06/-7.78	26.06 (1064) +60.96/-18.26	21.78 (1923) +502.00/-2087	65.66 (401) +136.15/-44.30	69.83 (11868) +183.99/-50.62	12.35 (444) +127.5/-11.26
Cu, ppm	75.86 (4252) +21.31/-16.64	89.74 (1701) +67.22/-38.43	36.61 (2783) +155.0/-29.62	43.87 (2110) +234.2/-3695	11.74 (1820) +89.10/-10.38	91.61 (632) +111.9/-50.37	59.99 (13363) +130.9/-41.14	136 (5258) +1642/-126
Zn, ppm	86.71 (3960) +32.29/-23.53	116.36 (1846) +70.69/-43.98	59.82 (2580) +60.63/-30.11	54.39 (1726) +58.48/-28.18	85.16 (3524) +98.85/-45.75	88.94 (464) +40.53/-27.84	82.65 (14174) +67.86/-37.26	401 (4959) +3778/-363
Ga, ppm	17.51 (3422) +2.86/-2.46	23.52 (1111) +11.12/-7.55	16.26 (931) +3.75/-3.04	27.82 (744) +32.05/-14.89	24.95 (2781) +8.54/-6.36	16.65 (229) +4.71/-3.67	19.97 (9223) +8.41/-5.92	1.46 (465) +8.18/-1.24
Ge, ppm	1.54 (1183) +0.11/-0.11	2.25 (62) +2.22/-1.12	1.69 (121) +0.19/-0.17	1.71 (38) +0.22/-0.20	1.82 (109) +0.47/-0.37	1.77 (32) +0.12/-0.11	1.56 (1549) +0.22/-0.19	4.84 (466) +38.73/-4.30
As, ppm	0.18 (974) +0.13/-0.07	0.85 (279) +1.76/-0.57	3.73 (1990) +8.38/-2.58	146.6 (459) +3385/-140.5	5.98 (427) +14.71/-4.25	1.30 (120) +2.69/-0.88	1.73 (4253) +9.77/-1.47	92.59 (4547) +508.7/-78.34

Таблица 2. Продолжение

Элемент	Магматические расплавы							Природные флюиды
	I*	II	III	IV	V	VI	Σ**	
Se, ppm	031 (768) +0.20/−0.09	0.25 (111) +0.18/−0.10	0.19 (77) +0.16/−0.09	9.86 (32) +9.45/−4.83	—	0.32 (62) +0.14/−0.10	0.29 (1050) +0.18/−0.11	12.15 (106) +124.9/−11.07
Br, ppm	0.42 (98) +0.91/−0.29	4.83 (19) +2.87/−1.80	6.86 (44) +9.78/−4.03	2.51 (171) +3.35/−1.44	7.77 (23) +18.20/−5.45	1.41 (127) +3.44/−1.00	1.77 (482) +4.01/−1.23	521 (3047) +2646/−436
Rb, ppm	1.57 (5601) +2.77/−1.00	9.81 (5503) +21.74/−6.76	65.39 (6161) +222.36/−50.53	76.71 (4988) +220.77/−56.93	216.8 (8908) +235.6/−112.9	5.93 (846) +12.89/−4.06	40.78 (32219) +338.9/−36.40	78.92 (5344) +686.2/−70.78
Sr, ppm	122.20 (6690) +62.21/−41.22	241.62 (6438) +408.0/−151.8	137.80 (6759) +297.0/−94.12	242.45 (4784) +724.3/−181.6	31.28 (9558) +745.0/−30.02	190.87 (851) +132.72/−78.29	161.75 (35417) +546.9/−124.8	72.30 (6132) +791.9/−66.25
Y, ppm	27.62 (6337) +10.63/−7.68	25.28 (6159) +13.59/−8.84	22.72 (6897) +18.71/−10.26	18.72 (4193) +14.65/−8.22	39.42 (9208) +57.56/−23.40	24.57 (842) +14.04/−8.94	25.28 (33936) +19.59/−11.04	0.80 (244) +23.25/−0.77
Zr, ppm	85.35 (6379) +64.00/−36.57	144.42 (6288) +210.57/−85.67	100.88 (6895) +131.12/−57.02	117.40 (4508) +124.35/−60.39	189.07 (9628) +273.9/−111.8	74.29 (836) +61.99/−33.79	127.15 (34821) +169.9/−72.73	1.60 (265) +22.59/−1.49
Nb, ppm	2.82 (6197) +4.84/−1.78	13.01 (6674) +31.29/−9.19	3.41 (6844) +7.77/−2.37	8.03 (4304) +12.27/−4.85	43.57 (9355) +73.04/−27.29	1.37 (920) +1.87/−0.79	9.36 (34578) +36.81/−7.46	1.92 (331) +15.66/−1.71
Mo, ppm	0.56 (1994) +0.36/−0.22	1.04 (760) +2.54/−0.74	1.39 (1739) +2.61/−0.91	2.12 (1088) +4.02/−1.39	4.95 (2930) +2.84/−1.81	0.45 (195) +0.49/−0.24	1.57 (8706) +3.45/−1.08	24.79 (1829) +147.5/−21.22
Ag, ppb	23.31 (1090) +7.56/−5.71	63.04 (124) +40.35/−24.60	34.81 (341) +33.80/−17.15	63.46 (223) +210.76/−48.78	117.92 (248) +165.66/−68.89	34.20 (63) +14.45/−10.16	31.51 (2089) +40.41/−17.70	357 (2072) +21657/−3065
Cd, ppb	125.58 (1794) +58.35/−39.84	127.72 (474) +62.49/−41.96	404.35 (211) +1054.6/−292.3	—	131.60 (59) +42.67/−32.22	142.79 (63) +25.15/−21.38	124.03 (2601) +78.06/−47.91	2290 (272) +12300/−1931
In, ppb	77.29 (1392) +18.80/−15.12	90.66 (373) +18.95/−15.68	84.13 (58) +24.20/−18.79	—	101.44 (80) +27.98/−21.93	70.68 (63) +15.21/−12.52	80.47 (1966) +22.08/−17.33	1692 (118) +3243/−1112
Sn, ppm	1.00 (2153) +0.53/−0.35	1.62 (859) +1.50/−0.78	1.50 (506) +2.91/−0.99	9.36 (794) +175.0/−8.89	8.59 (1221) +14.68/−5.42	0.84 (116) +0.68/−0.37	1.86 (5649) +4.76/−1.34	31.42 (839) +250.2/−27.92
Sb, ppm	0.03 (1368) +0.05/−0.02	0.06 (495) +0.05/−0.03	0.80 (642) +17.12/−0.77	24.28 (418) +784.3/−23.55	0.54 (278) +0.41/−0.23	0.03 (59) +0.06/−0.02	0.18 (3263) +1.30/−0.15	14.20 (2370) +64.32/−11.63
I, ppb	16.19 (41) +76.96/−13.38	63.13 (19) +27.01/−18.92	185.0 (13) +271.3/−110.0	—	—	28.16 (127) +170.09/−24.16	33.38 (202) 159.62/−27.61	3774 (199) +11722/−2855
Cs, ppm	0.03 (3494) +0.08/−0.02	0.41 (1812) +1.16/−0.30	1.28 (3308) +6.33/−1.06	3.68 (2831) +10.34/−2.71	7.87 (4865) +19.86/−5.63	0.30 (475) +1.26/−0.24	1.34 (16880) +16.85/−1.24	31.34 (6225) +206.7/−27.21
Ba, ppm	19.87 (6114) +51.12/−14.31	92.61 (6860) +256.74/−68.06	397.7 (7015) +956.8/−280.9	418.3 (2185) +883.8/−283.9	116.8 (3052) +2453/−111.5	87.54 (909) +226.8/−63.16	153.0 (35251) +998.4/−132.7	48.56 (4547) +944.7/−46.18

Таблица 2. Окончание

Элемент	Магматические расплавы							Природные флюиды
	I*	II	III	IV	V	VI	Σ**	
La, ppm	3.73 (7008) +4.15/−1.96	10.90 (6400) +24.79/−7.57	12.75 (6818) +23.35/−8.25	17.13 (3813) +19.66/−9.15	54.88 (8328) +81.83/−32.85	5.30 (825) +6.38/−2.90	14.35 (33479) +46.16/−10.95	12.64 (520) +100.4/−11.23
Ce, ppm	10.95 (7108) +9.99/−5.22	27.95 (6431) +60.80/−19.15	30.32 (6831) +48.70/−18.69	35.13 (3833) +36.98/−18.01	100.98 (9037) +145.24/−59.57	13.70 (777) +14.70/−7.09	32.92 (34356) +88.33/−23.98	7.26 (722) +42.30/−6.20
Pr, ppm	1.59 (4929) +0.93/−0.59	3.71 (4697) +4.87/−2.11	2.79 (4489) +3.58/−1.57	3.91 (2107) +3.29/−1.79	12.06 (6270) +12.51/−6.14	1.87 (575) +1.51/−0.84	3.57 (23194) +6.56/−2.31	0.37 (113) +1.51/−0.30
Nd, ppm	9.47 (6969) +6.01/−3.68	19.40 (6221) +28.87/−11.60	14.82 (5872) +18.59/−8.25	16.86 (3240) +12.98/−7.34	42.94 (7971) +52.80/−23.68	10.23 (848) +6.90/−4.12	17.35 (31340) +28.40/−10.77	1.16 (188) +4.14/−0.90
Sm, ppm	3.14 (7143) +1.55/−1.04	5.13 (63.10) +5.03/−2.54	3.07 (5931) +2.61/−1.41	3.67 (3226) +2.51/−1.49	8.84 (7848) +9.62/−4.61	3.02 (864) +1.66/−1.07	4.19 (31540) +4.61/−2.20	0.41 (124) +1.74/−0.33
Ta, ppm	0.30 (4747) +0.47/−0.18	1.09 (3545) +1.90/−0.70	0.54 (4515) +1.16/−0.37	0.51 (2347) +0.80/−0.31	2.59 (6269) +2.90/−1.37	0.10 (619) +0.16/−0.06	0.90 (22196) +3.24/−0.71	0.42 (177) +4.15/−0.38
W, ppm	0.05 (2200) +0.14/−0.04	0.29 (840) +0.35/−0.16	0.85 (1177) +4.18/−0.71	3.13 (568) +32.36/−2.85	3.47 (1448) +4.38/−1.94	0.08 (137) +0.09/−0.04	0.60 (6376) +4.16/−0.53	24.74 (2454) +169.2/−21.58
Au, ppb	1.52 (267) +8.57/−1.29	— —	2.76 (127) +3.36/−1.52	68.43 (38) +273.79/−54.75	19.65 (96) +376.8/−18.68	2.34 (89) +3.52/−1.40	2.81 (620) +16.90/−2.41	642 (1143) +8569/−597
Tl, ppb	12.69 (1876) +11.69/−6.09	28.36 (535) +30.84/−14.77	67.18 (226) +100.24/−40.22	637.7 (195) +363.6/−231.6	2546 (189) +4547/−1632	94.35 (102) +125.0/−53.76	19.54 (3123) +52.95/−14.27	3771 (1057) +9787/−2722
Pb, ppm	0.58 (5033) +0.36/−0.22	1.04 (4198) +1.97/−0.68	8.90 (4936) +18.79/−6.04	12.26 (3349) +19.13/−7.47	36.14 (7043) +28.85/−16.04	1.26 (783) +1.99/−0.77	3.06 (25469) +13.93/−2.51	32.53 (6006) +453.9/−30.35
Bi, ppm	0.007 (1335) +0.005/−0.003	0.015 (330) +0.010/−0.06	1.404 (431) +12.42/−1.26	5.133 (346) +24.58/−4.25	0.795 (535) +1.04/−0.45	0.019 (57) +0.02/−0.01	0.094 (3039) +1.51/−0.09	5.46 (1151) +22.04/−4.37
Th, ppm	0.34 (5657) +0.63/−0.22	1.29 (4362) +3.69/−0.96	2.18 (5916) +9.89/−1.79	4.31 (3708) +11.42/−3.13	22.28 (8061) +21.81/−11.02	0.69 (805) +1.19/−0.43	1.88 (28676) +11.56/−1.61	1.17 (367) +13.66/−1.08
U, ppm	0.09 (5518) +0.14/−0.06	0.72 (4480) +2.09/−0.53	1.24 (5531) +4.26/−0.96	1.66 (3289) +2.96/−1.06	6.42 (7702) +4.77/−2.74	0.30 (735) +0.60/−0.20	1.34 (27406) +8.13/−1.15	2.60 (881) +16.81/−2.26
Th/U	3.0 (5398) +0.8/−0.6	3.4 (3788) +0.7/−0.6	2.5 (5514) +1.8/−1.1	2.6 (3271) +1.2/−0.8	3.3 (7501) +1.2/−0.9	2.4 (704) +1.5/−0.9	3.0 (26327) +1.3/−0.9	1.3 (306) +7.2/−1.1
Cl/Br	37 (91) +26/−15	28 (19) +6/−5	26 (37) +14/−9	68 (171) +67/−34	31 (15) +13/−9	36 (127) +8/−7	42 (460) +42/−21	130 (2932) +334/−94

* Здесь и табл. 3 – главные геохимические обстановки (I – океанические хребты, II – океанические острова, III – островные дуги, IV – активные континентальные окраины, V – континентальные рифты и горячие точки, VI – задуговые бассейны); ** все обстановки Земли. Содержание элементов рассчитывалось как среднее гео-метрическое при условии, что с вероятностью 95% величина отдельного определения не отклоняется от среднего значения более, чем на 2σ; под средним содержанием дано отклонение (первая цифра – плюс к среднему, вторая цифра – минус от среднего). В скобках – количество определений.

Таблица 3. Концентрация летучих, редких и рудных элементов в магматических силикатных расплавах ($\text{SiO}_2 \geq 40$ мас. %) островных дуг (III), активных континентальных окраин (IV), континентальных рифтов и горячих точек (V) по данным изучения включений в минералах и закалочных стекол вулканических пород

Элемент	III		IV		V	
	$\text{SiO}_2 =$ = 40–54 мас. %	$\text{SiO}_2 >$ > 66 мас. %	$\text{SiO}_2 =$ = 40–54 мас. %	$\text{SiO}_2 > 66$ мас. %	$\text{SiO}_2 =$ = 40–54 мас. %	$\text{SiO}_2 >$ > 66 мас. %
Li, ppm	5.65 (1231) +3.77/–2.26	36.4 (2754) +38.5/–18.7	8.22 (694) +6.51/–3.63	29.0 (1911) +39.7/–16.8	9.52 (598) +17.42/–6.16	54.5 (4690) +65.0/–29.6
Be, ppm	0.53 (467) +0.23/–0.16	1.64 (786) +12.69/–5.17	0.68 (94) +0.70/–0.34	2.20 (644) +1.81/–0.99	2.43 (325) +4.68/–1.60	8.73 (966) +12.69/–5.17
B, ppm	13.06 (916) +9.29/–5.43	33.6 (2288) +45.2/–19.3	6.30 (916) +11.92/–4.12	45.9 (1502) +70.4/–27.8	10.5 (420) +34.1/–8.0	29.4 (2522) +47.5/–18.2
F, ppm	360 (1761) +570/–220	110 (9378) +1380/–100	700 (1158) +640/–330	600 (1622) +1990/–460	1400 (2169) +3960/–1030	3160 (3307) +7250/–2200
S, ppm	850 (4058) +2370/–630	60 (11699) +200/–50	1050 (3843) +1570/–630	50 (2097) +200/–40	950 (4564) +1820/–630	150 (955) +330/–100
Cl, ppm	820 (4665) +810/–410	1360 (16430) +940/–560	740 (3996) +850/–400	1120 (3609) +1420/–630	1210 (4560) +3840/–920	1910 (4082) +2660/–1110
Sc, ppm	36.5 (757) +12.6/–9.4	8.33 (1913) +9.84/–4.51	30.0 (747) +12.3/–8.7	4.55 (1031) +3.70/–2.04	30.7 (787) +16.7/–10.8	4.59 (1938) +4.22/–2.20
V, ppm	293 (923) +98/–73	7.70 (1562) +21.12/–5.64	236 (862) +66/–52	5.81 (722) +16.82/–4.32	274 (855) +163/–102	1.56 (1602) +4.41/–1.55
Cr, ppm	130 (1112) +556/–105	2.58 (681) +4.26/–1.61	93.6 (407) +149.0/–57.5	4.91 (174) +17.16/–3.81	395 (1252) +1350/–306	2.94 (793) +5.69/–1.94
Co, ppm	33.7 (487) +10.5/–8.0	1.61 (594) +3.15/–1.07	36.0 (388) +20.7/–13.1	1.22 (582) +1.81/–0.73	41.4 (333) +33.2/–18.4	1.57 (316) +4.88/–1.19
Ni, ppm	41.1 (687) +88.9/–28.1	1.16 (527) +1.44/–0.64	37.6 (463) +92.2/–26.7	4.55 (148) +9.09/–3.03	238 (1004) +740/–180	1.56 (743) +3.93/–1.12
Cu, ppm	91.6 (648) +58.5/–35.7	6.17 (1448) +26.17/–4.99	105 (375) +132/–58	22.1 (1335) +143.0/–19.2	124 (464) +297/–88	5.29 (1243) +21.60/–4.25
Zn, ppm	79.9 (592) +26.0/–19.6	36.1 (1377) +38.2/–18.5	105.4 (259) +39.6/–28.8	41.6 (1199) +35.0/–19.0	104.4 (298) +55.9/–36.4	80.3 (3059) +103.4/–45.2
Ga, ppm	16.64 (241) +3.51/–2.90	15.74 (508) +3.85/–3.09	23.36 (146) +5.59/–4.51	27.88 (506) +34.88/–15.50	20.26 (157) +7.10/–5.26	25.52 (2538) +7.91/–6.04
Ge, ppm	1.69 (51) +0.18/–0.16	1.75 (18) +0.17/–0.16	— —	1.71 (38) +0.22/–0.20	1.76 (23) +0.94/–0.61	1.89 (86) +0.27/–0.24
As, ppm	1.09 (295) +1.70/–0.66	6.95 (1185) +12.39/–4.45	23.8 (13) +2280/–23.5	130.6 (428) +2980/–125.1	1.41 (20) +1.82/–0.80	6.21 (390) +14.55/–4.35
Rb, ppm	6.93 (1094) +13.45/–4.57	110 (3775) +130/–60	12.77 (1110) +24.65/–8.41	129 (2949) +146/–68	31.22 (1321) +92.40/–23.33	207 (5959) +137/–83
Sr, ppm	299 (1628) +347/–160	83.5 (3743) +146.1/–53.1	496 (1254) +352/–206	106.6 (2609) +314.0/–79.6	562 (2077) +854/–339	4.78 (5676) +13.02/–3.50
Y, ppm	18.62 (1766) +8.80/–5.98	24.68 (3396) +21.40/–11.46	19.16 (1211) +8.92/–6.08	17.04 (2091) +17.92/–8.73	25.73 (1835) +12.95/–8.61	57.68 (5750) +92.48/–35.52
Zr, ppm	55.1 (1751) +61.0/–29.0	121.7 (3736) +105.9/–56.6	91.1 (1266) +68.7/–39.1	127.3 (2304) +156.6/–70.2	179.2 (2007) +212.0/–97.1	173.8 (5892) +299.8/–110.0
Nb, ppm	1.26 (1743) +1.70/–0.72	7.99 (3734) +11.90/–4.78	4.52 (1201) +8.49/–2.95	10.40 (2175) +12.53/–5.68	26.75 (1906) +72.47/–19.54	50.04 (5823) +87.84/–31.88

Таблица 3. Окончание

Элемент	III		IV		V	
	SiO ₂ = = 40–54 мас. %	SiO ₂ > > 66 мас. %	SiO ₂ = = 40–54 мас. %	SiO ₂ > 66 мас. %	SiO ₂ = = 40–54 мас. %	SiO ₂ > > 66 мас. %
Mo, ppm	0.43 (276) +0.50/–0.23	1.95 (1223) +2.13/–1.02	0.58 (158) +0.43/–0.25	2.98 (818) +5.99/–1.99	2.31 (106) +2.23/–1.13	5.07 (2736) +2.69/–1.76
Ag, ppb	28.9 (74) +12.3/–8.6	39.7 (164) +40.6/–20.1	51.2 (123) +53.1/–26.1	174 (71) +1710/–158	– –	107.9 (221) +130.3/–58.7
Sn, ppm	0.58 (61) +0.47/–0.26	3.06 (323) +9.76/–2.33	1.12 (26) +5.03/–0.92	9.83 (726) +175.0/–9.31	2.50 (35) +5.22/–1.69	8.66 (1164) +14.40/–5.41
Cs, ppm	0.30 (689) +0.54/–0.19	6.96 (2900) +16.69/–4.91	1.18 (383) +2.40/–0.79	5.27 (1911) +13.96/–3.82	1.79 (461) +7.80/–1.46	6.96 (2900) +16.69/–4.91
Ba, ppm	160 (1791) +259/–99	617 (3806) +622/–309	260 (1273) +338/–147	668 (2476) +1334/–445	478 (2192) +1767/–376	78 (5354) +479/–67
La, ppm	4.60 (1752) +6.93/–2.76	20.0 (3719) +14.7/–8.5	10.7 (1193) +12.6/–5.8	21.8 (1813) +20.7/–10.6	30.5 (1880) +69.9/–21.2	62.4 (4795) +80.6/–35.2
Ce, ppm	12.9 (1628) +17.5/–7.4	41.9 (3799) +27.1/–16.5	25.2 (1191) +27.3/–13.1	41.4 (1822) +37.9/–19.8	62.1 (1858) +112.9/–40.0	104.8 (5545) +156.6/–62.8
Pr, ppm	1.41 (878) +1.80/–0.79	4.66 (2477) +3.14/–1.88	3.31 (922) +2.79/–1.51	4.48 (892) +3.89/–1.93	5.41 (756) +7.18/–3.09	13.03 (4032) +13.96/–6.74
Nd, ppm	9.31 (1564) +9.35/–4.67	18.47 (3016) +14.74/–8.20	15.12 (1118) +12.34/–6.79	16.99 (1392) +13.31/–7.46	30.66 (1713) +36.90/–16.74	46.11 (4670) +70.13/–27.82
Sm, ppm	2.33 (1564) +1.73/–0.99	3.89 (3066) +2.95/–1.68	3.69 (1086) +2.44/–1.47	3.38 (1475) +2.59/–1.47	6.89 (1727) +6.24/–3.27	9.79 (4536) +13.66/–5.70
Ta, ppm	0.08 (805) +0.18/–0.06	0.78 (2634) +1.02/–0.44	0.35 (820) +0.53/–0.21	0.73 (1177) +0.91/–0.41	1.54 (758) +2.22/–0.91	3.68 (3999) +4.29/–1.98
W, ppm	0.11 (203) +0.18/–0.07	2.11 (768) +5.66/–1.54	0.22 (135) +0.20/–0.10	32.01 (371) +91.29/–23.70	0.89 (38) +0.95/–0.46	3.65 (1388) +4.44/–2.00
Au, ppb	2.29 (49) +1.63/–0.95	– –	– –	68.4 (38) +273.8/–54.7	143.3 (47) +250.5/–91.1	2.20 (42) +10.36/–1.81
Tl, ppb	43.4 (85) +35.0/–19.7	332 (62) +898/–242	77.4 (17) +60.6/–34.0	648 (169) +288/–199	73.5 (21) +153.7/–49.7	3028 (168) +2888/–1478
Pb, ppm	1.73 (1171) +1.99/–0.93	15.17 (2777) +9.05/–5.67	4.10 (1045) +4.22/–2.08	18.49 (1803) +12.47/–7.45	3.39 (769) +6.26/–2.20	36.04 (4817) +17.40/–11.73
Bi, ppm	0.02 (65) +0.01/–0.01	2.11 (307) +5.18/–1.50	5.72 (10) +18.55/–4.37	5.26 (326) +25.12/–4.35	– –	0.81 (523) +1.03/–0.45
Th, ppm	0.58 (1526) +0.81/–0.34	10.60 (3140) +13.27/–5.89	1.17 (1069) +1.10/–0.56	11.80 (1935) +14.51/–6.51	2.60 (1116) +5.90/–1.81	25.01 (5374) +16.44/–9.92
U, ppm	0.27 (1294) +0.44/–0.17	2.60 (3063) +2.57/–1.29	0.65 (979) +0.62/–0.32	3.99 (1892) +3.77/–1.94	1.09 (943) +2.42/–0.75	7.56 (5212) +4.02/–2.62

Примечания. В скобках указано количество определений.

расплавов часто связывают с их обогащенностью серой и другими летучими, большой интерес представляют сведения о концентрациях S, B, F, Cl. Статистическая информация (табл. 2) показывает, что наиболее обогащены серой магматические расплавы океанических хребтов (среднее значение

для S – 1070 ppm) и задуговых бассейнов (820 ppm), а наименьшие концентрации (100 ppm) характерны для магм островных дуг. В магматических расплавах островных дуг, континентальных окраин и внутриконтинентальных обстановок в наибольшей степени концентрируется бор (25.6–32.6 ppm),

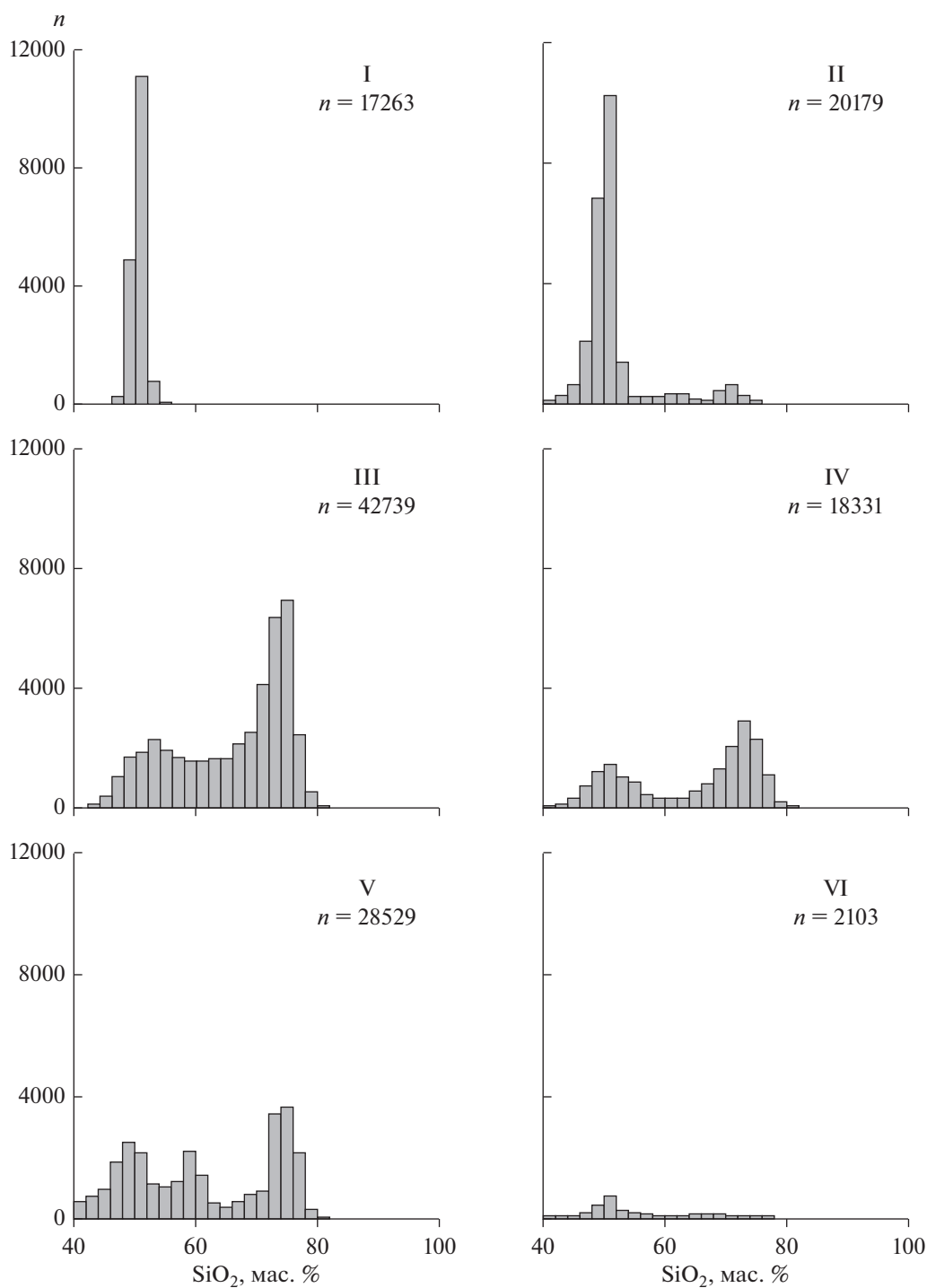


Рис. 3. Гистограммы распределения содержаний SiO_2 в магматических расплавах главных геодинамических обстановок (I–VI) по данным изучения гомогенных расплавных включений в минералах и закалочных стекол пород. n – количество определений; I – срединно-океанические хребты, II – океанические острова, III – островные дуги, IV – активные континентальные окраины, V – внутриконтинентальные рифты и области горячих точек, VI – задуговые бассейны.

в то время как максимальные концентрации фтора и хлора наблюдаются в расплавах внутриконтинентальных областей (средние значения для F – 2440 ppm и Cl – 2220 ppm).

Вероятное влияние переноса элементов в расплавленном виде во флюидной фазе иллюстрируется на диаграмме средних нормализованных содержаний элементов в расплавах в зависимости

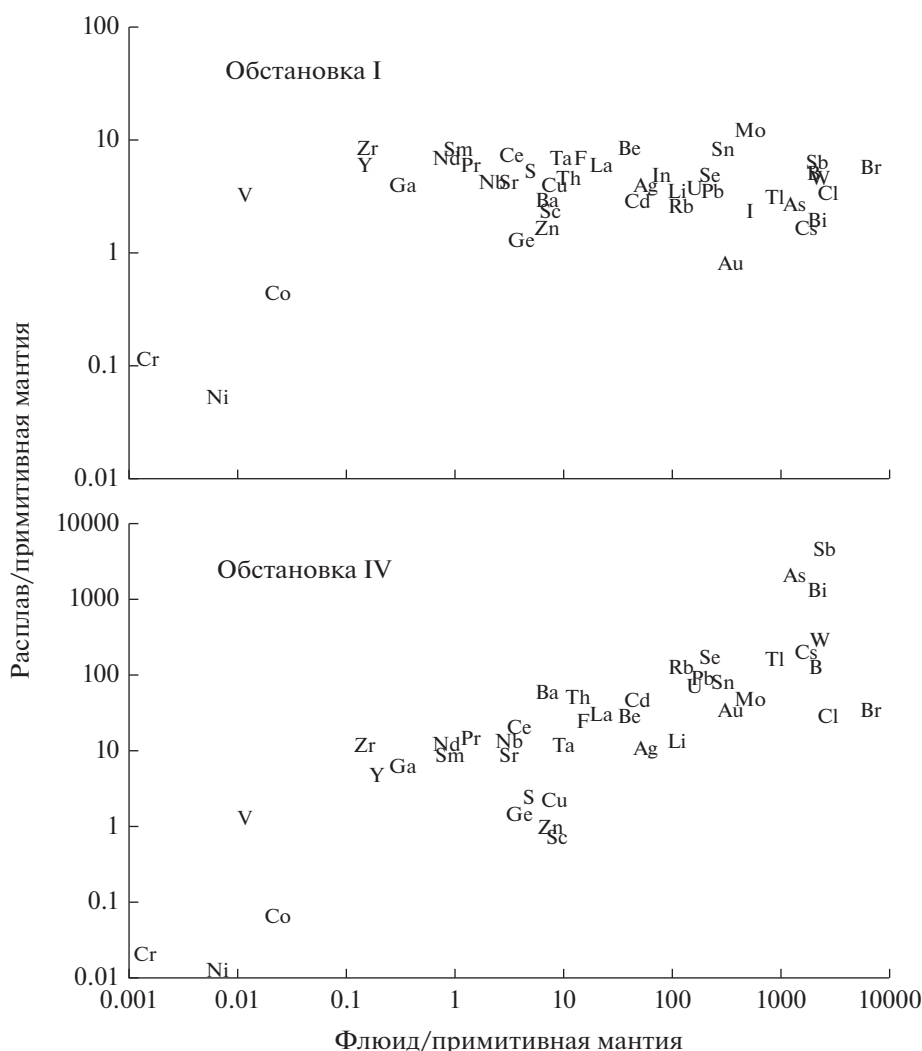


Рис. 4. Ковариации средних содержаний рудных элементов в расплавах и флюидах обстановок I и IV. Диаграмма показывает заметное увеличение корреляции при переходе от обстановок, связанных с плавлением обедненной мантии, к обстановкам, в которых значительную роль играют процессы рециклинга корового материала.

от средних содержаний во флюидных включениях (рис. 4). На рис. 4 показаны данные для обстановок I и IV, как наиболее показательные. Эти диаграммы можно рассматривать только качественно, поскольку влияние флюидов всегда сочетается с эффектами плавления и кристаллизации, а содержания элементов в растворах и расплавах также связаны значимой положительной корреляцией. Нормализованные содержания элементов во флюидах характеризуются значительными вариациями, и средние концентрации ряда элементов превышают значения для примитивной мантии на 2–4 порядка. Очевидно, что содержания этих элементов в расплавах могут значительно увеличиваться за счет флюидного переноса. Для расплавов срединно-океанических хребтов такого влияния не наблюдается — нормализованные содержания элементов с высокими и умеренными концен-

трациями во флюидах не различаются. В отличие от обстановки I, расплавы обстановки IV заметно обогащены элементами, для которых установлены высокие нормализованные концентрации во флюидах. Таким образом, отсутствие корреляции на рис. 4 для обстановки I и значимая корреляция для обстановки IV может рассматриваться в качестве свидетельства заметной роли флюидного переноса элементов в обстановках, связанных с субдукционными и коллизионными процессами.

Как уже упоминалось выше, для островных дуг (III), активных континентальных окраин (IV) и внутриконтинентальных рифтов и областей горячих точек (V) характерен бимодальный тип распределения содержаний SiO_2 . Поэтому для этих обстановок были рассчитаны средние содержания элементов (и доверительные интервалы) для двух интервалов SiO_2 : 40–54 мас. % и более 66 мас. %. Для

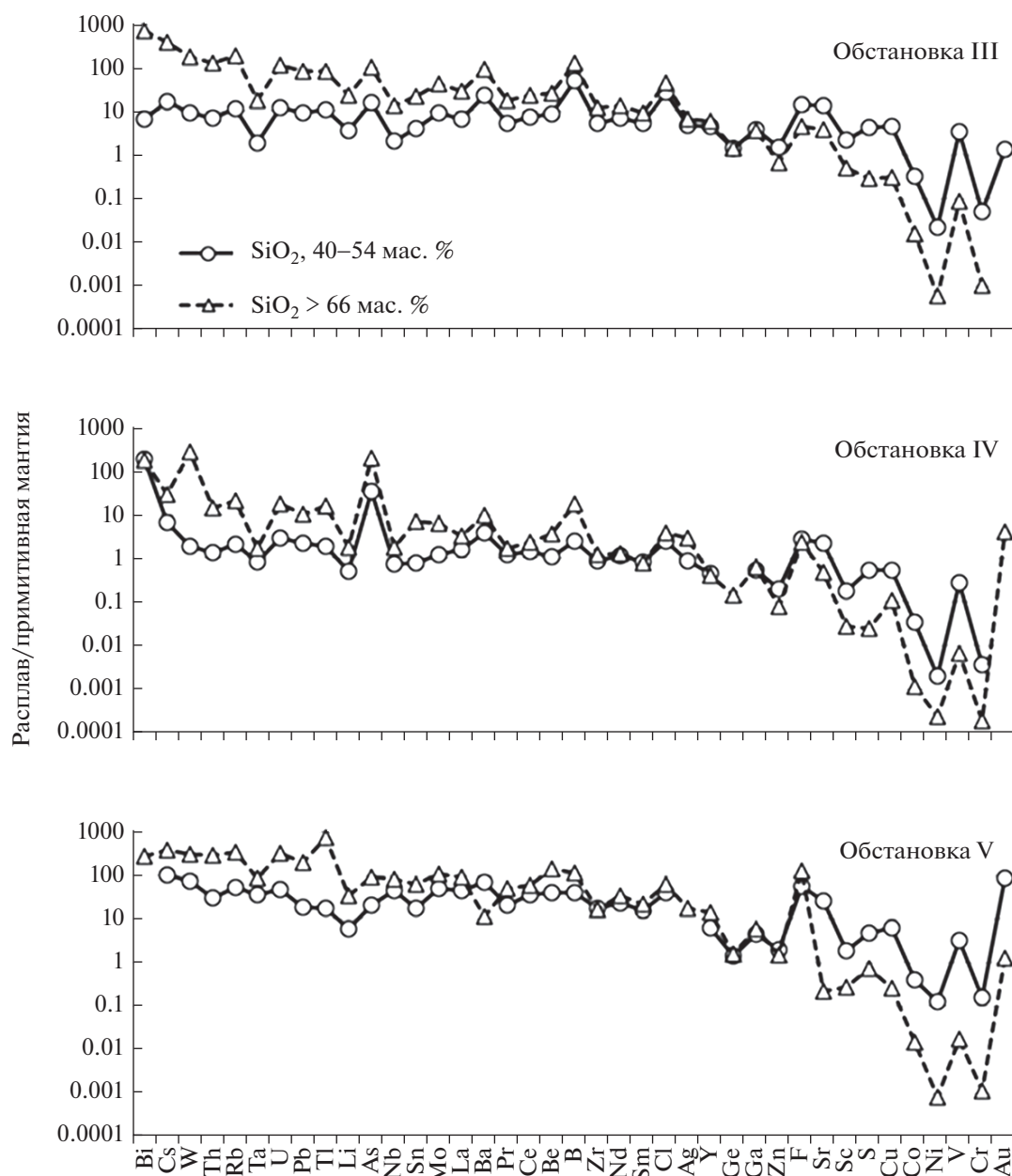


Рис. 5. Нормализованные к примитивной мантии средние составы основных и кислых расплавов из геодинамических обстановок III, IV и V.

сравнения составов основных и кислых расплавов (табл. 3) были построены спайдер-диаграммы (рис. 5), на которых элементы расположены в порядке убывания отношений $C_{\text{кислые}}/C_{\text{основные}}$ в обстановке III. Такой порядок примерно соответствует увеличению степени совместимости элементов в основных породообразующих силикатах (оливин, пироксен, плагиоклаз, гранат). В левой части диграммы расположены наиболее несовместимые элементы, для которых наблюдается значительное обогащение кислых расплавов относительно основных, особенно в обстановке III. В

средней части графика между Zr и Zn содержания элементов в кислых и основных расплавах практически одинаковы. Для более совместимых элементов (от Sr до Cr) наблюдается обеднение кислых расплавов относительно основных во всех обстановках.

При этом во всех обстановках спектры кислых и основных расплавов подобны, положение и относительные величины положительных и отрицательных аномалий повторяются. Так, составы обстановки III характеризуются локальными минимумами Ta и Nb и максимумами Ba, В и Cl. В

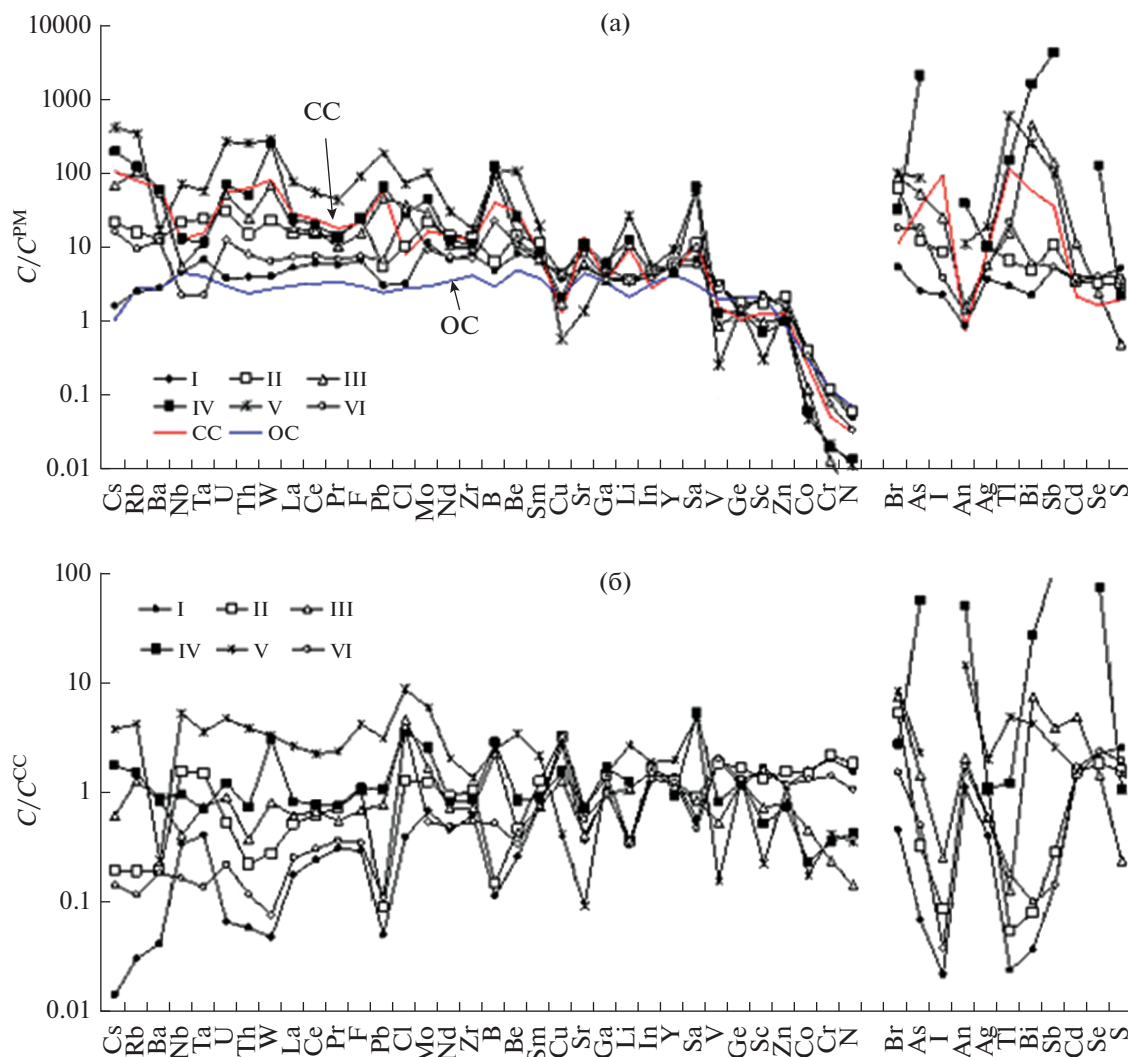


Рис. 6. Средние содержания элементов, нормализованные к составу (а) примитивной мантии (PM; Palme, O'Neill, 2014) и (б) среднему составу континентальной коры (CC; Rudnick, Gao, 2014), в расплавах разных геодинамических обстановок (I–VI), а также в валовом составе океанической (OC; White, Klein, 2014) и континентальной коры. Порядок расположения элементов в ряду от Cs до Ni соответствует увеличению валового коэффициента распределения элементов между модельным мантийным материалом и расплавом, определенном на основании обобщения опубликованных экспериментальных данных. Для элементов в правой части диаграммы (от Br до S) соответствующие экспериментальные данные отсутствуют или слишком фрагментарны.

обстановке IV проявлен пик As, как в основных, так и в кислых расплавах. Такое сходство спектров свидетельствует о генетическом родстве кислых и основных расплавов. Учитывая, что мы имеем дело со средними концентрациями, вероятны разные механизмы образования наблюдаемых связей. В качестве возможных вариантов можно рассматривать образование кислых расплавов в ходе дифференциации основных, либо участие основных пород, как источников вещества, при образовании кислых.

На рис. 6 показаны также средние содержания элементов в валовой океанической (White, Klein, 2014) и континентальной коре (Rudnick, Gao,

2014). Концентрации элементов в океанической коре почти полностью соответствуют среднему составу расплавов срединно-океанических хребтов (обстановка I). Это согласуется с образованием океанической коры за счет плавления мантийного резервуара, в котором доминирует обедненное вещество (на диаграмме отчетливо проявлено обеднение наиболее несовместимыми элементами – Cs, Rb, Ba, La, Th). Некоторое обогащение составов расплавов по сравнению с составом коры в отношении несовместимых элементов является следствием того, что большая часть стекол включений и пород представляют собой расплавы, образующиеся в коре в ходе кристаллизационной дифференциации. Очевидно,

этот процесс не сказывается на валовом составе коры, но смещает средний состав расплавов.

Средний состав континентальной коры схож с составом расплавов из обстановок континентальных окраин (III и IV). Это демонстрирует диаграмма составов расплавов, нормализованная к составу валовой континентальной коры по данным (Rudnick, Gao, 2014) (рис. 66). На этой диаграмме содержания большинства элементов в расплавах этих обстановок близки к 1, что означает, что магомобразование на границах континентальных и океанических плит является, вероятно, главным механизмом образования континентальной коры. В обеих обстановках наблюдается положительные аномалии летучих компонентов — Cl и B, что может быть связано с удалением этих элементов из коры в океан. Происхождение пиков W, Mo и Sn не очевидно. Эти пики характерны только для обстановки IV и могут быть связаны с большой долей составов расплавов, связанных с месторождениями данных металлов в нашей выборке. Обращает на себя внимание также обеднение расплавов Co, Cr и Ni по сравнению с валовым составом коры. Такое обеднение может быть результатом раннего отделения сульфидов (Ni и Co) и оксидов (Cr) при кристаллизации расплавов. Расплавы, захватывающиеся кристаллизующимися силикатами оказываются обедненными этими элементами, в то время как составы пород соответствуют составам исходных расплавов, в которых обеднение этими элементами отсутствовало.

Непреодолимый интерес к связи разнотипных рудных месторождений и магматических пород, с которыми они ассоциируют, с геотектоническими обстановками, в которых они образовались, вызван, прежде всего, тем, что выявление таких связей позволяет определить важные критерии для прогноза и поисков промышленной минерализации и сузить конкретные задачи и территории проведения работ.

Одним из критериев может служить степень относительной обогащенности магматических расплавов теми или иными рудными элементами. С целью ее оценки в каждой из рассматриваемых здесь геодинамических обстановок, по данным табл. 2 были рассчитаны коэффициенты концентрации (Кк), которые мы определяем как отношение среднего содержания элемента в обстановке к среднему содержанию элемента по всем обстановкам (Σ в табл. 2). Полученные коэффициенты Кк приведены в табл. 4. При этом из рассмотрения исключены Ga, Ge, Cd, In, Tl и Se, которые, как правило, не образуют в Земной коре крупных самостоятельных скоплений и обычно рассеяны в минералах месторождений.

Ранее нами (Наумов и др., 2016) 24 элемента были разбиты на группы (ассоциации), характеризующиеся существенным обогащением ($K_k > 2$),

умеренным обогащением ($K_k 1-2$) или обеднением ($K_k < 1$). Эти группы обладают сходным поведением в различных геодинамических обстановках и могут рассматриваться как индикаторы потенциальной продуктивности. Было показано, что магматические расплавы щелочно-базальтового состава океанических хребтов и островов (обстановки I и II) и магмы задуговых бассейнов (обстановка VI) характеризуются относительным обогащением ($K_k = 1-2$) соответственно V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn и V, Cr, Cu и Zn, и в тоже время обеднением ($K_k < 1$) Pb, Bi, Au, Ag, Mo, W, Sn, Sb, As, Ta, Nb, Th и U. Кроме того, в обстановке II к числу обогащенных элементов добавляются Mo, Sn, Ta и Nb, а в задуговых обстановках — Au и Ag. В то же время, для островодужных магматических расплавов (обстановка III) характерно обогащение ($K_k = 1-2$) Au, Ag, As, W, U и, особенно, Pb, обеднение ($K_k < 1$) V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Bi, Mo, Sn, Sb, Ta, Nb и Th. Магматические расплавы активных континентальных окраин (IV) и, особенно, внутриконтинентальных обстановок (V) значительно ($K_k > 2$) обогащены такими элементами как Pb, Bi, Au, Ag, Mo, W, Sn, Sb, As, Ta, Nb, Th и U, но обеднены V, Cr, Co, Ni, Cu и Zn.

Более представительные (35 элементов) данные (табл. 4), которые обсуждаются в этой статье, в целом согласуются с полученными ранее сведениями, но существенно дополняют и уточняют их. Прежде всего, дополнения касаются поведения ряда летучих и редких элементов, которые ранее не были включены в массив обсуждаемых данных. Среди них особое значение имеет сера, которой в наибольшей степени обогащены магматические расплавы океанических хребтов (I) и задуговых бассейнов (VI), Кк соответственно 2.8 и 2.2, менее значительно ($K_k 1.2-1.7$) — обстановок II и IV. Обращает на себя внимание резкое ($K_k 0.3$) обеднение серой островодужных (III) магм, что требует дополнительного обсуждения. Контрастно, по отношению к сере, ведет себя другие летучие компоненты — B, F и Cl. Характерно обогащение бором магматических расплавов из островодужной ($K_k 1.6$), окраинноконтинентальной ($K_k 2.1$) и внутриконтинентальной ($K_k 1.8$) обстановок и резкое понижение ($K_k 0.1-0.4$) его концентраций в магмах других обстановок. Фтором резко обогащены ($K_k 4.5$) магмы во внутриконтинентальной (V) обстановке, слабо ($K_k 1.1-1.2$) — в обстановках океанических островов (II) и островных дуг (III), при отчетливом спаде ($K_k 0.3-0.4$) его концентраций в магмах других обстановок I, III и IV. Неординарное поведение показывает Cl: максимальное его концентрирование, как и для фтора, установлено в магматических расплавах ($K_k 2.3$) внутриконтинентальной обстановки (V) и значительное обеднение ($K_k 0.1-0.3$) — в магмах океанических хребтов (I) и островов (II).

Таблица 4. Коэффициенты концентрации (Кк) летучих, редких и рудных элементов в магматических расплавах главных геодинамических обстановок Земли

Элемент	Геодинамическая обстановка					
	I	II	III	IV	V	VI
Li	0.3	0.4	1.1	1.3	2.8	<i>0.4</i>
Be	<i>0.6</i>	1.1	1.0	1.9	7.9	<i>0.8</i>
B	<i>0.1</i>	<i>0.1</i>	1.6	2.1	1.8	<i>0.4</i>
F	<i>0.3</i>	1.1	<i>0.7</i>	1.2	4.5	<i>0.4</i>
S	2.8	1.7	<i>0.3</i>	1.2	1.7	2.2
Cl	<i>0.1</i>	<i>0.3</i>	1.2	<i>0.9</i>	2.3	1.0
Sc	1.8	1.4	<i>0.8</i>	<i>0.6</i>	<i>0.2</i>	1.7
V	1.7	1.6	<i>0.5</i>	<i>0.7</i>	<i>0.1</i>	1.7
Cr	1.4	1.5	<i>0.2</i>	<i>0.3</i>	<i>0.3</i>	1.0
Co	1.5	1.4	<i>0.4</i>	<i>0.2</i>	<i>0.2</i>	1.2
Ni	1.4	1.6	<i>0.1</i>	<i>0.4</i>	<i>0.3</i>	<i>0.9</i>
Cu	1.3	1.5	<i>0.5</i>	<i>0.7</i>	<i>0.2</i>	1.5
Zn	1.1	1.4	<i>0.7</i>	<i>0.7</i>	1.0	1.1
As	<i>0.1</i>	<i>0.5</i>	2.2	85	3.5	<i>0.8</i>
Br	<i>0.2</i>	2.7	3.9	1.4	4.4	0.8
Rb	<i>0.04</i>	<i>0.2</i>	1.6	1.9	5.3	<i>0.2</i>
Sr	<i>0.8</i>	1.5	<i>0.9</i>	1.5	<i>0.2</i>	1.2
Y	1.1	1.0	<i>0.9</i>	<i>0.7</i>	1.6	1.0
Zr	<i>0.7</i>	1.1	<i>0.8</i>	<i>0.9</i>	1.5	<i>0.6</i>
Nb	<i>0.3</i>	1.4	<i>0.4</i>	<i>0.9</i>	4.7	<i>0.2</i>
Mo	<i>0.4</i>	<i>0.7</i>	<i>0.8</i>	1.4	3.2	<i>0.3</i>
Ag	<i>0.7</i>	2.0	1.1	2.0	3.7	1.1
Sn	<i>0.5</i>	<i>0.9</i>	<i>0.8</i>	5.0	4.6	<i>0.5</i>
Sb	<i>0.2</i>	<i>0.3</i>	4.4	135	3.0	<i>0.2</i>
Cs	<i>0.02</i>	<i>0.3</i>	1.0	2.8	5.9	<i>0.2</i>
Ba	<i>0.1</i>	<i>0.6</i>	2.6	2.7	<i>0.8</i>	<i>0.6</i>
La	<i>0.3</i>	<i>0.8</i>	<i>0.9</i>	1.2	3.8	<i>0.4</i>
Ce	<i>0.3</i>	<i>0.9</i>	<i>0.9</i>	1.1	3.1	<i>0.4</i>
Ta	<i>0.3</i>	1.2	<i>0.6</i>	<i>0.6</i>	2.9	<i>0.1</i>
W	<i>0.1</i>	<i>0.5</i>	1.4	5.2	5.8	<i>0.1</i>
Au	<i>0.5</i>	—	1.0	24	7.0	<i>0.8</i>
Pb	<i>0.2</i>	<i>0.3</i>	2.9	4.0	12	<i>0.4</i>
Bi	<i>0.1</i>	<i>0.2</i>	15	55	8.5	<i>0.2</i>
Th	<i>0.2</i>	<i>0.7</i>	1.2	2.3	12	<i>0.4</i>
U	<i>0.1</i>	<i>0.5</i>	<i>0.9</i>	1.2	4.8	<i>0.2</i>

Примечания. Прямым шрифтом выделены значения с относительно слабым обогащением ($K_k = 1-2$), жирным шрифтом — значения с существенным обогащением ($K_k > 2$), курсивом — значения с относительным обеднением ($K_k < 1$).

Табл. 4 наглядно выявляет разное поведение элементов в геодинамических обстановках в зависимости от доминирующего типа коры и литосферы. Так, значения K_k для большинства элементов в расплавах из обстановок, связанных с

океаническими областями (I, II, III, VI), близки и характеризуются умеренным обеднением или обогащением. Расплавы из континентальных рифтов и горячих точек резко обогащены сильно несовместимыми элементами, причем для многих элементов значения $K_k > 5$ (Be, Rb, Cs, W, Au, Pb, Bi, Th). Очень интересны данные по обстановке активных континентальных окраин (IV), где должно быть максимально проявлено взаимодействие океанической и континентальной литосферы. Действительно, для многих элементов, концентрации которых в океанических и континентальных расплавах существенно различаются, наблюдаются промежуточные значения K_k (Li, Be, Rb, Mo, La, Pb). При этом наблюдается экстремальное обогащение в отношении ряда халькофильных элементов — As ($K_k = 85$), Sb (135), Au (24), Bi (55). Нужно отметить, что для этих элементов имеются сотни определений в разных комплексах, так что подобное отклонение вряд ли является случайным и, вероятно, отражает специфические условия формирования и эволюции расплавов в этой обстановке.

Обсуждение причин различного поведения элементов в разных геодинамических обстановках выходит за рамки данной статьи. Но мы надеемся, что обсуждаемые здесь материалы (табл. 2–4) окажутся полезными для специалистов, работающих в области геохимии, петрологии, рудной геологии и металлогении.

Авторы благодарны О.А. Луканину и Н.Л. Мионову за конструктивную критику и ценные советы.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Волков А.В., Сидоров А.А., Старостин В.И. (2014) *Металлогения вулканогенных поясов и зон активизации*. М.: МАКС Пресс, 356 с.
- Коваленкер В.А. (2004) *Рудообразующие системы эпitherмальных золото-серебряных месторождений: концепции, реальность, модели. Проблемы рудной геологии, петрологии, минералогии и геохимии*. М.: ИГЕМ РАН, 160–183.
- Коваленкер В.А., Киселева Г.Д., Крылова Т.Л., Андреева О.В. (2011) Минералогия и условия образования золотоносного W–Mo — порфирового Бутдаинского месторождения, Восточное Забайкалье, Россия. *Геология рудных месторождений*. **53**, 107–142.
- Коваленкер В.А., Абрамов С.С., Киселева Г.Д., Крылова Т.Л., Языкова Ю.И., Бортников Н.С. (2016) Крупное Cu–Au–Fe Быстринское месторождение (Восточное Забайкалье) — первый в России пример ассоциированной с адакитами скарново-порфировой рудообразующей системы. *ДАН*. **488**(5), 547–552.
- Наумов В.Б., Коваленко В.И., Дорофеева В.А., Ярмолюк В.В. (2004) Средние содержания петрогенных, летучих и редких элементов в магматических расплавах

- различных геодинамических обстановок. *Геохимия*. (10), 1113–1124.
- Naumov V.B., Kovalenko V.I., Dorofeeva V.A., Yarmolyuk V.V. (2004) Average concentrations of major, volatile, and trace elements in magmas of various geodynamic settings. *Geochem. Int.* **42**(10), 977–987.
- Наумов В.Б., Коваленко В.И., Дорофеева В.А., Гирнис А.В., Ярмолук В.В. (2010) Средний состав магматических расплавов главных геодинамических обстановок по данным изучения расплавных включений в минералах и закалочных стекол пород. *Геохимия*. (12), 1266–1288. Naumov V.B., Kovalenko V.I., Dorofeeva V.A., Girnis A.V., Yarmolyuk V.V. (2010) Average compositions of igneous melts from main geodynamic settings according to the investigation of melt inclusions in minerals and quenched glasses of rocks. *Geochem. Int.* **48**(12), 1185–1207.
- Наумов В.Б., Коваленкер В.А., Прокофьев В.Ю., Толстых М.Л., Дамиан Г., Дамиан Ф. (2013) Необычные кислые расплавы в районе уникального месторождения золота Рошия Монтана (Горы Апусени, Румыния) по данным изучения включений в кварце. *Геохимия*. (11), 973–986.
- Naumov V.B., Kovalenker V.A., Prokofiev V.Yu., Tolstykh M.L., Damian G., Damian F. (2013) Unusual acid melts in the area of the unique Rosia Montana gold deposit Apuseni Mountains, Romania: Evidence from inclusions in quartz. *Geochem. Int.* **51**(11), 876–888.
- Наумов В.Б., Гирнис А.В., Дорофеева В.А., Коваленкер В.А. (2016) Концентрация рудных элементов в магматических расплавах и природных флюидах по данным изучения включений в минералах. *Геология рудных месторождений*. **58**, 367–384.
- Наумов В.Б., Дорофеева В.А., Гирнис А.В., Ярмолук В.В. (2017) Среднее содержание летучих компонентов, петрогенных и редких элементов в магматических расплавах главных геодинамических обстановок Земли. I. Расплавы основного состава. *Геохимия*. (7), 618–643. Naumov V.B., Dorofeeva V.A., Girnis A.V., Yarmolyuk V.V. (2017) Mean concentrations of volatile components, major and trace elements in magmatic melts in major geodynamic environments on Earth. I. Mafic melts. *Geochem. Int.* **55**(7), 629–653.
- Наумов В.Б., Дорофеева В.А., Толстых М.Л., Гирнис А.В., Ярмолук В.В. (2020) Состав и геохимическая специфика магматических расплавов Камчатки по данным анализа расплавных включений и закалочных стекол пород. *Геохимия*. **65**(3), 237–257.
- Naumov V.B., Dorofeeva V.A., Tolstykh M.L., Girnis A.V., Yarmolyuk V.V. (2020) Composition and geochemical specifics of magmatic melts in Kamchatka: Evidence from melt inclusions and quenched glasses of rocks. *Geochem. Int.* **58**(3), 271–290.
- Прокофьев В.Ю., Калинин А.А., Лобанов К.В., Бэнкс Д.А., Боровиков А.А., Чичеров М.В. (2018) Состав рудообразующих флюидов золотой минерализации Печенгской структуры зеленокаменного пояса Печенга-Имандра-Варзуга (Кольский полуостров, Россия). *Геология рудных месторождений*. **60**, 317–341.
- Сафонов Ю.Г., Попов В.В., Волков А.В., Гонгальский Б.И. (2006) *Геодинамические-геотектонические обстановки образования крупных золоторудных концентраций*. В кн. *Крупные и суперкрупные месторождения рудных полезных ископаемых*. Т. 2. М.: ИГЕМ РАН, 97–142.
- Ancellin M.A., Samaniego P., Vlastelic I., Nauret F., Gannoun M., Hidalgo S. (2017) Across-versus along-arc Sr–Nd–Pb isotope variations in the Ecuadorian volcanic arc. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. **18**, 1163–1188.
- Audetat A. (2019) The metal content of magmatic-hydrothermal fluids and its relationship to mineralization potential. *Econ. Geol.* **114**, 1033–1056.
- Audetat A., Zhang D.H. (2019) Abundances of S, Ga, Ge, Cd, In, Tl and 32 other major to trace elements in high-temperature (350–700°C) magmatic-hydrothermal fluids. *Ore Geol. Rev.* **109**, 630–642.
- Audetat A., Zhang L., Ni H.W. (2018) Copper and Li diffusion in plagioclase, pyroxenes, olivine and apatite, and consequences for the composition of melt inclusions. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **243**, 99–115.
- Benson T.R., Coble M.A., Rytuba J.J., Mahood G.A. (2017) Lithium enrichment in intracontinental rhyolite magmas leads to Li deposit in caldera basins. *Nature Communications*. **8**, 1–9.
- Berni G.V., Heinrich C.A., Walle M., Wall V.J. (2019) Fluid geochemistry of the Serra Pelada Au–Pd–Pt deposit, Carajás, Brazil: Exceptional metal enrichment caused by deep reaching hydrothermal oxidation. *Ore Geol. Rev.* **111**, 102991.
- Berni G.V., Wagner T., Fusswinkel T. (2020) From a F-rich granite to a NYF pegmatite: Magmatic-hydrothermal fluid evolution of the Kymi topaz granite stock, SE Finland. *Lithos*. **364–365**, 105538.
- Brandl P.A., Regelous M., Beier C., O'Neill H.St.C., Nebel O., Haase K.M. (2016) The timescales of magma evolution at mid-ocean ridges. *Lithos*. **240–243**, 49–68.
- Burisch M., Walter B.F., Walle M., Markl G. (2016) Tracing fluid migration pathways in the root zone below unconformity-related hydrothermal veins: Insights from trace element systematic of individual fluid inclusions. *Chem. Geol.* **429**, 44–50.
- Catchpole H., Kouzmanov K., Putlitz B., Seo J.H., Fontbote L. (2015) Zoned base metal mineralization in a porphyry system: Origin and evolution of mineralizing fluids in the Morococha district, Peru. *Econ. Geol.* **110**, 39–71.
- Chamberlain K.J., Wilson C.J.N., Wallace P.J., Millet M.A. (2015) Micro-analytical perspectives on the Bishop Tuff and its magma chamber. *J. Petrol.* **56**, 605–640.
- Chamberlain K.J., Barclay J., Preece K., Brown R.J., Davidson J.P., EIMF (2016) Origin and evolution of silicic magmas at ocean islands: Perspectives from a zoned fall deposit on Ascension Island, South Atlantic. *J. Volcan. Geotherm. Res.* **327**, 349–360.
- Chamberlain K.J., Barclay J., Preece K.J., Brown R.J., Davidson J.P. (2019) Lower crustal heterogeneity and fractional crystallization control evolution of small-volume magma batches at ocean island volcanoes (Ascension Island, South Atlantic). *J. Petrol.* **60**, 1489–1522.
- Chang J., Li J.W., Audetat A. (2018) Formation and evolution of multistage magmatic-hydrothermal fluids at the Yulong porphyry Cu–Mo deposit, eastern Tibet: Insights from LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **232**, 181–205.
- Chi G.X., Chu H.X., Petts D., Potter E., Jackson S., Williams–Jones A. (2019) Uranium-rich diagenetic fluids provide the key to unconformity-related uranium mineralization in the Athabasca Basin. *Scientific Reports*. **9**(5530), 1–10.

- Cooper G.F., Wilson C.J.N., Millet M.A., Baker J.A. (2016) Generation and rejuvenation of a supervolcanic magmatic system: a case study from Mangakino volcanic centre, New Zealand. *J. Petrol.* **57**, 1135–1170.
- Damdinova L.B., Damdinov B.B., Bryanskii N.V. (2018) Processes of formation of fluorite-leucophane-melino-phane-eudidymite ores of the Ermakovka F-Be deposit (western Transbaikalia). *Russian Geol. Geophys.* **59**, 1022–1038.
- de Graaf, Luders V., Banks D.A., Sosnicka M., Reijmer J.J.G., Kaden H., Vonhof H.B. (2020) Fluid evolution and ore deposition in the Harz Mountains revisited: isotope and crush-leach analyses of fluid inclusions. *Mineral. Dep.* **55**, 47–62.
- Essarraj S., Boiron M.-C., Cathelineau M., Tarantola A., Leisen M., Boulvais P., Maacha L. (2016) Basinal brines at the origin of the Imiter Ag-Hg deposit (Anti-Atlas, Morocco): Evidence from LA-ICP-MS data on fluid inclusions, halogen signatures, and stable isotopes (H, C, O). *Econ. Geol.* **111**, 1753–1781.
- Fiedrich A.M., Laurent O., Heinrich C.A., Bachmann O. (2020) Melt and fluid evolution in an upper-crustal magma reservoir, preserved by inclusions in juvenile clasts from Kos Plateau Tuff, Aegean Arc, Greece. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **280**, 237–262.
- Forni F., Bachmann O., Mollo S., De Astis G., Gelman S.E., Ellis B.S. (2016) The origin of a zoned ignimbrite: Insights into the Campanian Ignimbrite magma chamber (Campi Flegrei, Italy). *Earth Planet. Sci. Lett.* **449**, 259–271.
- Forni F., Petricca E., Bachmann O., Mollo S., De Astis G., Piochi M. (2018) The role of magma mixing/mingling and cumulate melting in the Neapolitan Yellow Tuff caldera-forming eruption (Campi Flegrei, Southern Italy). *Contrib. Mineral. Petrol.* **173**, 1–18.
- Fusswinkel T., Wagner T., Sakellaris G. (2017) Fluid evolution of Neoarchean Pampalo orogenic gold deposit (E Finland): Constraints from LA-ICPMS fluid inclusion micro-analysis. *Chem. Geol.* **450**, 96–121.
- Gomes S.D., Berger S., Figueiredo e Silva R.C., Hagemann S.G., Rosiere C.A., Banks D.A., Lobato L.M., Hensler A.S. (2018) Oxide chemistry and fluid inclusion constraints on the formation of itabirite-hosted iron ore deposits at the eastern border of the southern Espinhaco Range, Brazil. *Ore Geol. Rev.* **95**, 821–848.
- Haber M., Jelen S., Mato L., Kovalenker V. (1998) Modeling of mineral-forming processes of the Banská Štiavnica epithermal deposit, Western Carpathians, Slovak Republic. *Proceeding of the Ninth Quadrennial IAGOD Symposium*. 1998. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller). D-70176 Stuttgart., 183–203.
- Hartley M.E., Bali E., MacLennan J., Neave D.A., Hall-dorsson S.A. (2018) Melt inclusion constraints on petrogenesis of the 2014–2015 Holuhraun eruption, Iceland. *Contrib. Mineral. Petrol.* **173**, 1–23.
- Hauri E.H., MacLennan J., McKenzie D., Gronvold K., Oskarsson N., Shimizu N. (2018) CO₂ content beneath northern Iceland and the variability of mantle carbon. *Geology*. **46**, 55–58.
- Hedenquist J.W., Lowenstern J.B. (1994) The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*. **370**, 519–527.
- Hennings S.K., Wagner T., Ulmer P., Heinrich C.A. (2017) Fluid evolution of the Monte Mattoni mafic complex, Adamello batholith, northern Italy: Insights from fluid inclusion analysis and thermodynamic modeling. *J. Petrol.* **58**, 1645–1670.
- Hulsbosh N., Boiron M.-Ch., Dewaele S., Muchez P. (2016) Fluid fractionation of tungsten during granite-pegmatite differentiation and the metal source of peribatholithic W quartz veins: Evidence from the Karagwe-Ankole Belt (Rwanda). *Geochim. Cosmochim. Acta.* **175**, 299–318.
- Hulsbosch N., Boiron M.-Ch., Thomas R., Daele Van J., Dewaele S., Muchez P. (2018) Evaluation of the petrogenetic significance of melt inclusions in pegmatitic schorl-dranite from graphic tourmaline-quartz assemblages: Application of LA-ICP-QMS analyses and volume ratio calculations. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **244**, 308–335.
- Hurtig N.C., Hanley J.J., Gysi A.P. (2018) The role of hydrocarbons in ore formation at the Pillara Mississippi Valley-type Zn–Pb deposit, Canning Basin, Western Australia. *Ore Geol. Rev.* **102**, 875–893.
- Husen A., Kamenetsky V.S., Everard J.L., Kamenetsky M.B. (2016) Transition from ultra-enriched to ultra-depleted primary MORB melts in a single volcanic suite (Macquarie Island, SW Pacific): Implications for mantle source, melting process. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **185**, 112–128.
- Iddon F., Edmonds M. (2020) Volatile-rich magmas distributed through the upper crust in the Main Ethiopian Rift. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. **20**(6), 1–24.
- Jenner F.E., Hauri E.H., Bullock E.S., König S., Arculus R.J., Mavrogenes J.A., Mikkelsen N., Goddard C. (2015) The competing effects of sulfide saturation versus degassing on the behavior of the chalcophile elements during the differentiation of hydrous melts. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. **16**, 1490–1507.
- Jones M.R., Wanless V.D., Soule S.A., Kurz M.D., Mittelstaedt E., Fornari D.J., Curtice J., Klein F., Le Roux V., Brodsky H., Peron S., Schwartz D.M. (2019) New constraints on mantle carbon from Mid-Atlantic Ridge popping rocks. *Earth Planet. Sci. Lett.* **511**, 67–75.
- Keim M., Walter B.F., Neumann B.F., Kreiss S., Bayerl R., Markl G. (2019) Polyphase enrichment and redistribution processes in silver-rich mineral associations of the hydrothermal fluorite-barite-(Ag-Cu) Clara deposit, SW Germany. *Mineral. Dep.* **54**, 155–174.
- Kovalenker V.A., Prokof'ev V.Yu., Kozerenko S.V., Mironova O.F., Kolpakova N.N., Zalibekyan M.A. (2001) Mineralizing fluid composition and genesis of gold-sulfide-telluride mineralization at the Megradzor deposit: evidence from fluid inclusion. *Geochemistry Intern.*, **39** Suppl., 145–159.
- Kurosawa M., Sasa K., Shin K.-C., Ishii S. (2016) Trace-element compositions and Br/Cl ratios of fluid inclusions in the Tsushima granite, Japan: Significance for formation of granite-derived fluids. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **182**, 216–239.
- Lang J.L., Baker T. (2001) Intrusion-related gold systems: the present level of understanding. *Mineral. Dep.* **36**, 477–489.
- Legros H., Richard A., Tarantola A., Kouzmanov K., Mercadier J., Vennemann T., Marignac C., Cuney M., Wang R.C., Charles N., Beilly L., Lespinasse M.Y. (2019) Multiple fluid involved in granite-related W-Sn deposits from the world-class Jiangxi province (China). *Chem. Geol.* **508**, 92–115.

- Le Voyer M., Hauri E.H., Cottrell E., Kelley K.A., Salters V.J.M., Langmuir C.H., Hilton D.R., Barry P.H., Furi E. (2019) Carbon fluxes and primary magma CO₂ contents along the global mid-ocean ridge system. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. **20**, 1387-1424.
- Li W.T., Audetat A., Zhang J. (2015) The role of evaporites in the formation of magnetite-apatite deposits along the Middle and Lower Yangtze River, China: Evidence from LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions. *Ore Geol. Rev.* **67**, 264-278.
- Li X.H., Zeng Z.G., Yang H.X., Yin X.B., Wang X.Y., Chen S.A., Ma Y., Guo K. (2018) Geochemistry of silicate melt inclusions in middle and southern Okinawa Trough rocks: Implications for petrogenesis and variable subducted sediment component injection. *Geol. J.* **54**, 1160-1189.
- Liu H.Q., Bi X.W., Lu H.Z., Hu R.H., Lan T.G., Wang X.S., Huang M.L. (2018) Nature and evolution of fluid inclusions in the Cenozoic Beiya gold deposit, SW China. *J. Asian Earth Sci.* **161**, 35-56.
- Loewen M.W., Bindeman I.N. (2015) Oxygen isotope and trace element evidence for three-stage petrogenesis of the youngest episode (260-79 ka) of Yellowstone rhyolitic volcanism. *Contrib. Mineral. Petrol.* **170**(4), 1-25.
- Mallick S., Salters V.J.M., Langmuir C.H. (2019) Geochemical variability along the northern East Pacific Rise: Coincident source composition and ridge segmentation. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. **20**, 1889-1911.
- Mao J., Pirajno F., Lehmann B., Luo M., Berzina A. (2014) Distribution of porphyry deposits in the Eurasian continent and their corresponding tectonic settings. *J. Asia Earth Sci.* **79**, 576-584.
- Martz P., Mercadier J., Cathelineau M., Boiron M.Ch., Quirt D., Doney A., Gerbeaud O., De Wally E., Ledru P. (2019) Formation of U-rich mineralizing fluids through basinal brine migration within basement-hosted shear zones: A large-scale study of the fluid chemistry around the unconformity-related Cigar Lake U deposit (Saskatchewan, Canada). *Chem. Geol.* **508**, 116-143.
- Marquez-Zavalía M.F., Heinrich C.A. (2016) Fluid evolution in a volcanic-hosted epithermal carbonate-base metal-gold vein system: Alto de la Blenda, Farallon Negro, Argentina. *Mineral. Dep.* **51**, 873-902.
- Marschall H.R., Wanless V.D., Shimizu N., Pogge von Strandmann P.A.E., Elliott T., Monteleone B.D. (2017) The boron and lithium isotopic composition of mid-ocean ridge and the mantle. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **207**, 102-138.
- Mehrabi B., Karimshahraki B., Banks D., Boyce A., Yardley B.W.D. (2019) Hydrothermal iron oxide-Cu-Au (IOCG) mineralization at the Jalal-Abad deposit, north-western Zarand, Iran. *Ore Geol. Rev.* **106**, 300-317.
- Mercer C.N., Hofstra A.H., Todorov T.I., Roberge J., Burgisser A., Adams D.T., Cosca M. (2015) Pre-eruptive conditions of the Hideaway Park topaz rhyolite: Insights into metal source and evolution of magma parental to the Henderson porphyry molybdenum deposit, Colorado. *J. Petrol.* **56**, 645-679.
- Mernagh T.P., Mavrogenes J. (2019) Significance of high temperature fluids and melts in the Grasberg porphyry copper-gold deposit. *Chem. Geol.* **508**, 210-224.
- Miller W.G.R., MacLennan J., Shorttle O., Gaetani G.A., Le Roux V., Klein F. (2019) Estimating the carbon content of the deep mantle with Icelandic melt inclusions. *Earth Planet. Sci. Lett.* **523**, 115699.
- Morales M.J., Figueiredo e Silva R.C., Lobato L.M., Gomes S.D., Gomes C.C.C.O., Banks D.A. (2016) Metal source and fluid-rock interaction in the Archean BIF-hosted Lamego gold mineralization: Microthermometric and LA-ICP-MS analyses of fluid inclusions in quartz veins, Rio das Velhas greenstone belt, Brazil. *Ore Geol. Rev.* **72**, 510-531.
- Muller D., Forrester P. (1998) The shoshonite porphyry Cu-Au association at Bajo de la Alumbrera, Catamarca Province, Argentina. *Mineral. Petrol.* **64**, 47-64.
- Mungall J.E. (2002) Roasting the mantle: slab melting and the genesis of major Au and Au-rich Cu deposits. *Geology*. **30**, 915-918.
- Myers M.L., Wallace P.J., Wilson C.J.N., Morter B.K., Swallow E.J. (2016) Prolonged ascent and episodic venting of discrete magma batches at the onset of the Huckleberry Ridge supereruption, Yellowstone. *Earth Planet. Sci. Lett.* **451**, 285-297.
- Myers M.L., Wallace P.J., Wilson C.J.N. (2019) Inferring magma ascent timescales and reconstructing conduit processes in explosive rhyolitic eruptions using diffusive losses of hydrogen from melt inclusions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* **369**, 95-112.
- Naumov V.B., Kovalenker V.A., Damian G., Abramov S.S., Tolstykh M.L., Prokofiev V. Yu. (2014) Origin of the Laleaua Alba dacite (Baia Sprie volcanic area and Au-Pb-Zn ore district, Romania): evidence from study of melt inclusions. *Central European Geology*. **57**(1), 83-112.
- Ouyang H.G., Mao J.W., Hu R.H. (2020) Geochemistry and crystallization conditions of magmas related to porphyry Mo mineralization in northeastern China. *Econ. Geol.* **115**, 79-100.
- Pan J.Y., Ni P., Wang R.C. (2019) Comparison of fluid processes in coexisting wolframite and quartz from a giant vein-type tungsten deposit, South China: Insights from detailed petrography and LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions. *Amer. Mineral.* **104**, 1092-1116.
- Pelch M.A., Appold M.S., Emsbo P., Bodnar R.J. (2015) Constraints from fluid inclusion compositions on the origin of Mississippi Valley-type mineralization in the Illinois-Kentucky district. *Econ. Geol.* **110**, 787-808.
- Portnyagin M.V., Ponomareva V.V., Zelenin E.A., Bazanova L.I., Pevzner M.M., Plechova A.A., Rogozin A.N., Garbe-Schonberg D. (2020) TephraKam: Geochemical database of glass compositions in tephra and welded tuffs from the Kamchatka volcanic arc (NW Pacific). *Earth System Science Data*. **12**(1), 469-486.
- Prokofiev V.Yu., Banks D.A., Lobanov K.V., Selektor S.L., Milichko V.A., Akinfiyev N.N., Borovikov A.A., Luders V.L., Chicherov M.V. (2020) Exceptional concentrations of gold nanoparticles in 1,7 Ga fluid inclusions from the Kola super-deep borehole, northwest Russia. *Scientific Reports*. **10**, 1108.
- Rasmussen D.J., Kyle P.R., Wallace P.J., Sims K.W.W., Gaetani G.A., Phillips E.H. (2017) Understanding degassing and transport of CO₂-rich alkalic magmas at Ross Island, Antarctica using olivine-hosted melt inclusions. *J. Petrol.* **58**, 841-862.
- Richard A., Cathelineau M., Boiron M.-C., Mercadier J., Banks D.A., Cuney M. (2016) Metal-rich fluid inclusions provide new insights into unconformity-related U deposits

- (Athabasca Basin and Basement, Canada). *Mineral. Dep.* **51**, 249–270.
- Richards J.P. (2003) Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation. *Econ. Geol.* **98**, 1515–1533.
- Richards J.P., Kerrich R. (1993) The Porgera gold mine, Papua New Guinea: Magmatic hydrothermal to epithermal evolution of an alkali-type precious metal deposit. *Econ. Geol.* **88**, 1017–1052.
- Rudnick R.L., Gao S. (2014) Composition of the continental crust. *Treatise on Geochemistry (second edition)*. **4**, 1–51.
- Ruth D.C.S., Cottrell E., Cortes J.A., Kelley K.A., Calder E.S. (2016) From passive degassing to violent Strombolian eruption: the case of the 2008 eruption of Llaima volcano, Chile. *J. Petrol.* **57**, 1833–1864.
- Sawkins F.J. (1990) Metal deposits in relation to plate tectonics. *Mineral and Rocks*. **17**, 461.
- Schiavi F., Rosciglione A., Kitagawa H., Kobayashi K., Nakamura E., Nuccio P.M., Ottolmi L., Paonita A., Vannucci R. (2015) Geochemical heterogeneities in magma beneath Mount Etna recorded by 2001–2006 melt inclusions. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. **16**, 2109–2126.
- Schindlbeck J.C., Kutterolf S., Freundt A., Eisele S., Wang K.L., Frische M. (2019) Miocene to Holocene marine tephrostratigraphy offshore northern Central America and southern Mexico: Pulsed activity of known volcanic complexes. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. **19**, 4143–4173.
- Schindler C., Hagemann S.G., Banks D., Mernagh T., Harris A.C. (2016) Magmatic hydrothermal fluids at the sedimentary rock-hosted, intrusion-related Telfer gold-copper deposit, Paterson orogen, Western Australia: Pressure-temperature-composition constraints on the ore-forming fluids. *Econ. Geol.* **111**, 1099–1126.
- Schlegel T.U., Wagner T., Walle M., Heinrich C.A. (2018) Hematite breccia-hosted iron oxide copper-gold deposits require magmatic fluid components exposed to atmospheric oxidation: Evidence from Prominent Hill, Gawler Craton, South Australia. *Econ. Geol.* **113**, 597–644.
- Seo J.H., Yoo B.C., Villa I.M., Lee J.H., Lee T., Kim C., Moon K.J. (2017) Magmatic-hydrothermal processes in Sangdong W-Mo deposit, Korea: Study of fluid inclusions and ^{39}Ar – ^{40}Ar geochronology. *Ore Geol. Rev.* **91**, 316–334.
- Shelton K.L., Cavender B.D., Perry L.E., Schiffbauer J.D., Appold M.S., Burstein I., Fike D.A. (2020) Stable isotope and fluid inclusion studies of early Zn-Cu-(Ni-Co)-rich ores, lower ore zone of Brushy Creek mine, Viburnum Trend MVT district, Missouri, USA.: Products of multiple sulfur sources and metal-specific fluids. *Ore Geol. Rev.* **118**, 103358.
- Shimizu K., Saal A.E., Myers C.E., Nagle A.N., Hauri E.H., Forsyth D.W., Kamenetsky V.S., Niu Y.L. (2016) Two-component mantle melting-mixing model for the generation of mid-ocean ridge basalts: Implications for the volatile content of the Pacific upper mantle. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **176**, 44–80.
- Shimizu K., Saal A.E., Hauri E.H., Perfit M.R., Hekinian R. (2019) Evaluating the roles of melt-rock interaction and partial degassing on the CO_2/Ba ratios of MORB: Implications for the CO_2 budget in the Earth's depleted upper mantle. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **260**, 29–48.
- Shu Q.H., Chang Z.S., Hammerli J., Lai Y., Huizenga J.M. (2017) Composition and evolution of fluids forming the Baiyinnuo'er Zn-Pb skarn deposit, northeastern China: Insights from laser ablation ICP-MS study of fluid inclusions. *Econ. Geol.* **112**, 1441–1460.
- Sillitoe R.H. (1972) Relation of metal provinces in western America to subduction of oceanic lithosphere. *Geol. Soc. Am. Bull.* **83**, 813–818.
- Sillitoe R.H. (1997) Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the circum-Pacific region. *Aust. J. Earth Sci.* **44**, 373–388.
- Sillitoe R., Hedenquist J. (2003) Linkages between volcano-tectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits. *SEG Special Publication*. **10**, 315–343.
- Swallow E.J., Wilson C.J.N., Myers M.L., Wallace P.J., Collins K.S., Smith E.G. (2018) Evacuation of multiple magma bodies and onset of caldera collapse in a supereruption, captured in glass and mineral compositions. *Contrib. Mineral. Petrol.* **173**, 1–22.
- Szymanowski D., Ellis B.S., Bachmann O., Guillong M., Phillips W.M. (2015) Bridging basalts and rhyolites in the Yellowstone-Snake River Plain volcanic province: The elusive intermediate step. *Earth Planet. Sci. Lett.* **415**, 80–89.
- Tamburrino S., Insinga D.D., Pelosi N., Kissel C., Laj C., Capotondi L., Sprovieri M. (2016) Tephrochronology of ~70 ka-long marine record in the Marsili Basin (southern Tyrrhenian Sea). *J. Volcan. Geotherm. Res.* **327**, 23–39.
- Taracsak Z., Hartley M.E., Burgess R., Edmonds M., Iddon F., Longpre M.-A. (2019) High fluxes of deep volatiles from ocean island volcanoes: Insights from El Hierro, Canary Islands. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **258**, 19–36.
- Tomkins A.G., Mavrogenes J.A. (2003) Generation of metal-rich felsic magmas during crustal anataxis. *Geology*. **31**, 765–768.
- Tomkins A.G., Weinberg R.F., McFarlane C.R.M. (2009) Preferential magma extraction from K- and metal-enriched source regions in the crust. *Mineral. Dep.* **44**, 171–181.
- Tuohu R.M., Wallace P.J., Loewen M.W., Swanson D.A., Kent A.J.R. (2016) Magma transport and olivine crystallization depths in Kilauea's east rift zone inferred from experimentally rehomogenized melt inclusions. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **185**, 232–250.
- Van Daele J., Hulsbosch N., Dewaele S., Boiron M.-C., Piessens K., Boyce A., Muchez Ph. (2018) Mixing of magmatic-hydrothermal and metamorphic fluids and the origin of peribatholithic Sn vein-type deposits in Rwanda. *Ore Geol. Rev.* **101**, 481–501.
- Walowski K.J., Wallace P.J., Clynne M.A., Rasmussen D.J., Weis D. (2016) Slab melting and magma formation beneath the southern Cascade arc. *Earth Planet. Sci. Lett.* **446**, 100–112.
- Walowski K.J., Wallace P.J., Cashman K.V., Marks J.K., Clynne M.A., Ruprecht P. (2019) Understanding melt evolution and eruption dynamics of the 1666 C.E. eruption of Cinder Cone, Lassen Volcanic National Park, California: Insights from olivine-hosted melt inclusions. *J. Volcan. Geotherm. Res.* **387**, 106665.
- Walter B.F., Burish M., Marks M.A.W., Markl G. (2017) Major element compositions of fluid inclusions from hydrothermal vein-type deposits record eroded sedimentary units in the Schwarzwald district, SW Germany. *Mineral. Dep.* **52**, 1191–1204.

- Walter B.F., Kortenbruck P., Scharrer M., Zeitvogel C., Walle M., Mertz-Kraus R., Markl G. (2019) Chemical evolution of ore-forming brines – Basement leaching, metal provenance, and the redox link between barren and ore-bearing hydrothermal veins. A case study from the Schwarzwald mining district in SW-Germany. *Chem. Geol.* **506**, 126-148.
- White W.M., Klein E.M. (2014) Composition of the oceanic crust. *Treatise on Geochemistry (second edition)*. **4**, 457-496.
- Wieser P.E., Jenner F., Edmonds M., MacLennan J., Kunz B.E. (2020) Chalcophile elements track the fate of sulfur at Kilauea Volcano, Hawai'i. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **282**, 245-275.
- Woelki D., Regelous M., Haase K.M., Beier C. (2019) Geochemical mapping of a paleo-subduction zone beneath the Troodos Ophiolite. *Chem. Geol.* **523**, 1-8.
- Wolff J.A., Forni F., Ellis B.S., Szymanowski D. (2020) Europium and barium enrichments in compositionally zoned felsic tuffs: A smoking gun for the origin of chemical and physical gradients by cumulate melting. *Earth Planet. Sci. Lett.* **540**, 116251.
- Yang J.H., Kang L.F., Liu L., Peng J.T., Qi Y.Q. (2019a) Tracing the origin of ore-forming fluids in the Piaotang tungsten deposit, South China: Constraints from in-situ analyses of wolframite and individual fluid inclusion. *Ore Geol. Rev.* **111**, 102939.
- Yang J.H., Zhang Z., Peng J.T., Liu L., Leng C.B. (2019b) Metal source and wolframite precipitation process at the Xihuashan tungsten deposit, South China: Insights from mineralogy, fluid inclusion and stable isotope. *Ore Geol. Rev.* **111**, 102965.
- Yang S., Humayun M., Salters V.J.M. (2018) Elemental systematics in MORB glasses from the Mid-Atlantic Ridge. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* **19**, 4236-4259.
- Zhang D.H., Audetat A. (2017) Chemistry, mineralogy and crystallization conditions of porphyry Mo-forming magmas at Urad-Henderson and Silver Creek, Colorado, USA. *J. Petrol.* **58**, 277-296.
- Zhang D.H., Audetat A. (2018) Magmatic-hydrothermal evolution of the barren Huangshan pluton, Anhui Province, China: A melt and fluid inclusion study. *Econ. Geol.* **113**, 803-824.
- Zhao Z., Xiong X., Wang Q., Bao Z., Zhang Y., Xie Y., Ren S. (2003) Alkali-rich igneous rocks and related Au and Cu large and superlarge deposits in China. *Sci. China. Ser. D*. **46**, 1-13.
- Zwan van der F.M., Devey C.W., Hansteen T.H., Almeev R.R., Augustin M., Haase K.M., Basaham A., Snow J.E. (2017) Lower crustal hydrothermal circulation at slow-spreading ridges: evidence from chlorine in Arctic and South Atlantic basalt glasses and melt inclusions. *Contrib. Mineral. Petrol.* **172**, 1-23.