

ПЕТРОГЕННЫЕ, ЛЕТУЧИЕ, РУДНЫЕ И РЕДКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ В МАГМАТИЧЕСКИХ РАСПЛАВАХ ГЛАВНЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ОБСТАНОВОК ЗЕМЛИ. I. СРЕДНИЕ СОДЕРЖАНИЯ

© 2023 г. В. Б. Наумов^a, *, В. А. Дорофеева^a, А. В. Гирнис^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 25.01.2023 г.

После доработки 31.05.2023 г.

Принята к публикации 26.06.2023 г.

На основании созданной нами базы данных, включающей более 2600000 определений по 75 элементам в расплавных включениях в минералах и в закалочных стеклах вулканических пород, проведено обобщение по средним содержаниям петрогенных, летучих, рудных и редких элементов в магматических расплавах главных геодинамических обстановок. Среди последних выделены следующие: I – зоны спрединга океанических плит (срединно-океанические хребты), II – обстановки проявления мантийных плюмов в условиях океанических плит (океанические острова и лавовые плато), III и IV – обстановки, связанные с субдукционными процессами (III – зоны островодужного магматизма, заложенные на океанической коре, IV – зоны магматизма активных континентальных окраин, вовлекающие в процессы магнеообразования континентальную кору), V – обстановки внутриконтинентальных рифтов и областей континентальных горячих точек, VI – обстановки задугового спрединга. Гистограмма распределения содержаний SiO_2 в природных магматических расплавах всех геодинамических обстановок свидетельствует о бимодальном типе распределения: первый максимум определений приходится на содержания $\text{SiO}_2 = 50\text{--}52$ мас. %, а второй – $72\text{--}76$ мас. %. Минимальную распространенность имеют расплавы, в которых значения содержаний SiO_2 находятся в интервале $62\text{--}66$ мас. %. Для каждой геодинамической обстановки подсчитаны средние температуры и давления природных магматических расплавов. Построены спайдер-диаграммы, отражающие отношения средних содержаний элементов в магматических расплавах основного, среднего и кислого составов для I–VI обстановок к содержаниям этих элементов в примитивной мантии. Оценены средние отношения некогерентных редких и летучих компонентов ($\text{H}_2\text{O}/\text{Ce}$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Cl}$, Nb/U , Ba/Rb , Ce/Pb и др.) в магматических расплавах всех выделенных обстановок. Определены вариации этих отношений и показано, что в большинстве случаев отношения некогерентных элементов значительно различаются для различных обстановок. Особенно значительные различия наблюдаются для отношения элементов с разной степенью несовместимости (например, Nb/Yb) и некоторые отношения с участием летучих компонентов (например, $\text{K}_2\text{O}/\text{H}_2\text{O}$).

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

DOI: 10.31857/S001675252312004X, EDN: MAMRBG

На основе созданной нами в 1994 г. базы данных в системе “Paradox for Windows” в 2004 г. было проведено первое обобщение по средним содержаниям петрогенных, летучих и редких элементов в магматических расплавах главных геодинамических обстановок, полученных при анализе стекол природно-закаленных и экспериментально гомогенизированных расплавных включений в минералах и закалочных стеклах вулканических пород (Наумов и др., 2004). Общее количество анализов составляло почти 14000.

Всего в базе данных было занесено 190500 определений для 60 элементов. Следующее обобщение по данным более 33000 анализов по 73 элементам было опубликовано в 2010 г. (Наумов и др., 2010). Количество определений в нашей базе превысило 480000. В дальнейшем продолжался интенсивный рост исследований природных объектов, что наглядно отражено в табл. 1.

Общее количество публикаций составило 1936, а количество анализируемых объектов превысило 145000 по 75 элементам. Всего в базе дан-

Таблица 1. Количество публикаций и анализов по расплавленным включениям в минералах и закалочных стеклах пород, вошедших в базу данных, для разных периодов времени

Период	Количество публикаций	%	Количество анализов	%
1970–1979	26	1.3	318	0.2
1980–1989	115	6.0	1749	1.2
1990–1999	366	18.9	9113	6.3
2000–2009	603	31.1	27593	19.0
2010–2022	814	42.7	106413	73.3
1970–2022	1936	100.0	145 186	100.0

ных занесено более 2600000 определений: 1312000 – по петрогенным элементам, 225000 – по летучим компонентам (H_2O , Cl, F, S, CO_2), 640000 – по редким и рудным, 415 500 – по редкоземельным элементам. Кроме того, в базу данных занесено более 24500 определений температур и более 7700 определений давлений природных магматических расплавов.

Такое внимание к исследованиям включений в минералах объясняется тем, что они дают, вероятно, наиболее надежный путь к оценке состава и физико-химических параметров природных магматических расплавов. Эти исследования стали особенно эффективными после появления локальных методов количественного химического анализа (электронный, ионный и протонный микрозонды, Рамановская спектроскопия, масс-спектрометрия индуктивно связанной плазмы с лазерной абляцией, локальная инфракрасная спектроскопия и др.). В последние годы появились работы, в которых даже приводятся данные изотопного состава некоторых элементов, полученные по индивидуальным расплавленным включениям (Eiler et al., 2007; Bouvier et al., 2008; Le Voyer et al., 2008; Harlou et al., 2009; Layne et al., 2009; Wittenbrink et al., 2009; Anderson et al., 2021; Hartley et al., 2021; Li et al., 2021; Kawaguchi et al., 2022 и др.).

Целью работы является анализ сходства и различия поведения элементов в природных магматических системах и факторов, определяющих наиболее общие особенности геохимической специфики главных геодинамических обстановок на основании оценки средних содержаний элементов в расплавах основного, среднего и кислого состава.

ХАРАКТЕРИСТИКА ГЛАВНЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ОБСТАНОВОК ЗЕМЛИ

Среди главных геодинамических обстановок, различающихся по условиям формирования и эволюции магматических расплавов, в настоя-

щей работе выделены следующие: I – обстановки спрединга океанических плит (срединно-океанические хребты), II – обстановки проявления мантийных плюмов в условиях океанических плит (океанические острова и лавовые плато), III и IV – обстановки, связанные с субдукционными процессами (III – зоны островодужного магматизма, заложенные на океанической коре, IV – зоны магматизма активных континентальных окраин, вовлекающие в процессы магнеобразования континентальную кору), V – обстановки внутриконтинентальных рифтов и областей континентальных горячих точек, VI – обстановки задугового спрединга.

На рис. 1 представлена гистограмма распределения содержаний SiO_2 в гомогенных расплавленных включениях в минералах и в закалочных стеклах вулканических пород всех геодинамических обстановок.

Отчетливо фиксируется бимодальный тип распределения по природным магматическим расплавам. Первый максимум приходится на содержания $SiO_2 = 50–52$ мас. %, а второй – на содержания 72–74 мас. %. Минимальные содержания SiO_2 соответствуют 62–64 мас. %. Бимодальность природных расплавов была нами уже отмечена ранее при количестве анализов 3465 (Наумов и др., 2004) и подтверждена при количестве анализов 33000 (Наумов и др., 2010). По-видимому, можно уверенно сделать вывод, что такой тип распределения содержаний SiO_2 при дальнейших исследованиях уже не изменится.

Гистограммы на рис. 2 отражают распределение содержаний SiO_2 в природных магматических расплавах конкретных геодинамических обстановок (I–VI).

В I обстановке (срединно-океанические хребты) преобладают расплавы основного состава. Во II обстановке (океанические острова) также преобладают расплавы основного. Расплавы ультраосновного состава присутствуют в весьма подчиненном количестве. Близкий тип распределения характерен для III и IV обстановок (островные дуги и активные континентальные окраины). Для внутриплитных континентальных обстановок (V) наблюдается трех-модальное распределение кремнезема. В них представлены магматические расплавы с широкими вариациями содержаний SiO_2 – от 40 до 80 мас. %. Для задуговых бассейнов (VI обстановка) данных пока относительно мало (2150 определений), но видно преобладание расплавов основного состава. В целом, учитывая такое распределение содержаний SiO_2 (рис. 1 и 2), средние содержания петрогенных, летучих, редких и редкоземельных элементов были подсчитаны нами для трех типов магматических расплавов: для расплавов основного и ультраосновного составов ($SiO_2 = 40–54$ мас. %), для средних и

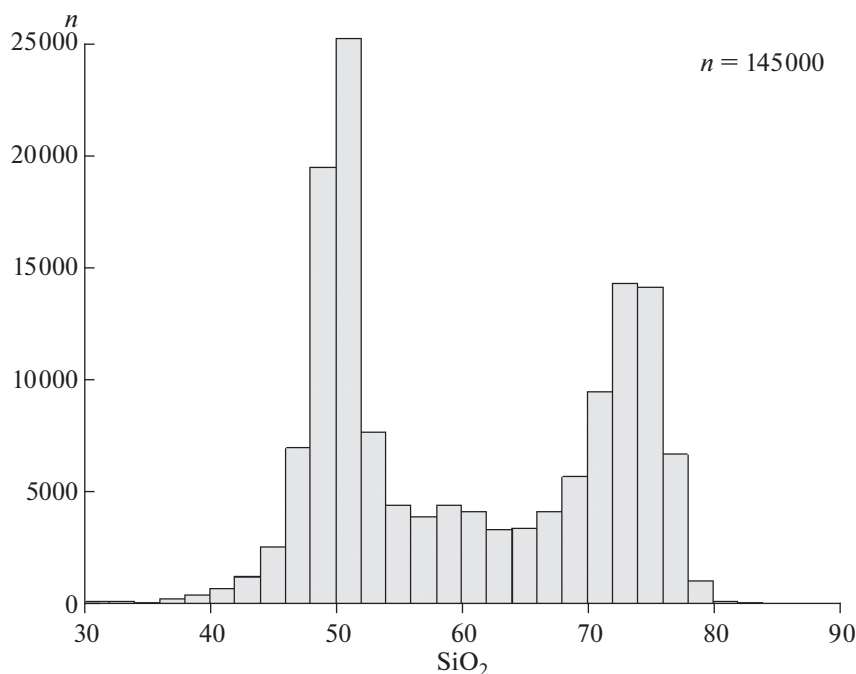


Рис. 1. Гистограмма распределения содержаний SiO_2 в природных магматических расплавах всех геодинамических обстановок по данным изучения гомогенных расплавных включений в минералах и закалочных стекол пород (n — количество определений).

низкокремнистых кислых расплавов ($\text{SiO}_2 = 54\text{--}66$ мас. %) и для расплавов кислого состава ($\text{SiO}_2 > 66$ мас. %)

Для каждого типа расплавов расчет средних содержаний велся по конкретной геодинамической обстановке, выделение которых было указано выше. В наших предыдущих работах (Наумов и др., 2004, 2010, 2016, 2022) было показано, что при расчете средних содержаний более адекватными по сравнению со средним арифметическим являются средние геометрические значения, что обусловлено близкой к логнормальной распространенностью многих элементов. К такому же выводу о логнормальном распределении содержаний редких элементов и предпочтительном использовании средних геометрических содержаний пришли и другие исследователи (Gale et al., 2013). Средние геометрические содержания рассчитывались для 95% доверительного интервала. Определения, которые не удовлетворяли этому условию, отбрасывались, а величина среднего значения вновь пересчитывалась. Полученные данные по средним содержаниям петрогенных, летучих и редких элементов представлены в табл. 2–5.

Насколько существенно изменились средние содержания элементов при исследованиях новых природных объектов и при значительном увеличении количества определений по сравнению с ранее изученными? Для этой оценки сравним

данные для расплавов основного состава всех геодинамических обстановок, приведенные в работе (Наумов и др., 2010), с данными для расплавов этих же обстановок, приведенные в табл. 2. Для петрогенных элементов разница составила 6.8 отн. %, для летучих компонентов (H_2O , Cl, F, S, CO_2) — 19.2 отн. %, для 9 микроэлементов (Li, V, Rb, Sr, Y, Zr, Ba, Th, U) — 10.7 отн. % и для редкоземельных элементов — 9.4 отн. %.

На рис. 3, 4 представлены спайдер-диаграммы распределения средних содержаний элементов (табл. 2–4) в магматических расплавах главных геодинамических обстановок I–VI.

Подробный анализ деталей распределения элементов-примесей в расплавах разного состава и из разных геодинамических обстановок не входит в задачи настоящего сообщения. Многие вопросы обсуждались в статьях, посвященных анализу данных по отдельным обстановкам (Коваленко и др., 2006, 2007, 2009; и др.). Здесь мы хотели бы подчеркнуть некоторые общие моменты, выявляющиеся при рассмотрении всего массива данных по составам включений в минералах и стеклах пород.

1. Средние составы включений в минералах и стеклах пород подтверждают существование характерных геохимических меток для основных, средних и кислых расплавов каждой из обстановок. Это в первую очередь подчеркивается веерообразным характером семейства спектров сред-

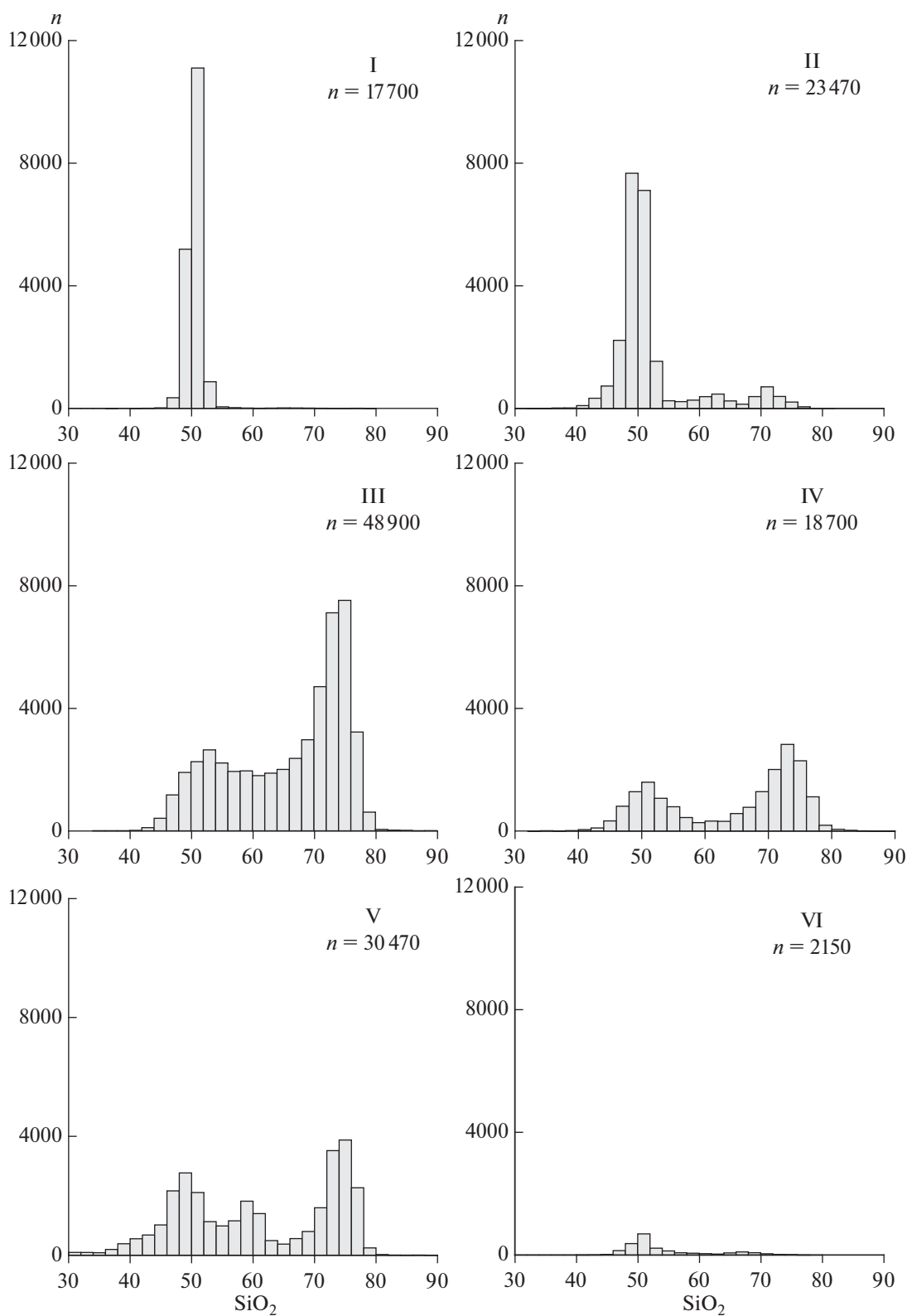


Рис. 2. Гистограммы распределения содержаний SiO_2 в природных магматических расплавах главных геодинамических обстановок (I–VI) по данным изучения гомогенных расплавных включений в минералах и закалочных стеклах пород (n – количество определений). I – срединно-океанические хребты, II – океанические острова, III – островные дуги, IV – активные континентальные окраины, V – внутриконтинентальные рифты и области горячих точек, VI – задуговые бассейны.

Таблица 2. Среднее содержание петрогенных, летучих, рудных и редких элементов в магматических расплавах ультраосновного и основного состава ($\text{SiO}_2 = 40\text{--}54$ мас. %) в главных геодинамических обстановках (I–VI) по данным изучения расплавных включений в минералах и закалочных стекол вулканических пород

Компонент	n	I	n	II	n	III	n	IV	n	V	n	VI
SiO_2 , wt %	17556	50.39 +1.02/–1.00	19701	49.79 +1.98/–1.91	8148	50.70 +3.05/–2.88	5278	50.04 +2.89/–2.74	10458	48.66 +3.26/–3.06	1464	50.35 +1.83/–1.77
TiO_2 , wt %	14740	1.21 +0.48/–0.34	17363	2.13 +0.99/–0.67	7828	1.00 +0.64/–0.39	5167	1.20 +0.56/–0.38	10010	1.58 +1.15/–0.67	1254	1.06 +0.51/–0.35
Al_2O_3 , wt %	14509	15.61 +1.51/–1.37	17371	13.86 +1.57/–1.41	7772	15.45 +2.45/–2.11	5175	16.70 +2.38/–2.08	10059	14.45 +4.53/–3.45	1249	15.64 +2.01/–1.78
FeO , wt %	14590	9.22 +1.59/–1.36	17447	11.22 +2.19/–1.83	7832	9.47 +2.66/–2.08	5177	9.24 +2.76/–2.13	10042	9.90 +3.74/–2.72	1249	8.63 +2.50/–1.94
MnO , wt %	12632	0.16 +0.05/–0.04	15791	0.18 +0.06/–0.05	7367	0.17 +0.10/–0.06	5019	0.16 +0.09/–0.06	9439	0.16 +0.12/–0.07	1123	0.16 +0.06/–0.05
MgO , wt %	12965	8.02 +1.50/–1.26	17634	7.10 +2.57/–1.89	7953	6.15 +3.57/–2.26	5168	5.90 +2.94/–1.96	10024	6.22 +5.25/–2.84	1317	7.12 +2.29/–1.73
CaO , wt %	14535	11.80 +1.19/–1.08	17365	11.15 +1.84/–1.58	7800	10.34 +2.92/–2.28	5171	9.78 +2.30/–1.86	10059	10.10 +4.54/–3.13	1249	11.56 +1.71/–1.49
Na_2O , wt %	14589	2.57 +0.63/–0.50	17355	2.39 +0.62/–0.49	7771	2.53 +1.06/–0.75	5170	3.15 +1.09/–0.81	10069	2.81 +2.16/–1.22	1249	2.62 +0.67/–0.53
K_2O , wt %	15185	0.13 +0.19/–0.08	17305	0.48 +0.61/–0.27	7854	0.74 +0.91/–0.41	5170	0.89 +0.73/–0.40	10092	1.22 +2.34/–0.80	1310	0.55 +0.94/–0.35
P_2O_5 , wt %	13288	0.13 +0.16/–0.07	16310	0.27 +0.30/–0.14	6823	0.17 +0.28/–0.11	4917	0.30 +0.37/–0.16	9011	0.46 +0.67/–0.27	1147	0.18 +0.15/–0.08
H_2O , wt %	3927	0.25 +0.27/–0.13	6127	0.43 +0.56/–0.24	2716	1.87 +1.67/–0.88	1887	1.82 +1.72/–0.88	1993	1.12 +2.36/–0.76	458	0.76 +0.76/–0.38
Cl, ppm	5752	90 +250/–70	8446	200 +410/–130	5396	830 +810/–410	4178	730 +830/–390	4659	1220 +3810/–920	519	630 +1420/–430
F, ppm	2625	170 +160/–80	4694	440 +630/–260	1936	370 +570/–220	1245	680 +650/–330	2221	1400 +3940/–1030	220	160 +160/–80
S, ppm	5721	1070 +390/–290	10558	750 +1170/–460	4713	900 +2450/–660	4026	1040 +1590/–630	4656	960 +1840/–630	380	990 +570/–360
CO_2 , ppm	2908	210 +260/–120	5504	270 +910/–210	1103	250 +1260/–210	1070	590 +1550/–430	1234	990 +2880/–740	184	180 +320/–110
Сумма		99.65		99.17		98.83		99.48		97.14		98.83
Li, ppm	3744	5.52 +1.84/–1.38	2722	4.41 +3.00/–1.78	1395	5.78 +4.15/–2.41	796	8.34 +6.82/–3.75	632	10.21 +19.70/–6.72	264	5.65 +2.65/–1.80
Be, ppm	2815	0.52 +0.31/–0.19	676	0.87 +0.72/–0.40	555	0.61 +0.34/–0.22	94	0.68 +0.70/–0.34	325	2.43 +4.68/–1.60	242	0.58 +0.46/–0.26
B, ppm	1270	1.30 +1.30/–0.45	1907	1.28 +1.41/–0.67	1019	12.80 +9.47/–5.44	464	6.79 +13.17/–4.48	420	10.50 +32.13/–8.03	22	5.29 +9.63/–3.41

Таблица 2. Продолжение

Компонент	n	I	n	II	n	III	n	IV	n	V	n	VI
Sc, ppm	5343	38.87 +6.05/–5.24	2991	31.33 +9.89/–7.52	828	37.14 +12.51/–9.36	796	30.56 +12.32/–8.78	828	30.48 +16.42/–10.67	280	40.41 +7.15/–6.07
V, ppm	5057	281 +73/–58	3253	295 +102/–76	1064	289 +103/–76	974	242 +77/–59	898	271 +163/–102	414	291 +95/–71
Cr, ppm	5486	278 +186/–111	3459	311 +427/–180	1248	120 +522/–98	495	80 +158/–53	1294	384 +1287/–296	597	301 +646/–205
Co, ppm	3852	43.4 +5.2/–4.6	1733	42.9 +12.5/–9.7	555	33.8 +11.5/–8.6	445	35.2 +19.9/–12.7	372	42.8 +34.7/–19.2	301	40.4 +14.0/–10.4
Ni, ppm	4387	97.3 +55.2/–35.2	2685	107 +118/–56	827	41.0 +86.0/–27.8	492	35.9 +87.6/–25.4	1041	233 +706/–175	301	90.9 +78.4/–42.1
Cu, ppm	4380	75.6 +20.8/–16.3	2023	93.5 +60.8/–36.8	743	92.1 +66.6/–38.7	432	125 +185/–29	464	124 +297/–87	382	100.3 +64.4/–39.2
Zn, ppm	4078	86.8 +28.7/–21.5	1745	108.9 +48.3/–33.5	683	81.5 +29.1/–21.5	313	106.9 +39.8/–29.0	332	108.5 +59.3/–38.3	267	88.5 +35.2/–25.2
Ga, ppm	3548	17.4 +3.0/–2.5	1052	21.2 +5.3/–4.2	260	16.5 +4.4/–3.5	146	23.4 +5.9/–4.5	157	20.3 +7.1/–5.3	161	16.3 +2.4/–2.1
Ge, ppm	1183	1.54 +0.11/–0.11	272	1.67 +0.34/–0.29	59	1.68 +0.27/–0.23	—	—	23	1.76 +0.94/–0.61	31	1.77 +0.12/–0.12
As, ppm	974	0.18 +0.13/–0.07	207	0.58 +0.53/–0.27	314	1.12 +1.70/–0.67	—	—	20	1.41 +1.82/–0.80	40	0.24 +0.17/–0.10
Se, ppb	783	310 +119/–86	118	230 +191/–104	41	202 +148/–85	—	—	—	—	39	368 +107/–83
Br, ppb	98	0.42 +0.91/–0.29	—	—	—	—	—	—	20	6.56 +16.60/–4.70	94	1.04 +3.61/–0.80
Rb, ppm	5749	1.55 +2.76/–0.99	5144	8.42 +12.10/–4.96	1266	7.69 +14.58/–5.03	1176	13.3 +25.7/–8.7	1413	29.5 +86.6/–22.0	579	3.00 +6.40/–2.04
Sr, ppm	6859	123 +63.7/–42.0	6469	260 +288/–137	1845	297 +369/–164	1375	488 +342/–201	2190	552 +838/–333	585	176 +115/–70
Y, ppm	6478	27.5 +10.1/–7.4	6227	24.6 +10.2/–7.2	1946	18.8 +9.1/–6.1	1327	19.3 +9.3/–6.3	1927	25.4 +12.6/–8.4	576	24.2 +12.9/–8.4
Zr, ppm	6548	85.9 +62.8/–36.3	6317	132 +145/–69	1914	57.2 +64.0/–30.2	1388	90.1 +67.3/–38.5	2099	178 +204/–95	569	68.8 +55.3/–30.6
Nb, ppm	6370	2.83 +4.90/–1.80	6697	11.54 +19.00/–7.18	1969	1.30 +1.73/–0.74	1324	4.29 +7.72/–2.76	1996	26.76 +69.80/–19.34	616	1.36 +2.19/–0.84
Mo, ppm	1994	0.56 +0.36/–0.22	791	0.95 +0.66/–0.39	308	0.46 +0.59/–0.26	158	0.58 +0.43/–0.25	106	2.31 +2.23/–1.13	154	0.39 +0.42/–0.20
Ru, ppb	69	0.054 +0.11/–0.036	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Pd, ppb	89	0.51 +1.14/0.35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 2. Продолжение

Компонент	n	I	n	II	n	III	n	IV	n	V	n	VI
Ag, ppb	1060	23.3 +7.6/–5.7	108	55.0 +38.3/–22.5	75	28.6 +12.7/–8.8	125	51.2 +53.1/–26.1	–	–	40	37.6 +10.3/–8.1
Cd, ppb	1794	126 +58/–40	599	132.1 +74.7/–47.7	92	482 +1340/–355	–	–	–	–	40	138 +24/–21
In, ppb	1392	77.3 +18.8/–15.1	565	99.1 +34.3/–25.5	23	72.8 +15.6/–12.9	–	–	23	96.7 +23.9/–19.2	42	74.7 +22.4/–17.2
Sn, ppm	2150	1.00 0.53/–0.35	937	1.63 +0.82/–0.54	69	0.63 +0.61/–0.31	30	1.48 +13.8/–1.34	37	2.67 +5.89/–1.84	81	0.92 +0.90/–0.46
Sb, ppm	1368	0.03 +0.05/–0.02	580	0.05 +0.03/–0.02	124	0.06 +0.11/–0.04	20	–	–	–	36	0.02 +0.01/–0.01
Te, ppm	75	0.003 +0.03/–0.001	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
I, ppb	41	16.2 +77.0/–13.4	20	56.8 +43.5/–24.6	–	–	–	–	–	–	94	16.0 +80.1/–13.4
Cs, ppm	3494	0.03 0.07/–0.02	1435	0.15 +0.27/–0.10	723	0.31 +0.54/–0.19	392	1.23 +2.69/–0.84	470	1.81 +7.77/–1.47	321	0.12 +1.06/–0.11
Ba, ppm	6285	20.1 +52.7/–14.5	6658	83.7 +190.2/–58.1	2025	165 +277/–103	1392	288 +418/–170	2304	458 +1676/–360	605	47.4 +107/–32.8
La, ppm	7175	3.75 +4.15/–1.97	6482	10.06 +17.06/–6.33	1980	4.82 +7.06/–2.86	1308	10.58 +12.1/–5.64	1972	30.21 +67.00/–20.82	560	4.32 +5.04/–2.32
Ce, ppm	7275	11.0 +9.9/–5.2	6563	25.6 +42.1/–15.9	1834	13.3 +18.6/–7.8	1310	24.8 +26.5/–12.8	1950	61.65 +107.8/–39.22	513	11.68 +12.18/–5.96
Pr, ppm	5093	1.60 +0.94/–0.59	4814	3.42 +3.06/–1.61	1084	1.52 +1.82/–0.83	976	3.30 +2.65/–1.47	839	5.55 +6.73/–3.04	379	1.65 +1.16/–0.68
Nd, ppm	7138	9.48 +5.93/–3.65	6255	17.6 +20.2/–9.4	1770	9.55 +10.05/–4.90	1229	15.0 +11.9/–6.6	1805	30.4 +34.9/–16.3	582	9.41 +5.64/–5.53
Sm, ppm	7312	3.15 +1.52/–1.03	6156	4.74 +3.64/–2.06	1769	2.39 +1.82/–1.03	1197	3.68 +2.39/–1.45	1814	6.85 +5.99/–3.20	600	2.86 +1.37/–0.93
Eu, ppm	6716	1.12 +0.38/–0.28	5718	1.40 +0.80/–0.51	1672	0.98 +0.72/–0.42	1166	1.18 +0.46/–0.33	1612	1.75 +1.28/–0.74	542	1.03 +0.41/–0.29
Gd, ppm	6183	4.13 +1.59/–1.15	5294	5.18 +3.05/–1.92	1395	3.00 +2.14/–1.25	1136	3.77 +1.93/–1.28	1624	6.07 +4.88/–2.70	506	3.68 +1.81/–1.21
Tb, ppm	4125	0.75 +0.24/–0.18	4403	0.86 +0.30/–0.22	953	0.50 +0.37/–0.21	472	0.66 +0.29/–0.20	686	0.92 +0.50/–0.33	365	0.73 +0.27/–0.20
Dy, ppm	6573	4.74 +1.73/–1.27	5998	4.82 +2.15/–1.49	1578	3.18 +1.63/–1.08	1139	3.57 +1.66/–1.13	1663	5.15 +2.67/–1.76	506	4.41 +2.00/–1.38
Ho, ppm	4913	1.02 +0.32/–0.24	4513	0.97 +0.32/–0.24	991	0.68 +0.39/–0.25	487	0.85 +0.25/–0.19	671	1.00 +0.50/–0.33	360	0.96 +0.40/–0.28
Er, ppm	6376	2.93 +1.02/–0.76	5407	2.46 +0.99/–0.71	1545	1.84 +1.09/–0.68	1075	2.01 +0.82/–0.58	1584	2.57 +1.17/–0.81	514	2.69 +1.28/–0.87

Таблица 2. Окончание

Компонент	<i>n</i>	I	<i>n</i>	II	<i>n</i>	III	<i>n</i>	IV	<i>n</i>	V	<i>n</i>	VI
Tm, ppm	3917	0.42 0.14/–0.10	4125	0.34 +0.13/–0.10	881	0.27 +0.17/–0.10	367	0.31 +0.15/–0.10	576	0.34 +0.17/–0.11	341	0.40 +0.20/–0.13
Yb, ppm	6840	2.81 +1.04/–0.76	6161	2.11 +0.84/–0.60	1695	1.80 +0.93/–0.61	1200	1.82 +0.81/–0.56	1751	2.04 +0.92/–0.63	594	2.44 +1.36/–0.87
Lu, ppm	5783	0.43 +0.14/–0.11	4713	0.31 +0.13/–0.09	1082	0.28 +0.19/–0.11	529	0.30 +0.17/–0.11	901	0.29 +0.16/–0.10	433	0.40 +0.19/–0.13
Hf, ppm	5555	2.26 +1.12/–0.75	4236	3.26 +2.09/–1.28	1376	1.32 +0.97/–0.56	945	2.13 +1.11/–0.73	1161	4.20 +3.10/–1.78	477	1.49 +0.92/–0.57
Ta, ppm	4900	0.31 +0.48/–0.19	3248	1.00 +1.25/–0.56	864	0.09 +0.20/–0.06	827	0.34 +0.54/–0.21	846	1.47 +2.01/–0.85	437	0.11 +0.21/–0.07
W, ppm	2197	0.05 +0.14/–0.04	998	0.21 +0.18/–0.10	210	0.12 +0.24/–0.08	138	0.22 +0.23/–0.11	39	0.90 +1.11/–0.49	92	0.06 +0.06/–0.03
Re, ppb	730	0.89 +1.07/–0.48	41	0.85 +0.40/–0.27	30	1.32 +0.68/–0.45	–	–	–	–	126	1.03 +0.71/–0.42
Os, ppb	56	0.005 +0.007/–0.003	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Ir, ppb	87	0.022 +0.042/–0.015	–	–	–	–	–	–	21	5.20 +14.09/–3.80	–	–
Pt, ppb	272	0.67 +2.10/–0.51	32	4.30 +3.87/–2.04	–	–	61	26.3 +57.8/–18.1	–	–	24	2.75 +2.39/–1.28
Au, ppb	267	1.52 +8.57/–1.29	–	–	50	2.33 +1.75/–1.00	–	–	47	143 +250/–91	33	3.48 +2.34/–1.40
Tl, ppb	1876	12.7 +11.7/–6.1	729	28.1 +22.6/–12.5	89	44.1 +38.5/–20.6	–	–	21	73.5 +154/–49.7	56	52.2 +118.8/–36.2
Pb, ppm	5190	0.58 +0.37/–0.22	3716	1.04 +1.08/–0.53	1314	1.79 +2.04/–0.95	1155	3.94 +4.00/–1.98	858	3.33 +5.78/–2.11	504	0.96 +1.29/–0.55
Bi, ppm	1335	0.007 +0.005/–0.003	402	0.016 +0.011/–0.006	69	0.018 +0.016/–0.009	–	–	–	–	34	0.013 +0.005/0.004
Th, ppm	5798	0.34 +0.63/–0.22	3849	1.15 +2.02/–0.73	1637	0.60 +0.82/–0.35	1176	1.16 +1.10/–0.57	1208	2.61 +5.78/–1.80	523	0.49 +0.85/–0.31
U, ppm	5670	0.09 +0.15/–0.06	3981	0.42 +0.58/–0.24	1392	0.28 +0.43/–0.17	1083	0.67 +0.66/–0.33	1035	1.03 +2.43/–0.72	463	0.15 +0.29/–0.10
<i>T</i> , °C	2517	1240 +46/–45	3427	1200 +84/–79	1679	1175 +93/–86	1955	1190 +70/–66	4301	1220 +85/–79	34	1190 +65/–62
<i>P</i> , bar	1172	800 +1820/–560	1994	710 +2430/–550	588	1540 +3170/–1030	430	1740 +3510/–1160	582	1890 +4050/–1290	–	–

Примечания. В табл. 2–5 *n* – количество определений. Содержание элементов рассчитывалось как среднее геометрическое для 95% доверительного интервала, под средним содержанием дано отклонение (первая цифра – плюс к среднему, вторая цифра – минус от среднего).

Таблица 3. Среднее содержание петрогенных, летучих, рудных и редких элементов в магматических расплавах среднего состава ($\text{SiO}_2 = 54\text{--}66$ мас. %) в главных геодинамических обстановках (II–VI) по данным изучения расплавных включений в минералах и закалочных стекол вулканических пород

Компонент	<i>n</i>	II	<i>n</i>	III	<i>n</i>	IV	<i>n</i>	V	<i>n</i>	VI
SiO_2 , wt %	1844	61.04 +3.79/–3.57	11357	60.10 +4.35/–4.05	2731	58.67 +5.23/–4.80	6228	58.96 +2.83/–2.70	422	57.68 +4.23/–3.94
TiO_2 , wt %	1830	0.90 +0.79/–0.42	11239	0.99 +0.72/–0.42	2683	0.92 +0.70/–0.40	6149	0.55 +0.35/–0.21	392	0.85 +0.41/–0.27
Al_2O_3 , wt %	1825	16.76 +3.06/–2.59	11213	15.20 +1.80/–1.61	2716	15.93 +2.10/–1.86	6202	18.19 +2.80/–2.43	393	15.41 +3.42/–2.80
FeO , wt %	1826	4.93 +4.41/–2.33	11216	6.98 +3.61/–2.38	2702	6.12 +4.44/–2.57	6190	3.41 +1.81/–1.18	393	7.69 +4.52/–2.85
MnO , wt %	1704	0.19 +0.15/–0.08	10734	0.15 +0.10/–0.06	2553	0.12 +0.12/–0.06	5782	0.14 +0.13/–0.07	389	0.15 +0.09/–0.06
MgO , wt %	1834	0.82 +1.31/–0.50	11303	2.01 +1.67/–0.91	2679	2.34 +2.72/–1.26	6143	0.73 +0.96/–0.41	407	2.21 +1.99/–1.05
CaO , wt %	1821	1.95 +2.59/–1.11	11299	5.44 +2.74/–1.82	2689	5.25 +4.18/–2.33	6184	2.44 +1.85/–1.05	393	6.44 +2.40/–1.75
Na_2O , wt %	1822	6.04 +2.84/–1.93	11207	3.85 +1.43/–1.04	2713	3.89 +1.11/–0.86	6196	4.26 +1.96/–1.34	393	2.96 +1.57/–1.03
K_2O , wt %	1826	3.45 +3.09/–1.63	11282	1.42 +1.47/–0.72	2712	1.65 +1.33/–0.74	6202	7.30 +3.29/–2.27	401	0.88 +0.52/–0.33
P_2O_5 , wt %	1596	0.20 +0.59/–0.15	9867	0.27 +0.37/–0.16	2424	0.27 +0.26/–0.13	4997	0.14 +0.40/–0.10	332	0.21 +0.18/–0.10
H_2O , wt %	354	1.45 +1.43/–0.72	1236	1.42 +1.55/–0.74	720	1.60 +2.68/–1.00	908	1.68 +2.36/–0.98	128	1.51 +0.45/–0.35
Cl, ppm	987	1680 +1830/–880	8096	980 +930/–480	1289	950 +1290/–550	3151	4280 +7760/–2760	158	2080 +1630/–910
F, ppm	714	1390 +1790/–780	4392	480 +990/–320	311	920 +3710/–740	1054	3000 +5180/–1900	95	390 +990/–280
S, ppm	511	300 +500/–190	7213	110 +530/–90	1047	300 +960/–230	1098	350 +560/–210	80	360 +1610/–300
CO_2 , ppm	134	170 +810/–140	403	90 +320/–70	170	460 +1850/–370	209	460 +880/–300	26	20 +180/–20
Сумма		98.09		98.00		97.04		98.62		96.28
Li, ppm	425	18.62 +12.56/–7.50	1229	12.80 +16.59/–7.23	411	17.62 +15.55/–8.26	1359	32.20 +23.74/–13.66	88	8.74 +5.77/–3.48
Be, ppm	93	3.45 +0.99/–0.77	335	0.71 +0.51/–0.30	158	1.31 +0.79/–0.49	90	6.88 +11.54/–4.31	80	0.85 +0.52/–0.32
B, ppm	196	8.25 +5.57/–3.33	689	28.2 +30.2/–14.6	276	27.8 +57.9/–18.8	119	59.7 +279.6/–49.2	–	–
Sc, ppm	420	7.36 +6.58/–3.47	1018	27.27 +15.46/–9.87	600	15.61 +9.83/–6.03	1405	4.69 +2.76/–1.74	95	30.98 +12.27/–8.79
V, ppm	377	39.8 +63.5/–24.5	1251	192 +224/–103	590	154 +107/–63	1542	82.4 +86.3/–42.1	133	265 +217/–119
Cr, ppm	117	19.3 +258.6/–18.4	941	40.6 +387.4/–36.7	472	44.7 +131.3/–33.4	210	94.7 +1485.8/–89.0	136	16.0 +79.0/–13.3
Co, ppm	176	3.01 +6.91/–2.10	645	23.6 +16.7/–9.8	448	18.41 +12.04/–7.28	683	3.50 +8.13/–2.45	118	28.49 +14.17/–9.46
Ni, ppm	82	34.5 +565.0/–32.5	813	17.8 +57.7/–13.6	458	26.8 +47.0/–17.1	176	81.6 +1209/–76.4	115	11.9 +24.6/–8.0
Cu, ppm	83	25.0 +82.9/–19.2	860	99.2 +116.0/–53.5	406	84.6 +320.4/–67.0	117	30.7 +154.7/–25.6	159	85.8 +167.7/–56.8
Zn, ppm	146	146.5	783	81.2	264	83.3	171	113.0	128	99.7

Таблица 3. Продолжение

Компонент	<i>n</i>	II	<i>n</i>	III	<i>n</i>	IV	<i>n</i>	V	<i>n</i>	VI
Ga, ppm	129	+85.2/–53.9 27.9 +9.4/–7.0	338	+27.6/–20.6 49.3 +227.0/–40.5	92	+49.0/–30.9 45.2 +70.0/–27.4	90	+70.7/–43.5 28.2 +10.2/–7.5	52	+45.6/–31.3 20.5 +7.9/–5.7
Ge, ppm	42	1.92 +1.47/–0.83	54	1.72 +0.30/–0.25	—	— —	—	— —	—	— —
As, ppm	—	—	659	2.77 +4.28/–1.68	—	— —	—	— —	34	1.83 +1.24/–0.74
Se, ppb	—	—	36	324 +1200/–255	—	— —	—	— —	—	— —
Br, ppb	—	—	—	—	44	5.75 +7.07/–3.17	—	— —	26	4.16 +3.98/–2.03
Rb, ppm	469	84.2 +105.4/–46.8	1541	22.2 +73.7/–17.1	936	48.7 +124.4/–35.0	1651	313 +140/–97	218	14.3 +11.5/–6.4
Sr, ppm	513	215 +708/–165	1637	229 +273/–125	939	479 +359/–205	1844	516 +818/–316	213	221 +238/–115
Y, ppm	481	38.6 +26.5/–15.7	1465	23.7 +22.1/–11.4	913	19.4 +14.4/–8.3	1648	27.1 +14.6/–9.5	218	24.0 +20.9/–11.2
Zr, ppm	519	602 +452/–258	1503	104 +189/–67	957	138 +107/–60	1755	290 +238/–131	115	78.4 +125.8/–48.3
Nb, ppm	527	120 +145/–66	1460	1.88 +3.91/–1.27	946	6.41 +9.30/–3.79	1650	45.7 +39.1/–21.1	235	1.46 +1.76/–0.80
Mo, ppm	66	3.47 +2.23/–1.36	442	0.92 +1.17/–0.52	112	1.84 +2.08/–0.98	92	3.74 +4.41/–2.03	34	0.46 +0.40/–0.21
Pd, ppb	—	—	21	17.1 +5.5/–4.2	—	— —	—	— —	—	— —
Ag, ppb	—	—	89	36.3 +55.9/–22.0	17	162 +2450/–152	—	— —	—	— —
Cd, ppb	26	193 +166/–89	99	416 +938/–278	—	— —	—	— —	—	— —
In, ppb	26	147 +28/–24	—	— —	—	— —	—	— —	21	93.1 +99.6/–48.1
Sn, ppm	39	5.16 +1.28/–1.03	187	1.32 +0.73/–0.47	36	9.80 +502.0/–9.61	23	27.7 +339.0/–25.57	35	0.74 +0.62/–0.34
Sb, ppm	29	0.15 +0.07/–0.05	241	0.38 +0.95/–0.27	—	— —	—	— —	—	— —
I, ppb	—	—	—	— —	—	— —	—	— —	26	104 +240/–73
Cs, ppm	329	1.07 +1.16/–0.56	850	0.69 +0.90/–0.39	538	2.49 +5.01/–1.66	1523	15.56 +15.91/–7.87	154	0.64 +0.98/–0.39
Ba, ppm	663	721 +1113/–438	1666	371 +1045/–274	968	739 +529/–308	1886	780 +2853/–612	233	150 +205/–87
La, ppm	491	84.20 +64.46/–36.32	1442	6.00 +15.64/–4.33	823	17.20 +14.66/–7.91	1691	65.44 +39.17/–24.50	216	7.15 +7.27/–3.61
Ce, ppm	480	163.88 +87.32/–56.97	1499	20.66 +50.44/–14.66	842	36.96 +33.62/–17.61	1705	126.1 +78.3/–48.3	215	16.85 +15.52/–8.08
Pr, ppm	373	17.46 +6.16/–4.55	1229	1.86 +3.34/–1.20	299	3.88 +2.90/–1.66	1485	13.30 +6.54/–4.38	185	2.34 +1.84/–1.03
Nd, ppm	479	60.16 +21.45/–15.81	1387	14.29 +27.13/–9.36	747	19.32 +11.55/–7.23	1616	47.72 +22.94/–15.49	217	11.70 +10.41/–5.51
Sm, ppm	447	10.51 +5.42/–3.57	1395	2.80 +3.42/–1.54	682	4.23 +2.20/–1.45	1603	8.63 +3.89/–2.68	213	3.38 +2.73/–1.51
Eu, ppm	440	2.87	1360	1.13	689	1.11	1589	1.89	207	1.06

Таблица 3. Окончание

Компонент	<i>n</i>	II	<i>n</i>	III	<i>n</i>	IV	<i>n</i>	V	<i>n</i>	VI
Gd, ppm	467	+2.13/–1.22 8.46	1309	+0.85/–0.49 3.89	661	+0.38/–0.28 3.81	1548	+0.84/–0.58 6.56	188	+0.65/–0.40 3.61
Tb, ppm	358	+4.88/–3.09 1.18	891	+3.44/–1.83 0.59	248	+1.75/–1.20 0.69	1425	+2.74/–1.93 0.92	168	+2.48/–1.47 0.72
Dy, ppm	473	+0.60/–0.40 7.34	1368	+0.63/–0.30 3.80	651	+0.35/–0.23 3.10	1558	+0.28/–0.21 4.99	181	+0.45/–0.28 4.16
Ho, ppm	361	+4.48/–2.78 1.30	891	+2.86/–1.63 0.84	251	+1.72/–1.11 0.87	1456	+2.09/–1.47 0.97	155	+3.24/–1.82 0.91
Er, ppm	441	+0.53/–0.37 3.90	1318	+0.68/–0.38 2.19	611	+0.41/–0.28 1.55	1528	+0.37/–0.27 2.61	185	+0.54/–0.34 2.55
Tm, ppm	352	+2.62/–1.57 0.55	821	+1.48/–0.88 0.37	168	+0.91/–0.57 0.37	1266	+1.19/–0.82 0.40	123	+1.86/–1.08 0.57
Yb, ppm	489	+0.31/–0.20 3.47	1539	+0.36/–0.18 2.48	708	+0.22/–0.14 1.52	1588	+0.19/–0.13 2.35	197	+0.50/–0.27 2.53
Lu, ppm	416	+2.34/–1.40 0.57	1135	+1.44/–0.91 0.40	285	+0.99/–0.60 0.41	1412	+0.96/–0.68 0.38	184	+2.09/–1.15 0.49
Hf, ppm	410	+0.38/–0.23 12.02	1113	+0.32/–0.18 1.63	354	+0.34/–0.18 3.40	1471	+0.20/–0.13 5.73	185	+0.40/–0.22 1.82
Ta, ppm	381	+5.92/–3.97 8.71	1137	+1.92/–0.88 0.28	346	+2.74/–1.52 0.45	1532	+2.55/–1.76 2.01	151	+1.51/–0.82 0.09
W, ppm	70	+6.89/–3.85 0.88	356	+0.78/–0.21 0.88	59	+0.54/–0.24 0.27	26	+1.72/–0.93 5.21	44	+0.11/–0.05 0.10
Re, ppb	—	+0.36/–0.26 —	—	+1.61/–0.57 —	—	+0.27/–0.14 —	—	+40.95/–4.62 —	27	+0.12/–0.05 1.43
Au, ppb	—	— —	70	— 3.22	—	— —	—	— —	27	+0.67/–0.46 3.01
Tl, ppb	36	— 85.9	200	+3.44/–1.66 237	—	— —	—	— —	45	+6.13/–2.02 109.4
Pb, ppm	412	+32.1/–23.4 8.70	1213	+401/–149 5.28	518	— 10.60	1478	— 48.16	201	+94.9/–50.8 3.13
Bi, ppm	—	+9.46/–4.53 —	132	+11.45/–3.61 0.09	—	+12.36/–5.70 —	—	+19.76/–14.01 —	—	+3.02/–1.54 —
Th, ppm	425	— 10.94	1321	+0.26/–0.06 0.85	714	— 3.76	1597	— 24.51	206	— 0.97
U, ppm	414	+11.25/–5.55 2.95	1400	+4.15/–0.70 0.78	428	+5.29/–2.20 1.27	1572	+19.37/–10.82 7.51	196	+1.41/–0.57 0.47
<i>T</i> , °C	327	+2.68/–1.40 850	762	+1.97/–0.56 1150	321	+1.55/–0.70 1110	1362	+4.34/–2.75 950	—	+0.47/–0.24 —
<i>P</i> , bar	47	+88/–80 360	192	+120/–110 1010	96	+130/–115 900	102	+175/–150 1290	—	— —
		+700/–240		+1420/–590		+2850/–690		+6240/–1070		—

них содержаний элементов-примесей в расплавах основного и среднего состава. Наибольшие различия наблюдаются между расплавами обстановок I и V.

2. В целом, распределения редких элементов в расплавах среднего и основного состава подобны и отличаются от характера распределения в кислых породах. Это может указывать на то, что в каждой из обстановок источники средних и основных магм были близкими. Можно предпола-

гать, что основным механизмом образования средних расплавов являлась дифференциация основных (мантийных) магм, в то время как источники и механизмы образования кислых магм были иными (коровые породы).

3. Замечательной особенностью диаграмм, особенно для основных расплавов, является очень небольшой интервал вариаций наименее несовместимых элементов в правой части спектров (от Tb до Lu). Такое единообразие свиде-

Таблица 4. Среднее содержание петрогенных, летучих, рудных и редких элементов в магматических расплавах кислого состава ($\text{SiO}_2 > 66$ мас. %) в главных геодинамических обстановках (II–VI) по данным изучения расплавленных включений в минералах и закалочных стекол вулканических пород

Компонент	<i>n</i>	II	<i>n</i>	III	<i>n</i>	IV	<i>n</i>	V	<i>n</i>	VI
SiO_2 , wt %	1889	71.43 +2.10/–2.04	29199	73.13 +3.07/–2.95	10649	72.89 +3.19/–3.06	12927	73.99 +2.73/–2.64	261	68.42 +2.48/–2.39
TiO_2 , wt %	1880	0.29 +0.25/–0.13	28029	0.26 +0.43/–0.16	9878	0.18 +0.31/–0.11	10590	0.12 +0.21/–0.08	228	0.60 +0.14/–0.11
Al_2O_3 , wt %	1696	12.91 +1.84/–1.61	28272	12.88 +1.55/–1.39	10046	12.89 +1.60/–1.42	10852	12.11 +1.54/–1.37	228	13.59 +1.37/–1.24
FeO , wt %	1705	3.07 +1.04/–0.78	28250	1.26 +0.82/–0.49	9969	1.12 +0.92/–0.51	10779	1.00 +1.34/–0.57	228	4.66 +1.82/–1.31
MnO , wt %	1461	0.14 +0.13/–0.07	25816	0.06 +0.11/–0.04	8568	0.06 +0.10/–0.04	8776	0.05 +0.16/–0.04	227	0.11 +0.10/–0.05
MgO , wt %	1643	0.13 +0.51/–0.10	27994	0.25 +0.56/–0.17	9547	0.17 +0.43/–0.12	9891	0.03 +0.07/–0.02	229	1.10 +0.72/–0.43
CaO , wt %	1885	0.85 +1.07/–0.47	28300	1.12 +0.75/–0.45	10058	0.95 +0.97/–0.48	10684	0.51 +0.38/–0.22	228	3.48 +1.37/–0.98
Na_2O , wt %	1692	4.86 +1.18/–0.95	28252	4.01 +0.93/–0.75	9893	3.69 +1.16/–0.88	10818	3.59 +1.18/–0.89	228	3.62 +0.99/–0.78
K_2O , wt %	1696	3.74 +2.20/–1.38	28282	3.18 +1.27/–0.91	9951	3.82 +1.48/–1.06	10854	4.72 +0.93/–0.77	229	1.54 +0.34/–0.28
P_2O_5 , wt %	1416	0.03 +0.06/–0.02	18061	0.05 +0.13/–0.04	7535	0.04 +0.10/–0.03	2998	0.02 +0.05/–0.02	209	0.22 +0.13/–0.08
H_2O , wt %	319	2.43 +2.75/–1.29	4055	2.36 +3.18/–1.35	2967	1.88 +2.32/–1.04	3426	2.62 +2.55/–1.29	56	1.35 +0.62/–0.43
Cl, ppm	1095	1150 +1890/–720	20017	1330 +910/–540	3612	1120 +1420/–630	4392	1850 +2520/–1070	85	3760 +4180/–1980
F, ppm	736	1480 +3460/–1040	12278	120 +1580/–110	1622	600 +1990/–460	3410	3160 +7070/–2190	30	630 +360/–230
S, ppm	642	80 +110/–50	14791	60 +190/–40	2100	50 +200/–40	955	150 +330/–100	48	40 +170/–30
CO_2 , ppm	29	50 +130/–30	835	100 +220/–70	964	30 +190/–30	1364	150 +420/–110	–	– –
Сумма		99.22		98.72		97.94		99.30		99.13
Li, ppm	619	23.72 +17.50/–10.07	2918	35/97 +38.87/–18.67	1911	29.01 +39.71/–16.76	4905	55.36 +6.43/–30.60	–	– –
Be, ppm	114	2.99 +1.64/–1.06	792	1.63 +4.14/–1.17	644	2.20 +1.81/–0.99	1052	9.56 +13.90/–5.67	–	– –
B, ppm	303	19.67 +3.25/–2.79	2342	33.60 +44.67/–19.18	1561	46.18 +70.28/–27.87	2761	27.29 +44.87/–16.97	–	– –
Sc, ppm	420	8.63 +1.88/–1.54	2042	8.35 +10.40/–4.63	1031	4.56 +3.70/–2.04	2285	4.26 +4.43/–2.17	–	– –
V, ppm	376	17.0 +22.1/–9.6	1711	6.61 +20.71/–5.01	722	5.81 +16.82/–4.32	1798	1.42 +4.45/–1.08	35	48.4 +73.8/–29.2
Cr, ppm	55	3.32 +22.83/–2.90	764	2.40 +4.59/–1.58	174	4.91 +17.16/–3.81	856	2.93 +5.50/–1.91	50	4.29 +22.58/–3.60
Co, ppm	94	0.74 +0.57/–0.32	649	1.61 +3.19/–1.07	582	1.22 +1.81/–0.73	515	1.08 +4.61/–0.87	28	7.19 +3.70/–2.44
Ni, ppm	21	1.60 +8.71/–1.35	608	1.32 +1.91/–0.78	148	4.56 +9.09/–3.03	864	1.72 +3.61/–1.16	–	– –
Cu, ppm	111	17.2	1509	6.44	1394	21.13	1520	4.48	101	24.9

Таблица 4. Продолжение

Компонент	<i>n</i>	II	<i>n</i>	III	<i>n</i>	IV	<i>n</i>	V	<i>n</i>	VI
Zn, ppm	250	+10.8/–6.6 209.1	1478	+28.26/–5.24 36.04	1258	130.92/–18.20 40.52	3341	+16.41/–3.52 78.20	79	+53.9/–17.0 80.5
Ga, ppm	337	+79.7/–57.7 31.8	607	+39.75/–18.90 16.21	506	+35.31/–18.87 27.88	2845	+94.65/–42.82 25.38	–	+33.7/–23.7 –
Ge, ppm	21	+14.3/–9.8 4.06	73	+5.61/–4.16 2.53	38	+34.88/–15.50 1.71	104	+7.92/–6.03 2.00	–	– –
As, ppm	64	+2.45/–1.53 4.16	1248	+1.22/–0.82 6.84	428	+0.22/–0.20 130.6	392	+0.89/–0.62 6.40	46	– 3.45
Br, ppb	–	+1.58/–1.14 –	24	+11.76/–4.32 11.68	109	+2981/–125.1 2.43	–	+16.24/–4.59 –	–	+1.94/–1.24 –
Rb, ppm	648	– 102.7	3983	+3.31/–2.58 111	3044	+3.16/–1.37 131.8	6376	– 211.9	88	– 22.06
Sr, ppm	472	+34.3/–25.7 5.39	3951	+134/–61 81.8	2668	+153.0/–70.80 102.8	6101	+139.4/–84.1 4.89	87	+10.73/–7.22 264
Y, ppm	476	+42.03/–4.78 76.4	3924	+150.1/–52.9 24.58	2187	+317/–77.6 16.78	6180	+13.10/–3.56 57.60	87	+131/–88 28.45
Zr, ppm	477	+33.4/–23.2 917	3903	+21.23/–11.39 118.4	2400	+17.86/–8.65 122.9	6323	+90.32/–35.17 173.4	87	+13.77/–9.28 107.2
Nb, ppm	475	+1041/–488 139	3901	+104.9/–55.6 8.04	2271	+153.6/–68.3 10.73	6253	+292.6/–108.9 49.59	108	+63.5/–39.9 1.48
Mo, ppm	227	+184/–79 6.04	1265	+11.81/–4.78 1.88	877	+13.13/–5.91 3.00	2848	+84.76/–31.28 5.09	–	+0.78/–0.51 –
Ag, ppb	–	+1.26/–1.04 –	178	+1.94/–0.96 39.7	81	+5.67/–1.96 173.7	236	+3.47/–2.06 119.7	–	– –
Cd, ppb	–	– –	21	+40.6/–20.1 194.0	–	+1714/–157.7 –	57	+212.2/–76.5 135.5	–	– –
In, ppb	–	– –	–	+49.0/–39.1 –	–	– –	57	+30.2/–24.7 103.1	–	– –
Sn, ppm	208	– 9.27	404	– 3.06	726	– 9.83	1282	+29.1/–22.7 8.49	–	– –
Sb, ppm	74	+1.78/–1.49 0.48	396	+9.38/–2.31 3.21	388	+175.0/–9.31 29.62	295	+13.29/–5.18 0.56	–	– –
Cs, ppm	436	+0.20/–0.14 1.38	1925	+32.04/–2.92 3.91	1970	+1098/–28.84 5.40	3248	+0.47/–0.26 7.03	35	– 0.78
Ba, ppm	553	+0.57/–0.40 300	4013	+6.94/–2.50 602	2535	+14.92/–3.97 650	5784	+15.98/–4.88 78.3	109	+0.19/–0.15 330
La, ppm	452	+501/–188 95.09	3885	+687/–321 19.80	1813	+1363/–440 21.76	5226	+467.1/–67.1 64.44	88	+151/–103 10.50
Ce, ppm	465	+71.57/–40.83 201.11	3965	+14.75/–8.45 41.58	1881	+20.73/–10.62 41.03	5943	+77.49/–35.18 106.7	88	+6.64/–4.07 23.87
Pr, ppm	430	+171.1/–92.44 25.07	2579	+27.29/–16.48 4.57	892	+37.85/–19.69 4.48	4399	+154.2/–63.1 13.32	50	+14.02/–8.83 2.94
Nd, ppm	452	+15.79/–9.69 90.58	3124	+3.15/–1.87 18.17	1392	+3.39/–1.93 16.99	5088	+13.29/–6.65 46.46	88	+0.94/–0.71 15.40
Sm, ppm	635	+63.41/–37.30 19.00	3219	+14.41/–8.04 3.83	1475	+13.31/–7.46 3.38	4944	+67.53/–27.52 9.95	87	+7.78/–5.17 4.42
Eu, ppm	622	+6.78/–5.00 3.93	2702	+2.87/–1.64 0.68	1305	+2.59/–1.47 0.60	4498	+13.04/–5.64 0.65	82	+2.17/–1.45 1.14
Gd, ppm	445	+1.72/–1.20 15.11	2661	+0.75/–0.36 3.82	1184	+0.45/–0.26 3.08	4594	+1.22/–0.42 10.81	56	+0.26/–0.21 4.45
		+4.39/–3.40		+3.32/–1.78		+2.48/–1.37		+12.83/–5.87		+1.19/–0.94

Таблица 4. Окончание

Компонент	<i>n</i>	II	<i>n</i>	III	<i>n</i>	IV	<i>n</i>	V	<i>n</i>	VI
Tb, ppm	426	2.41 +0.54/–0.44	1585	0.65 +0.49/–0.28	833	0.58 +0.52/–0.27	3676	1.48 +1.17/–0.65	50	0.74 +0.21/–0.16
Dy, ppm	452	14.26 +4.39/–3.36	2890	3.84 +3.08/–1.71	1192	3.07 +2.65/–1.42	4558	11.52 +14.31/–6.38	43	4.99 +1.16/–0.94
Ho, ppm	426	2.77 +0.71/–0.57	1615	0.89 +0.73/–0.40	795	0.68 +0.41/–0.26	3647	1.83 +1.61/–0.86	48	1.06 +0.24/–0.19
Er, ppm	443	7.78 +2.28/–1.76	2872	2.44 +1.81/–1.04	1160	1.85 +1.45/–0.81	4499	7.17 +7.67/–3.71	56	3.09 +0.94/–0.72
Tm, ppm	425	1.09 +0.32/–0.25	1552	0.44 +0.42/–0.22	728	0.31 +0.22/–0.13	3525	1.06 +0.84/–0.47	34	0.48 +0.12/–0.10
Yb, ppm	460	8.96 +2.96/–2.08	2937	2.78 +2.05/–1.18	1250	2.05 +1.64/–0.91	4804	6.45 +6.59/–3.26	85	3.23 +1.45/–1.00
Lu, ppm	421	1.05 +0.33/–0.25	1926	0.53 +0.42/–0.24	875	0.37 +0.23/–0.14	3698	1.03 +0.88/–0.47	84	0.53 +0.31/–0.20
Hf, ppm	620	23.5 +12.3/–8.1	2564	4.05 +3.66/–1.92	1090	3.67 +2.28/–1.41	4246	7.17 +5.98/–3.26	87	3.11 +1.58/–1.05
Ta, ppm	437	9.71 +5.42/–3.48	2736	0.77 +1.01/–0.44	1202	0.74 +0.93/–0.41	4406	3.60 +3.81/–1.85	61	0.10 +0.04/–0.03
W, ppm	53	1.97 +1.61/–0.89	807	1.95 +4.63/–1.37	430	23.00 +98.77/–18.66	1525	3.65 +4.42/–2.00	–	– –
Re, ppb	–	–	–	–	29	147.8 +113.0/–64.0	–	–	31	1.09 +0.93/–0.50
Au, ppb	–	–	–	–	38	68.43 +273.8/–54.74	42	2.20 +10.36/–1.81	29	1.32 +1.21/–0.63
Tl, ppb	–	–	97	418 +788/–273	169	648 +288/–199	269	2665 +2094/–1173	–	– –
Pb, ppm	623	9.91 +3.39/–2.53	2926	15.12 +9.13/–5.69	1862	18.81 +12.94/–7.67	5248	35.99 +17.41/–11.73	109	5.58 +1.96/–1.45
Bi, ppm	–	–	324	1.90 +5.69/–1.42	368	4.48 +22.52/–3.74	608	0.70 +0.88/–0.39	–	– –
Th, ppm	648	16.04 +6.38/–4.56	3304	10.73 +14.09/–6.09	1994	12.22 +14.91/–6.71	5805	25.36 +16.56/–10.02	108	1.07 +0.63/–0.39
U, ppm	636	4.68 +2.09/–1.44	3267	2.62 +2.65/–1.32	1951	4.08 +4.05/–2.03	5637	7.59 +4.05/–2.64	108	0.75 +0.33/–0.23
<i>T</i> , °C	284	850 +54/–50	1396	850 +90/–80	1192	830 +120/–105	3338	790 +80/–70	20	955 +60/–55
<i>P</i> , bar	46	475 +340/–200	892	1170 +1220/–600	727	940 +2960/–710	479	1550 +900/–570	20	2270 +3140/–1320

тельствует о том, что мантийные источники и условия образования магм были в среднем близки, поскольку содержания и отношения тяжелых РЗЭ и других умеренно некогерентных элементов в наибольшей степени зависят от условий генерации расплавов, в отличие от наиболее некогерентных элементов, концентрации которых в мантийных источниках сильно меняются в процессах переноса небольших порций расплавов и флюидов (мантийный метасоматоз). Нужно иметь в виду, что относительные содержания наименее несовместимых элементов в наимень-

шей степени подвержены влиянию процессов коровой контаминации, изменения состава источников под влиянием флюидного и расплавного массопереноса и т.п. Небольшие различия в этой части спектров также весьма показательны. Наиболее обогащенными этими компонентами оказываются расплавы срединно-океанических хребтов, что может свидетельствовать о наименьших степенях плавления и глубинах магмообразования для этой обстановки.

4. Увеличение нормализованных содержаний элементов с увеличением степени несовместимо-

Таблица 5. Отношения элементов в магматических расплавах основного состава ($\text{SiO}_2 = 40\text{--}54$ мас. %) в главных геодинамических обстановках (I–VI) по данным изучения расплавных включений в минералах и закалочных стекол вулканических пород в разные периоды времени

Дата	<i>n</i>	I	<i>n</i>	II	<i>n</i>	III	<i>n</i>	IV	<i>n</i>	V	<i>n</i>	VI
H₂O/Ce												
2010	649	190 +80/–50	204	130 +130/–60	300	1310 +3040/–910	124	950 +4100/–770	152	70 +520/–60	63	880 +1000/–470
2022	2522	210 +90/–60	3250	180 +300/–110	739	1460 +3800/–1050	743	820 +1890/–570	714	70 +230/–50	217	550 +1070/–370
Ce/Pb												
2010	421	23.1 +8.4/–6.2	378	25.6 +16.8/–10.1	251	6.2 +3.8/–2.3	172	7.4 +6.1/–3.3	116	32.3 +15.5/–7.1	69	14.9 +9.9/–6.0
2022	4833	24.6 +7.7/–5.9	3506	28.3 +10.9/–7.9	1284	4.8 +4.1/–2.2	11244	5.9 +6.0/–3.0	839	14.7 +22.6/–8.9	463	13.8 +13.6/–6.8
K₂O/H₂O												
2010	1177	0.6 +0.4/–0.2	1194	1.0 +1.5/–0.6	872	0.4 +0.7/–0.2	429	0.7 +1.9/–0.5	553	1.9 +4.2/–1.3	196	0.3 +0.2/–0.10
2022	3756	0.6 +0.4/–0.2	5232	1.0 +2.1/–0.7	2651	0.4 +0.8/–0.3	1795	0.5 +0.7/–0.3	1921	2.0 +4.9/–1.4	421	0.3 +0.2/–0.1
K₂O/Cl												
2010	1288	11.7 +18.4/–7.1	1855	22.6 +26.7/–12.2	1459	7.9 +8.3/–4.1	1068	14.5 +13.4/–7.0	1219	14.7 +24.0/–9.1	142	3.2 +2.3/–1.3
2022	5593	14.3 +19.9/–8.3	8364	24.2 +27.4/–12.9	5350	7.1 +9.4/–4.0	4159	12.6 +15.4/–6.9	4578	19.4 +30.6/–11.8	478	5.5 +7.6/–3.2
La/Yb												
2010	1028	1.2 +1.1/–0.6	1044	2.7 +5.1/–1.8	526	2.4 +2.4/–1.2	211	6.1 +10.0/–3.8	236	13.9 +36.0/–10.0	123	1.6 +1.5/–0.8
2022	6754	1.2 +1.0/–0.5	6148	3.6 +5.7/–2.2	1678	2.1 +2.5/–1.1	1200	5.2 +5.6/–2.7	1701	12.3 +26.6/–8.4	537	1.5 +1.3/–0.7
Nb/U												
2010	477	42.7 +10.7/–8.5	446	50.7 +14.0/–11.0	391	5.4 +3.1/–2.0	164	12.8 +18.0/–7.5	222	25.4 +49.6/–16.8	76	2.3 +1.4/–0.9
2022	5186	45.1 +11.7/–9.3	3728	45.8 +13.2/–10.3	1343	6.3 +8.0/–3.5	1068	8.0 +13.5/–5.0	1003	33.5 +40.8/–18.4	451	15.7 +46.1/–11.7
Nb/Yb												
2010	733	1.1 +2.2/–0.7	835	6.0 +8.8/–3.6	494	0.9 +0.6/–0.4	208	3.7 +5.2/–2.2	257	11.6 +36.5/–8.8	78	0.4 +0.2/–0.2
2022	5980	1.1 +2.0/–0.7	5891	4.2 +6.8/–2.6	1636	0.8 +0.9/–0.4	1186	1.9 +2.8/–1.1	1701	10.0 +27.3/–7.3	525	0.7 +0.9/–0.4
Zr/Nb												
2010	892	24.2 +38.3/–14.8	897	8.8 +6.6/–3.8	616	38.1 +20.2/–13.2	235	17.9 +20.3/–9.5	313	6.4 +8.9/–3.7	132	47.1 +58.4/–26.1
2022	6171	23.0 +36.0/–14	6119	9.8 +7.2/–4.1	1867	34.5 +32.2/–16.7	1314	21.7 +21.5/–10.8	1996	6.5 +7.9/–3.6	545	34.8 +41.6/–19.0
Th/Ta												
2010	503	1.0 +0.3/–0.2	343	1.0 +0.4/–0.3	100	6.6 +12.6/–4.3	129	2.8 +5.9/–1.9	170	1.4 +1.0/–0.6	64	3.9 +16.4/–3.1

Таблица 5. Окончание

Дата	<i>n</i>	I	<i>n</i>	II	<i>n</i>	III	<i>n</i>	IV	<i>n</i>	V	<i>n</i>	VI
2022	4814	1.0 +0.3/–0.2	2606	1.1 +0.3/–0.2	861	4.8 +9.4/–3.2	801	5.3 +7.6/–3.1	786	1.8 +1.9/–0.9	407	2.1 +3.8/–1.3
Th/Yb												
2010	632	0.1 +0.2/–0.1	464	0.6 +0.9/–0.4	421	0.3 +0.4/–0.2	167	0.7 +1.2/–0.4	255	1.5 +4.0/–1.1	41	0.1 +0.6/–0.1
2022	5299	0.1 +0.2/–0.1	3200	0.6 +1.0/–0.4	1432	0.3 +0.6/–0.2	1097	0.7 +0.6/–0.3	1093	1.5 +2.8/–1.0	484	0.2 +0.4/–0.1
Th/U												
2010	578	2.7 +0.8/–0.6	463	3.5 +1.4/–1.0	343	1.7 +1.0/–0.6	171	2.5 +1.2/–0.8	248	3.4 +1.4/–1.0	48	2.6 +0.8/–0.6
2022	5546	3.0 +0.8/–0.6	3289	3.3 +0.8/–0.7	1371	2.2 +1.6/–0.9	1076	2.6 +1.2/–0.8	1023	3.8 +1.6/–1.1	433	2.9 +1.2/–0.8
Ba/Rb												
2010	636	11.1 +2.9/–2.3	629	11.4 +5.2/–3.6	184	13.5 +8.8/–5.3	190	28.0 +28.6/–24.2	194	11.1 +8.7/–4.9	165	10.5 +6.2/–3.9
2022	5298	11.0 +2.7/–2.2	4874	11.5 +4.5/–3.2	1247	12.8 +13.1/–6.5	1137	22.8 +21.6/–11.1	1343	12.8 +9.9/–5.6	578	9.6 +3.9/–2.8
P₂O₅/F												
2010	309	7.6 +5.0/–3.0	1000	5.3 +3.8/–2.2	527	4.0 +4.2/–2.0	95	4.2 +5.0/–2.3	412	2.6 +8.4/–2.0	–	–
2022	2314	7.6 +3.4/–2.3	4544	4.8 +4.2/–2.2	1713	4.9 +7.2/–2.9	1240	6.1 +6.7/–3.2	1971	3.3 +9.1/–2.4	159	9.4 +9.9/–4.8
TiO₂/Dy												
2010	1030	2800 +840/–650	929	4100 +1900/–1300	494	2900 +750/–600	196	3400 +1000/–790	239	3300 +2700/–1500	99	2700 +490/–420
2022	6029	2800 +610/–500	5734	4190 +1850/–1280	1542	2720 +950/–700	1091	3300 +1180/–870	1387	3910 +2770/–1620	460	2720 +630/–510

сти в целом повторяет характер распределения элементов в среднем составе континентальной коры. В то же время, простая модель прямой контаминации мантийных расплавов (типа обедненных расплавов обстановки I) коровым материалом неприемлема, поскольку средние содержания некоторых несовместимых элементов в основных расплавах оказываются выше, чем в континентальной коре. Например, содержания Ta составляют 0.7 ppm, La – 20 ppm в континентальной коре (Rudnick, Gao, 2003), а в расплавах обстановки V они равны 1.47 ppm и 30.2 ppm, соответственно. Более перспективными представляются модели, включающие образование и миграцию небольших порций высокообогащенных расплавов или флюидов, модифицирующих составы мантийных источников и (или) мантийных магм.

5. Расплавы, связанные с обстановками континентальных окраин (III и IV), отличаются резкими вариациями в левой части спектров, что

обычно описывается в терминах геохимических аномалий. Ярким примером таких аномалий является широко известная отрицательная Ta-Nb аномалия. При этом вопрос о ее природе до сих пор остается спорным. Существенное понижение содержаний Nb и Ta в расплавах не может быть следствием смешения магм из разных источников, поскольку уровень концентраций этих элементов очень низкий (особенно для обстановки III, где содержания Nb и Ta ниже, чем в основных магмах срединно-океанических хребтов). Вероятно, Nb и Ta удерживались в твердом рестите в ходе плавления. Эти элементы избирательно концентрируются, например, в составе рутила, однако основные расплавы, равновесные с рутилом, должны быть существенно обогащены Ti, чего в действительности не наблюдается.

6. Другой интересной особенностью основных расплавов обстановок III и IV является положительная Pb аномалия (высокое Ce/Pb отношение –

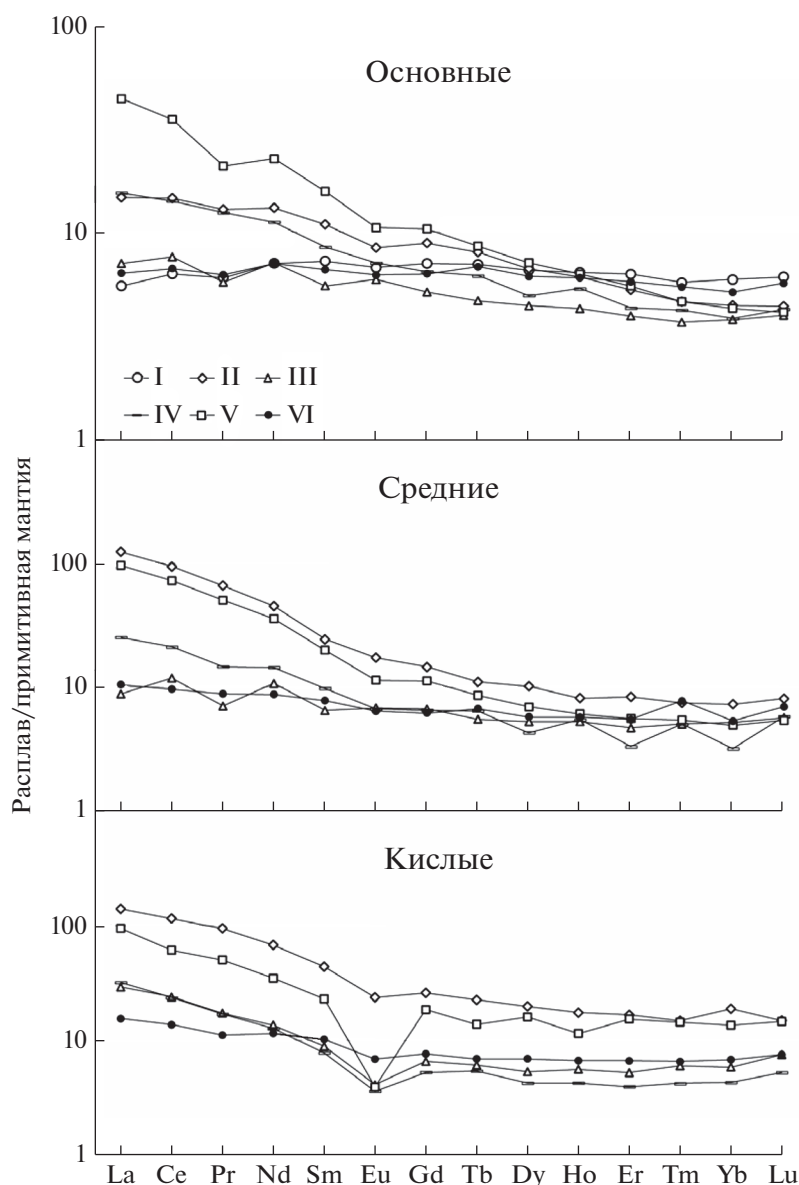


Рис. 4. Нормированное к составу примитивной мантии (по Sun, McDonough, 1989) распределение редкоземельных элементов в расплавах основного, среднего и кислого составов срединно-океанических хребтов (I), океанических островов (II), островных дуг (III), активных континентальных окраин (IV), внутриконтинентальных рифтов, областей континентальных горячих точек (V) и задугового спрединга (VI).

7.41 и 6.29, соответственно). Происхождение этой аномалии также дискуссионное. В ходе кристаллизации силикатных минералов из расплава, оба элемента являются сильно несовместимыми. Фракционирование Ce и Pb возможно при участии сульфидной фазы, поскольку Pb является типичным халькофильным металлом (Hart, Gaetani, 2006). Однако, сульфидные выделения обычны в основных магмах всех обстановок, в то время как Pb аномалия отчетливо проявлена только в двух из них. Другим возможным механизмом обогащения магм (или их источников) Pb относительно Ce является массоперенос в водных флюидах,

отделяющихся при дегидратации пород субдуцируемой плиты (Ayers, 1998). Отметим, что Pb аномалия характерна также для средних и кислых расплавов, причем в кислых расплавах она даже более ярко выражена, чем Nb аномалия.

В табл. 5 представлены некоторые средние отношения компонентов в магмах основного состава для разных обстановок. Отчетливо видно значительное увеличение количества определений элементов за прошедшие 12 лет. Эта информация дополняет на количественном уровне те выводы, которые можно сделать из рассмотрения спайдер-диаграмм. Во многих случаях интервалы ва-

риаций значительно перекрываются и существует группа отношений, которые очень мало меняются от обстановки к обстановке. Среди них — Th/U , $\text{P}_2\text{O}_5/\text{F}$ и TiO_2/Du . Эти отношения не чувствительны к геодинамическим обстановкам и их незначительные вариации, вероятно, связаны с локальными процессами. Остальные отношения распределяются более контрастно, но надо сказать, что не существует такого отношения, которое позволило бы достаточно надежно определить принадлежность состава к одной из шести обстановок. Более того, по многим показателям обстановки объединяются в более крупные группы, внутри которых различия незначительны. Например, обстановки, связанные с границами плит (III и IV), заметно отличаются от обстановок, связанных с мантийными плюмами, по отношениям Ce/Pb , Nb/U , Zr/Nb и Th/Ta . Обстановка I близка по некоторым показателям к плюмовым обстановкам (например, Th/Ta), по другим — к обстановкам III и IV (например, Zr/Nb). Обстановка I существенно отличается от всех остальных обстановок очень низкими отношениями La/Yb и Th/Yb (эти отношения могут выступать в качестве индикаторов обедненной мантии). Примечательно, что это обеднение не сопровождается существенными изменениями отношений сильно несовместимых элементов: так, отношения $\text{H}_2\text{O/Ce}$ и Ce/Pb в обстановках I и II близки, но заметно отличаются от III + IV. Интерпретация этих различий на количественном уровне представляет собой сложную задачу, поскольку они могут быть связаны с перераспределением компонентов при участии расплавов и флюидов, образовавшихся при разных термодинамических условиях. Вероятно, некоторые различия могут быть унаследованными от ранних периодов эволюции геосфер. В этом плане интересно было бы проследить изменение отношений элементов в однотипных расплавах от времени, но для древних комплексов таких данных пока еще очень мало.

ВЫВОДЫ

1. Значительно увеличилась наша база данных, включающая более 2600000 определений по 75 элементам в расплавных включениях в минералах и в закалочных стеклах вулканических пород. На основе этих данных проведено обобщение по средним содержаниям петрогенных, летучих, рудных и редких элементов в магматических расплавах главных геодинамических обстановок.

2. Подтверждено, что с точки зрения геохимической специфики все расплавы, данные о которых имеются в текущей версии базы данных, отчетливо укладываются в 6 типов, которые соответствуют выделенным ранее главным геодинамическим обстановкам. I — обстановки спрединга океаниче-

ских плит (срединно-океанические хребты), II — обстановки проявления мантийных плюмов в условиях океанических плит (океанические острова и лавовые плато), III и IV — обстановки, связанные с субдукционными процессами (III — зоны островодужного магматизма, заложенные на океанической коре, IV — зоны магматизма активных континентальных окраин, вовлекающие в процессы магнеообразования континентальную кору), V — обстановки внутриконтинентальных рифтов и областей континентальных горячих точек, VI — обстановки задугового спрединга (Наумов и др., 2010).

3. Установлен бимодальный тип распределения SiO_2 в природных магматических расплавах всех геодинамических обстановок: первый максимум определений приходится на содержания $\text{SiO}_2 = 50\text{--}52$ мас. %, а второй — на содержания $72\text{--}76$ мас. %. Минимальное количество определений приходится на содержания SiO_2 $62\text{--}66$ мас. %.

4. Построены спайдер-диаграммы, отражающие отношения средних содержаний элементов в магматических расплавах основного, среднего и кислого составов для I–VI обстановок к содержаниям этих элементов в примитивной мантии. На графиках отражены характерные особенности составов расплавов каждой геодинамической обстановки.

5. На основании обобщения данных по составам расплавных включений в минералах и стеклах пород оценены средние отношения некогерентных редких и летучих компонентов ($\text{H}_2\text{O/Ce}$, $\text{K}_2\text{O/Cl}$, Nb/U , Ba/Rb , Ce/Pb и др.) в магматических расплавах всех выделенных обстановок. Определены вариации этих отношений и показано, что в большинстве случаев отношения некогерентных элементов значимо различаются для различных обстановок. Особенно значительные различия наблюдаются для отношения элементов с разной степенью несовместимости (например, Nb/Yb) и некоторые отношения с участием летучих компонентов (например, $\text{K}_2\text{O/H}_2\text{O}$).

Авторы благодарны А.В. Лавренчуку, 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

Коваленко В.И., Наумов В.Б., Гирнис А.В., Дорофеева В.А., Ярмолук В.В. (2006) Оценка средних содержаний H_2O , Cl, F, S в деплетированной мантии на основе составов расплавных включений и закалочных стекол срединно-океанических хребтов. *Геохимия*. (3), 243–266.

Kovalenko V.I., Naumov V.B., Girmis A.V., Dorofeeva V.A., Yarmolyuk V.V. (2006) Estimation of the average content of

H₂O, Cl, F, and S in the depleted mantle on the basis of the compositions of melt inclusions and quenched glasses of mid-ocean ridge basalts. *Geochem. Int.* **44**, 209–231.

Коваленко В.И., Наумов В.Б., Гирнис А.В., Дорофеева В.А., Ярмолюк В.В. (2007) Средние составы магм и мантии срединно-океанических хребтов и внутриплитных океанических и континентальных обстановок по данным изучения расплавных включений и закалочных стекол базальтов. *Петрология*. **15**, 361–396.

Коваленко В.И., Наумов В.Б., Гирнис А.В., Дорофеева В.А., Ярмолюк В.В. (2009) Кислые агпаитовые расплавы островных дуг, активных континентальных окраин и внутриплитных континентальных обстановок (по данным изучения расплавных включений в минералах и закалочных стекол пород). *Петрология*. **17**, 437–456.

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. Intern.* **42** (10), 977–987.

Наумов В.Б., Коваленко В.И., Дорофеева В.А., Гирнис А.В., Ярмолюк 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., Giris 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., 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., Коваленкер В.А. (2022) 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. *Геохимия*. (4), 318–338.

Naumov V.B., Dorofeeva V.A., Giris A.V., Kovalenker V.A. (2022) Volatile, trace, and ore elements in magmatic melts and natural fluids: Evidence from mineral-hosted inclusions. I. Mean concentrations of 45 elements in the main geodynamic settings of the Earth. *Geochem. Int.* **60**, 325–344.

Anderson O.E., Jackson M.G., Rose-Koga E.F., Marske J.P., Peterson M.E., Price A.A., Byerly B.L., Reinhard A.A. (2021) Testing the recycled gabbro hypothesis for the origin of “Ghost Plagioclase” melt signatures using

⁸⁷Sr/⁸⁶Sr of individual olivine-hosted melt inclusions from Hawai’i. *Geochemistry. Geophysics. Geosystems*. **22**(4), 1–21.

Ayers J. (1998) Trace element modeling of aqueous fluid-peridotite interaction in the mantle wedge of subduction zones. *Contrib. Mineral. Petrol.* **132**, 390–404.

Bouvier A.-S., Metrich N., Deloule E. (2008) Slab-derived fluids in the magma sources of St. Vincent (Lesser Antilles Arc): Volatile and light element imprints. *J. Petrol.* **49**(8), 1427–1448.

Eiler J.M., Schiano P., Valley J.W., Kita N.T., Stolper E.M. (2007) Oxygen-isotope and trace element constraints on the origins of silica-rich melts in the subarc mantle. *Geochemistry. Geophysics. Geosystems*. **8**(9), 1–21.

Gale A., Dalton C.A., Langmuir C.H., Su Y., Schilling J.-G. (2013) The mean composition of ocean ridge basalts. *Geochem. Geophys. Geosystems*. **14**, <https://doi.org/10.1029/2012GC004334>

Harlow R., Pearson D.G., Nowell G.M., Ottley C.J., Davidson J.P. (2009) Combined Sr isotope and trace element analysis of melt inclusions at sub-ng levels using micro-milling, TIMS and ICPMS. *Chem. Geol.* **260**, 254–268.

Hart S.R., Gaetani G.A. (2006) Mantle Pb paradoxes: the sulfide solution. *Contrib. Mineral. Petrol.* **152**, 295–308.

Hartley M.E., de Hoog J.C.M., Shorttle O. (2021) Boron isotopic signatures of melt inclusions from North Iceland reveal recycled material in the Icelandic mantle source. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **294**, 273–294.

Kawaguchi M., Koga K.T., Rose-Koga E.F., Shimizu K., Ushikubo T., Yoshiasa A. (2022) Sulfur isotope and trace element systematics in arc magmas: Seeing through the degassing via a melt inclusion study of Kyushu Island volcanoes, Japan. *J. Petrol.* **63**(7), 1–31.

Layne G.D., Kent A.J.R., Bach W. (2009) $\delta^{37}\text{Cl}$ systematics of a backarc spreading system: The Lau Basin. *Geology*. **37**(5), 427–430.

Le Voyer M., Rose-Koga E.F., Laubier M., Schiano P. (2008) Petrogenesis of arc lavas from the Rucu Pichincha and Pan de Azucar volcanoes (Ecuadorian arc): Major, trace element, and boron isotope evidences from olivine-hosted melt inclusions. *Geochemistry. Geophysics. Geosystems*. **9**(12), 1–27.

Li X.H., Ren Z.G., Li S.Z., Zeng Z.G., Yang H.X., Zhang L. (2021) Geochemical and lead isotope compositions of olivine-hosted melt inclusions from the Yaeyama Graben in the Okinawa Trough: Implications for slab subduction and magmatic processes. *Lithos*. **398–399**, 106263.

Rudnick R.L., Gao S. (2003) Composition of the continental crust. *Treatise on Geochemistry* **3**, 1–64.

Sun S.S., McDonough W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: A.D.Saunders and M.J.Norry, Eds. *Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society Special Publication, London*. **42**, 313–345.

Wittenbrink J., Lehmann B., Wiedenbeck M., Wallianos A., Dietrich A., Palacios C. (2009) Boron isotope composition of melt inclusions from porphyry systems of the Central Andes: a reconnaissance study. *Terra Nova*. **21**, 111–118.