

СРЕДНЕЕ СОДЕРЖАНИЕ ЛЕТУЧИХ КОМПОНЕНТОВ, ПЕТРОГЕННЫХ И РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В МАГМАТИЧЕСКИХ РАСПЛАВАХ ГЛАВНЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ОБСТАНОВОК ЗЕМЛИ. II. РАСПЛАВЫ КИСЛОГО СОСТАВА

© 2019 г. В. Б. Наумов^{а,*}, В. А. Дорофеева^а, А. В. Гирнис^{б,**}, В. В. Ярмолюк^б

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

^бИнститут геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН
Россия, 119017 Москва, Старомонетный пер., 35
e-mail: *naumov@geokhi.ru ; **girnis@igem.ru

Поступила в редакцию 26.07.2017 г.

После доработки 28.02.2018 г.

Принята к публикации 05.06.2018 г.

В продолжение предыдущей работы на основе созданной нами базы данных, включающей на середину 2017 г. более 1 500 000 определений по 75 элементам в расплавных включениях и в закалочных стеклах пород, оценены средние содержания летучих, петрогенных и редких элементов в магматических расплавах кислого состава ($\text{SiO}_2 > 66$ мас.%) главных геодинамических обстановок Земли. Среди последних выделены следующие: 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 – внутриконтинентальные рифты и области континентальных горячих точек. Для каждой геодинамической обстановки средние содержания элементов и доверительные интервалы впервые рассчитаны в 3 вариантах: для расплавных включений в минералах, для закалочных стекол пород и совместно по всем данным. Установлены систематические различия средних составов расплавных включений и стекол пород для этих геодинамических обстановок. Построены спайдер-диаграммы, отражающие отношения среднего содержания элементов в магматических расплавах для всех обстановок к содержанию этих элементов в примитивной мантии. Проведено сравнение отношений ряда элементов и летучих соединений ($\text{H}_2\text{O}/\text{Ce}$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Cl}$, La/Yb , Nb/U , Ba/Rb , Ce/Pb и др.) в кислых и основных расплавах. Обсуждены вариации отношений одного из наиболее некогерентных элементов Th к другим элементам в кислых и основных расплавах.

Ключевые слова: расплавные включения, закалочные стекла, летучие компоненты, редкие элементы, геодинамические обстановки

DOI: 10.31857/S0016-7525644395-408

Статья является продолжением цикла работ, посвященных оценкам средних содержаний летучих, петрогенных и редких элементов в магматических силикатных расплавах главных геодинамических обстановок Земли (Наумов и др., 2004, 2010, 2017). Основой для таких расчетов служит созданная нами база данных, включающая на середину 2017 г. более 1 500 000 определений по 75 элементам в расплавных включениях и в закалочных стеклах пород. Среди главных геодинамических обстановок, различающихся по условиям формирования и эволюции магма-

тических расплавов, мы выделяем следующие: 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.

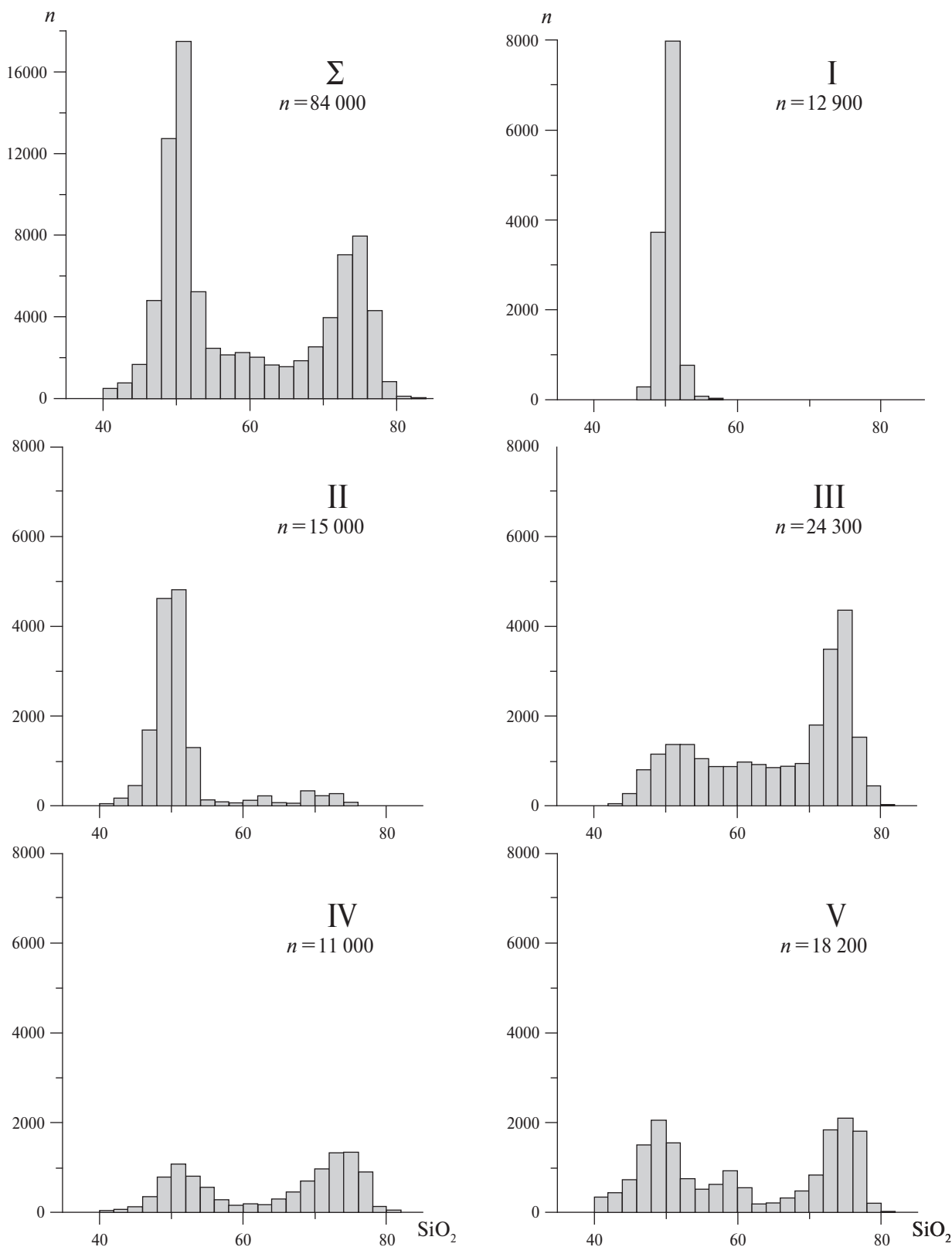


Рис. 1. Гистограммы распределения содержаний SiO_2 в природных магматических расплавах главных геодинамических обстановок по данным изучения гомогенных расплавных включений в минералах и закалочных стеклах пород. n — количество определений; Σ — все геодинамические обстановки, I — срединно-океанические хребты, II — океанические острова, III — островные дуги, IV — активные континентальные окраины, V — внутриконтинентальные рифты и области горячих точек.

На рис. 1 представлены гистограммы распределения содержаний SiO_2 в гомогенных расплавных включениях в минералах и в закалочных стеклах вулканических пород. Количество определений для всех геодинамических обстановок достигло 84 000 (на рис. 1 обозначено как Σ). Отчетливо видна бимодальность распределения содержаний SiO_2 в природных магматических расплавах. 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 $\text{SiO}_2 = 62\text{--}66$ мас.%. Расплавы основного состава ($\text{SiO}_2 < 54$ мас.%) характерны во всех геодинамических обстановок. В нашей предыдущей работе (Наумов и др., 2017) были рассмотрены только расплавы основного состава. Для каждой геодинамической обстановки средние содержания элементов и доверительные интервалы впервые были рассчитаны в 3 вариантах: для расплавных включений в минералах, для закалочных стекол пород и совместно по всем данным. На рис. 1 видно, что расплавы кислого состава ($\text{SiO}_2 > 66$ мас.%) в значительном количестве характерны только для геодинамических обстановок III, IV и V. Расчету средних содер-

жаний летучих, петрогенных и редких элементов в магматических расплавах кислого состава и посвящена настоящая работа.

СРЕДНИЕ СОСТАВЫ КИСЛЫХ МАГМАТИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ

В наших предыдущих работах (Наумов и др., 2004; 2010; 2017; Коваленко и др., 2006; Коваленко и др., 2007) было отмечено, что средние геометрические (а не средние арифметические) значения являются наиболее показательными. Это обусловлено типом распределения содержаний многих элементов, близким к логнормальному. К такому же выводу о логнормальном распределении содержаний редких элементов и предпочтительном использовании средних геометрических содержания пришли и другие исследователи (Gale et al., 2013). 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. Полученные данные

Таблица 1. Среднее содержание петрогенных, летучих и редких элементов в магматических расплавах кислого состава ($\text{SiO}_2 > 66$ мас.%) островных дуг (обстановка III) по данным изучения расплавных включений в минералах и закалочных стеклах вулканических пород

Компонент	Включения			Стекла			Включения + стекла		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
SiO_2	5229	73.67	+3.07/-2.95	8326	73.78	+2.59/-2.50	13555	73.76	+2.75/-2.65
TiO_2	4802	0.17	+0.26/-0.10	8129	0.21	+0.31/-0.13	12931	0.19	+0.30/-0.12
Al_2O_3	4963	12.36	+1.43/-1.28	8243	12.79	+1.36/-1.23	13206	12.64	+1.42/-1.28
FeO	4962	1.12	+0.68/-0.42	8249	1.22	+0.62/-0.41	13211	1.18	+0.64/-0.41
MnO	3959	0.06	+0.07/-0.03	7236	0.05	+0.09/-0.03	11195	0.05	+0.91/-0.03
MgO	4841	0.16	+0.30/-0.10	8112	0.20	+0.50/-0.15	12953	0.18	+0.44/-0.13
CaO	4956	0.94	+0.79/-0.43	8257	1.04	+0.64/-0.39	13213	1.00	+0.79/-0.44
Na_2O	4961	3.79	+0.90/-0.73	8242	3.92	+0.87/-0.71	13204	3.87	+0.88/-0.72
K_2O	4963	3.30	+1.22/-0.89	8258	3.31	+1.04/-0.79	13221	3.32	+1.10/-0.83
P_2O_5	1656	0.06	+0.16/-0.04	3837	0.04	+0.09/-0.03	5493	0.05	+0.11/-0.03
H_2O	2329	3.55	+2.11/-1.32	493	1.24	+2.22/-0.79	2822	2.84	+2.84/-1.42
Cl, ppm	3442	1840	+1430/-800	5110	1310	+750/-480	8552	1480	1100/-630
F	1189	390	+550/-230	3665	30	+2600/-30	4854	60	+750/-60
S	1239	140	+290/-90	3623	40	+150/-30	4862	90	+130/-50
CO_2	575	110	+260/-80	19	40	+610/-40	594	110	+280/-80
Сумма		99.42			97.97			99.26	
Li, ppm	1001	50.2	+42.0/-22.9	790	33.7	+29.9/-15.8	1791	41.9	+39.7/-20.4
Be	382	1.40	+0.94/-0.56	159	0.99	+0.87/-0.46	541	1.29	+0.94/-0.54
B	794	32.7	+36.1/-17.2	285	23.2	+21.8/-11.2	1079	29.7	+34.0/-15.9
Sc	230	5.60	+5.18/-2.69	631	7.74	+4.86/-2.99	861	7.30	+5.39/-3.10
V	257	4.83	+7.70/-2.97	394	3.30	+8.53/-2.38	651	3.67	+8.20/-2.54

Таблица 1. Окончание

Компо- нент	Включения			Стекла			Включения + стекла		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Cr	124	4.20	+10.65/-3.01	256	2.80	+5.90/-1.90	380	3.20	+7.35/-2.23
Co	65	0.93	+1.03/-0.49	261	1.09	+2.24/-0.73	326	1.03	+2.04/-0.68
Ni	88	1.64	+1.82/-0.86	247	1.28	+2.21/-0.81	335	1.37	+2.07/-0.82
Cu	353	2.76	+15.92/-2.35	477	16.0	+34.1/-10.9	830	6.97	+40.23/-5.94
Zn	428	35.2	+23.1/-13.9	334	32.5	+26.2/-14.5	762	34.6	+26.0/-14.8
Ga	75	16.95	+8.77/-5.78	325	15.70	+3.18/-2.64	400	15.81	+4.01/-3.20
Ge	-	-	-	18	1.75	+0.17/-0.16	18	1.75	+0.17/-0.16
As	270	4.25	+2.42/-1.54	61	4.02	+3.48/-1.87	331	4.22	+2.65/-1.63
Rb	977	111.1	+52.0/-35.4	1377	146	+158/-76	2354	130	+118/-62
Sr	1044	57.0	+54.5/-27.8	1383	84.7	+186.3/-58.2	2427	71.6	+108.3/-43.1
Y	1003	20.2	+12.5/-7.7	1308	25.6	+17.1/-10.2	2311	23.1	+15.5/-9.3
Zr	979	102.4	+77.6/-44.1	1307	133.9	+94.2/-55.3	2286	117	+96/-53
Nb	917	7.02	+2.95/-2.08	1376	8.58	+7.00/-3.85	2293	7.74	+5.21/-3.11
Mo	485	1.45	+0.72/-0.48	281	1.58	+0.82/-0.54	766	1.50	+0.77/-0.51
Sn	17	2.16	+0.92/-0.65	28	1.15	+0.45/-0.33	45	1.48	+0.94/-0.57
Sb	27	0.94	+1.54/-0.58	56	0.19	+0.53/-0.14	83	0.52	+1.14/-0.36
Cs	414	4.97	+3.47/-2.05	395	4.96	+5.16/-2.53	809	5.04	+4.26/-2.31
Ba	1026	700	+390/-250	1437	619	+757/-340	2463	640	+688/-332
La	1000	21.1	+10.3/-6.93	1343	28.3	+22.5/-12.7	2343	24.2	+15.5/-9.5
Ce	1023	42.1	+24.0/-15.3	1382	55.2	+34.3/-21.2	2405	47.5	+26.7/-17.1
Pr	345	4.31	+2.74/-1.68	949	6.94	+3.62/-2.38	1294	5.78	+3.06/-2.00
Nd	733	17.15	+8.31/-5.60	1103	24.7	+16.2/-9.8	1836	21.3	+13.0/-8.1
Sm	732	3.42	+1.77/-1.17	1084	4.93	+3.54/-2.06	1816	4.09	+2.61/-1.59
Eu	551	0.54	+0.48/-0.25	1013	0.83	+0.84/-0.42	1564	0.67	+0.77/-0.36
Gd	443	3.29	+1.40/-0.98	962	4.61	+2.78/-1.73	1405	4.11	+2.61/-1.60
Tb	76	0.64	+0.69/-0.33	401	0.67	+0.35/-0.23	477	0.67	+0.38/-0.24
Dy	530	3.44	+1.72/-1.14	1070	4.54	+2.70/-1.69	1600	4.11	+2.50/-1.55
Ho	77	0.99	+1.18/-0.54	400	0.94	+0.57/-0.36	477	0.95	+0.64/-0.38
Er	513	2.33	+1.02/-0.71	1067	2.86	+1.63/-1.04	1580	2.65	+1.53/-0.97
Tm	70	0.47	+0.47/-0.24	368	0.46	+0.34/-0.20	438	0.47	+0.36/-0.20
Yb	559	2.44	+1.33/-0.86	1052	3.07	+1.82/-1.14	1611	2.84	+1.68/-1.05
Lu	129	0.48	+0.44/-0.23	641	0.55	+0.32/-0.20	770	0.54	+0.35/-0.21
Hf	468	2.81	+0.87/-0.66	712	4.58	+3.03/-1.82	1180	3.61	+2.10/-1.33
Ta	411	0.75	+0.29/-0.21	1015	1.09	+1.26/-0.58	1426	0.99	+1.18/-0.54
W	113	1.39	+1.67/-0.76	274	1.61	+1.02/-0.63	387	1.50	+1.31/-0.70
Pb	681	16.47	+8.50/-5.61	796	19.9	+12.2/-7.6	1477	18.2	+10.9/-6.8
Bi	20	0.76	+0.78/-0.39	24	0.02	+0.01/-0.01	44	0.14	+0.98/-0.12
Th	771	11.27	+7.77/-4.60	1113	20.2	+28.4/-11.8	1884	14.2	+14.3/-7.1
U	730	2.79	+1.46/0.96	1078	2.67	+2.34/-1.25	1808	2.74	+2.00/-1.16
Se, ppb	-	-	-	12	204	+23/-21	12	204	+23/-21
Ag	148	42	+46/-22	30	29	+14/-9	178	40	+41/-20
Cd	-	-	-	19	192	+48/-38	19	192	+48/-38
In	-	-	-	17	98	+29/-22	17	98	+29/-22
Tl	14	560	+300/-195	36	130	+64/-43	50	230	+496/-157

Примечания. Здесь и в табл. 2–4: 1 – количество определений, 2 – среднее содержание, 3 – доверительный интервал (первая цифра – плюс к среднему, вторая цифра – минус от среднего). Содержание элементов рассчитывалось как среднее геометрическое при условии, что с вероятностью 95% величина отдельного определения не отклоняется от среднего значения более чем на 2 σ.

Таблица 2. Среднее содержание петрогенных, летучих и редких элементов в магматических расплавах кислого состава ($\text{SiO}_2 > 66$ мас.%) активных континентальных окраин (обстановка IV) по данным изучения расплавных включений в минералах и закалочных стеклах вулканических пород

Компонент	Включения			Стекла			Включения + стекла		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
SiO_2	3965	72.28	+3.54/-3.37	2014	74.78	+2.73/-2.64	5949	73.24	+3.57/-3.40
TiO_2	3601	0.21	+0.57/-0.15	1743	0.20	+0.40/-0.13	5344	0.22	+0.50/-0.15
Al_2O_3	3713	13.38	+2.45/-2.07	1752	12.84	+1.39/-1.25	5465	13.13	+2.08/-1.80
FeO	3730	1.22	+1.26/-0.62	1631	1.18	+0.59/-0.39	5361	1.21	+1.06/-0.56
MnO	3125	0.05	+0.10/-0.03	1293	0.05	+0.06/-0.03	4418	0.05	+0.09/-0.03
MgO	3385	0.21	+0.68/-0.16	1741	0.14	+0.35/-0.10	5126	0.19	+0.58/-0.14
CaO	3682	1.02	+1.37/-0.58	1887	0.93	+0.89/-0.45	5569	0.98	+1.26/-0.55
Na_2O	3694	3.65	+1.81/-1.21	1631	3.81	+1.08/-0.84	5325	3.70	+1.59/-1.11
K_2O	3742	3.62	+1.83/-1.21	1632	4.10	+1.38/-1.03	53.74	3.76	+1.71/-1.18
P_2O_5	2455	0.07	+0.24/-0.05	1287	0.05	+0.13/-0.03	3742	0.06	+0.19/-0.05
H_2O	2124	2.14	+2.37/-1.13	671	1.16	+1.76/-0.70	2795	1.81	+2.24/-1.00
Cl, ppm	2165	1410	+1440/-710	1055	700	+560/-310	3220	1100	+1410/-620
F	1068	710	+1860/-510	457	50	+440/-40	1525	540	+1630/-400
S	1257	60	+230/-50	541	30	+90/-20	1798	50	+190/-40
CO_2	568	40	+220/-30	258	10	+20/-10	826	30	+120/-20
Сумма		98.07			99.32			98.52	
Li, ppm	753	25.0	+45.2/-16.1	287	43.2	+44.7/-21.9	1040	28.9	+46.0/-17.7
Be	357	2.15	+1.35/-0.83	133	1.51	+0.95/-0.58	490	1.96	+1.34/-0.80
B	805	43.6	+79.2/-28.1	143	53.0	+50.0/-25.7	948	44.7	+75.1/-28.0
Sc	168	7.04	+5.26/-3.01	35	6.91	+8.87/-3.88	203	7.11	+5.54/-3.11
V	40	3.65	+5.13/-2.13	15	72.7	+218.6/-54.5	55	5.53	+19.87/-4.32
Cr	92	2.91	+6.12/-1.97	13	9.90	+43.97/-8.04	105	3.41	+8.72/-2.45
Cu	414	27.9	+59.7/-19.0	68	7.18	+3.18/-2.20	482	22.1	+53.6/-15.6
Zn	372	43.2	+42.1/-21.3	152	44.6	+15.9/-11.2	524	44.9	+34.1/-19.4
Ga	17	29.9	+11.3/-8.2	147	17.9	+1.9/-1.7	164	18.0	+2.9/-2.5
As	284	954	+10980/-878	137	16.1	+11.5/-6.7	421	142	+3430/-136
Rb	991	176	+780/-144	340	110	+55/-37	1331	128	+300/-90
Sr	942	76	+614/-68	85	105	+130/-58	1027	86	+553/-74
Y	565	14.9	+14.8/-7.4	85	17.6	+11.0/-6.8	650	15.5	+14.7/-7.5
Zr	632	115	+173/-69	87	116	+119/-59	719	115	+164/-67
Nb	645	8.81	+8.22/-4.25	83	9.86	+7.56/-4.28	728	8.93	+8.26/-4.29
Mo	261	24.2	+83.2/-18.7	148	1.64	+0.90/-0.58	409	7.04	50.70/-6.18
Sn	301	214	+734/-166	149	1.96	+0.67/-0.50	450	31.2	+872/-30.1
Sb	249	261	+1750/-227	113	0.98	+0.78/-0.43	362	31.1	+1270/-30.4
Cs	502	11.8	+319.7/-11.4	40	2.95	+5.53/-1.92	542	9.09	+182.2/-8.65
Ba	733	501	+1010/-335	88	630	+382/-238	821	521	+980/-340
La	485	17.9	+11.5/-7.0	80	21.8	+13.5/-8.3	565	18.6	+12.2/-7.3
Ce	527	36.1	+24.8/-14.7	82	43.5	+24.4/-15.6	609	37.0	+25.3/-15.0
Pr	66	4.29	+2.46/-1.56	52	5.33	+3.56/-2.13	118	4.75	+2.96/-1.82
Nd	340	15.0	+10.4/-6.1	70	17.6	+10.1/-6.4	410	15.5	+10.0/-6.1
Sm	191	3.13	+2.02/-1.23	322	3.31	+1.63/-1.09	513	3.23	+1.80/-1.16
Eu	179	0.59	+0.57/-0.29	202	0.53	+0.19/-0.14	381	0.56	+0.39/-0.23
Gd	180	2.86	+1.96/-1.16	67	3.68	+2.10/-1.34	247	3.04	+2.00/-1.21
Tb	30	0.92	+0.69/-0.39	23	0.60	+0.34/-0.22	53	0.70	+0.51/-0.30
Dy	179	3.09	+2.18/-1.28	67	3.25	+1.38/-0.97	246	3.18	+2.04/-1.24
Ho	46	0.74	+0.34/-0.23	23	0.59	+0.20/-0.15	69	0.69	+0.28/-0.20
Er	156	2.08	+1.56/-0.89	63	1.74	+0.87/-0.58	219	1.99	+1.42/-0.83
Tm	-	-	-	22	0.23	+0.06/-0.05	22	0.23	+0.06/-0.05
Yb	231	2.00	+1.62/-0.89	67	1.79	+0.82/-0.56	298	1.99	+1.56/-0.88
Lu	114	0.43	+0.29/-0.17	57	0.33	+0.20/-0.12	171	0.40	+0.28/-0.16

Таблица 2. Окончание

Компо- нент	Включения			Стекла			Включения + стекла		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Hf	176	4.47	+3.32/-1.90	189	3.03	+0.90/-0.69	365	3.43	+1.87/-1.21
Ta	322	2.64	+33.42/-2.45	61	1.02	+0.94/-0.49	383	1.61	+11.39/-1.41
W	234	61.2	+99.9/-37.9	-	-	-	234	61.2	+99.9/-37.9
Pb	248	14.42	+11.20/-6.30	309	20.40	+5.34/-4.23	557	18.27	+9.24/-6.14
Bi	225	8.24	+27.53/-6.34	-	-	-	225	8.24	+27.53/-6.34
Th	400	8.94	+19.27/-6.11	334	11.79	+4.69/-3.35	734	10.92	+13.20/-5.98
U	383	3.58	+6.57/-2.32	330	3.27	+1.17/-0.86	713	3.23	+2.93/-1.54
Ag, ppb	65	90	+460/-75	-	-	-	65	90	+460/-75
Re	-	-	-	29	14.8	+113/-64	29	14.8	+113/-64
Au	35	57	+152/-42	-	-	-	35	57	+152/-42
Tl	-	-	-	135	646	+196/-150	135	646	+196/-150

Таблица 3. Среднее содержание петрогенных, летучих и редких элементов в магматических расплавах кислого состава ($\text{SiO}_2 > 66$ мас.%) континентальных внутриплитных обстановок (обстановка V) по данным изучения расплавных включений в минералах и закалочных стеклах вулканических пород

Компо- нент	Включения			Стекла			Включения + стекла		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
SiO_2	4469	73.74	+2.90/-2.79	3215	75.32	+2.69/-2.69	7684	74.45	+3.04/-2.92
TiO_2	3470	0.10	+0.19/0.07	2473	0.10	+0.13/-0.06	5943	0.11	+0.16/-0.06
Al_2O_3	3701	12.39	+1.88/-1.63	2416	12.29	+1.07/-0.98	6117	12.35	+1.61/-1.42
FeO	3693	0.93	+1.01/0.49	2416	0.76	+0.66/-0.35	6109	0.85	+0.85/-0.42
MnO	2425	0.06	+0.16/-0.04	2181	0.04	+0.06/-0.02	4606	0.05	+0.11/-0.03
MgO	3329	0.04	+0.07/-0.02	2327	0.04	+0.08/-0.03	5656	0.04	+0.07/-0.02
CaO	3568	0.46	+0.42/-0.22	2410	0.54	+0.28/-0.19	5978	0.49	+0.37/-0.21
Na_2O	3682	3.73	+1.24/-0.93	2413	3.45	+0.95/-0.75	6095	3.61	+1.16/-0.88
K_2O	3706	4.63	+1.19/-0.94	2413	4.83	+0.71/-0.62	6119	4.73	+1.00/-0.82
P_2O_5	1405	0.03	+0.05/-0.02	486	0.02	+0.02/-0.01	1891	0.02	+0.04/-0.01
H_2O	2530	2.72	+2.55/-1.32	265	1.85	+2.28/-1.02	2795	2.53	+2.53/-1.26
Cl, ppm	2089	1530	+1950/-860	464	1870	+4010/-1270	2553	1520	+2030/-870
F	2056	3150	+10760/-2430	219	3150	+3160/-1580	2275	3300	+9750/-2460
S	342	90	+240/-70	188	130	+210/-80	530	110	+240/-70
CO_2	969	190	+400/-130	63	10	+30/-10	1032	180	+450/-130
Сумма		99.33			99.75			99.74	
Li, ppm	1575	93.3	+360.4/-74.1	920	41.9	+21.8/-14.3	2495	59.0	+116.5/-39.1
Be	848	8.85	+12.68/-5.21	43	7.49	+7.72/-3.80	891	8.72	+12.23/-5.09
B	1658	30.7	+52.8/-19.4	190	13.84	+9.95/-5.79	1848	28.1	+48.4/-17.8
Sc	467	3.59	+2.22/-1.37	934	6.52	+4.25/-2.57	1401	5.36	+4.20/-2.35
V	387	3.93	+3.12/-1.74	751	0.99	+3.25/-0.76	1138	1.60	+4.17/-1.15
Cr	138	3.66	+6.18/-2.30	538	2.87	+5.64/-1.90	676	3.03	+5.69/-1.98
Co	100	1.12	+5.78/-0.94	39	0.93	+7.18/-0.82	139	1.04	+6.29/-0.89
Ni	66	1.23	+4.11/-0.95	556	1.48	+4.15/-1.09	622	1.45	+4.05/-1.07
Cu	358	8.63	+47.26/-7.30	581	3.35	+11.60/-2.60	939	4.85	+20.91/-3.94
Zn	410	51.1	+84.0/-31.8	772	26.0	+27.7/-13.4	1182	33.2	+52.6/-20.4
Ga	166	25.3	+10.8/-7.6	701	17.48	+3.96/-3.23	867	18.46	+5.93/-4.49
Ge	-	-	-	64	1.89	+0.25/-0.22	64	1.89	+0.25/-0.22
As	271	9.54	+18.40/-6.28	39	2.07	+1.90/-0.99	310	8.22	+18.55/-5.69
Rb	2159	276	+382/-160	1109	171.9	+62.9/-46.1	3268	219	+226/-111
Sr	2016	2.47	+6.28/-1.77	1107	12.7	+43.9/-9.8	3123	3.92	+15.24/-3.12
Y	2064	45.1	+86.9/-29.7	1058	27.4	+41.7/-16.5	3122	37.6	+69.4/-24.4
Zr	2039	144	+319/-99	1091	118	+123/-60	3130	126	+175/-73
Nb	2108	52.9	+114.1/-36.2	1042	27.9	+34.5/-15.4	3150	41.5	+84.0/-27.8
Mo	783	5.42	+8.55/-3.32	84	3.25	+2.82/-1.51	867	5.03	+7.10/-2.94

Таблица 3. Окончание

Компо- нент	Включения			Стекла			Включения + стекла		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Sn	807	9.60	+14.90/-5.84	125	5.75	+2.53/-1.76	932	8.78	+12.66/-5.18
Sb	157	0.66	+0.42/-0.26	95	0.37	+0.10/-0.08	252	0.54	+0.37/-0.22
Cs	1123	13.0	+40.7/-9.8	922	4.49	+2.45/-1.59	2045	7.04	+15.65/-4.86
Ba	1670	10.1	+106.6/-9.2	1103	98.1	+710.9/-86.2	2773	24.1	+314/-22.4
La	1343	40.3	+76.5/-26.4	1087	38.5	+46.9/-21.1	2430	38.0	+60.7/-23.4
Ce	1963	72.4	+116.7/-44.6	1053	75.4	+83.0/-39.5	3016	72.8	+101.1/-42.3
Pr	884	7.59	+10.47/-4.40	994	7.45	+8.32/-3.93	1878	7.44	+8.95/-4.06
Nd	1271	30.7	+60.8/-20.4	1061	26.5	+30.1/-14.1	2332	27.5	+40.3/-16.3
Sm	1242	6.36	+12.66/-4.23	1048	5.33	+6.64/-2.95	2290	5.67	+9.09/-3.49
Eu	1004	0.41	+1.16/-0.30	958	0.41	+0.85/-0.28	1962	0.41	+0.99/-0.29
Gd	965	7.99	+16.54/-5.39	1012	4.80	+7.30/-2.90	1977	5.79	+10.93/-3.78
Tb	354	1.52	+2.68/-0.97	942	0.79	+0.85/-0.41	1296	0.85	+1.36/-0.52
Dy	997	9.31	+18.40/-6.18	985	4.70	+7.88/-2.94	1982	6.35	+12.43/-4.20
Ho	350	1.79	+2.96/-1.12	930	0.91	+1.14/-0.50	1280	0.94	+1.52/-0.58
Er	945	0.42	+1.28/-0.32	977	2.71	+4.55/-1.70	1922	4.10	+7.38/-2.63
Tm	281	0.78	+1.17/-0.47	914	0.52	+0.66/-0.29	1195	0.58	+0.72/-0.32
Yb	1129	5.04	+7.84/-3.07	1047	3.08	+4.17/-1.76	2176	3.83	+5.91/-2.32
Lu	355	0.92	+1.89/-0.62	968	0.56	+0.66/-0.30	1323	0.64	+0.80/-0.36
Hf	747	8.30	+14.97/-5.34	1028	4.39	+4.14/-2.13	1775	5.20	+6.18/-2.83
Ta	982	6.08	+9.36/-3.68	889	2.27	+2.07/-1.08	1871	3.66	+6.65/-2.36
W	460	7.14	+9.08/-4.00	696	2.79	+1.49/-0.97	1156	3.56	+4.44/-1.98
Pb	1377	38.0	+21.9/-13.9	995	33.8	+11.3/-8.5	2372	36.2	+17.3/-11.7
Bi	301	0.89	+1.17/-0.51	69	0.12	+0.06/-0.04	370	0.78	+1.23/-0.48
Th	1982	24.6	+23.4/-12.0	1052	20.02	+9.47/-6.43	3034	22.3	+17.8/-9.9
U	1688	10.1	+10.7/-5.2	1085	6.56	+3.18/-2.14	2773	8.01	+8.68/-3.64
Ag, ppb	137	139	+201/-82	68	69	+49/-29	205	110	+148/-63
Cd	-	-	-	57	136	+30/-25	57	136	+30/-25
In	-	-	-	57	103	+29/-23	57	103	+29/-23
Au	14	58	+111/-38	-	-	-	14	58	+111/-38
Tl	142	3580	+1520/-1070	3	-	-	145	3600	+1570/-1090

по средним содержаниям петрогенных, летучих и редких элементов представлены в табл. 1–3. Под каждой из полученных цифр среднего содержания приведены доверительные интервалы для этого значения (первая цифра – плюс к среднему, вторая цифра – минус от среднего).

ОБСУЖДЕНИЕ

Оценки средних составов расплавов из разных геодинамических обстановок свидетельствуют о разнообразии составов кислых магм, что согласуется со значительными вариациями геохимических характеристик кислых пород (Clemens, Stevens, 2012). Анализ данных для основных составов (Наумов и др., 2017) выявил систематические различия составов включений и стекол пород, что объяснялось разной историей расплавов при участии процессов дегазации и контаминации. На рис. 2 показаны отношения содержаний редких элементов в стеклах пород и включений

для кислых расплавов. Как и для основных составов, наблюдается существенное обеднение стекол пород CO_2 , что свидетельствует о дегазации расплавов в верхних частях магматических систем. Отклонения составов стекол пород от составов расплавных включений по другим элементам значительно менее существенны по сравнению с основными составами. Для конвергентных границ плит (обстановки III и IV) наблюдается некоторое обеднение стекол пород другими летучими элементами (H_2O , Cl, S) и очень сильное обеднение F. Для внутриплитных континентальных расплавов наблюдается только обеднение CO_2 . Для большинства других элементов составы стекол пород и включений значимо не различаются, учитывая большие колебания содержаний многих элементов (напр. Sr, Ba и др.). Интересно обеднение стекол пород относительно включений тяжелыми РЗЭ, хотя и не очень значительное, но систематическое и статистически значимое. Объяснение этого явления требует детального анализа

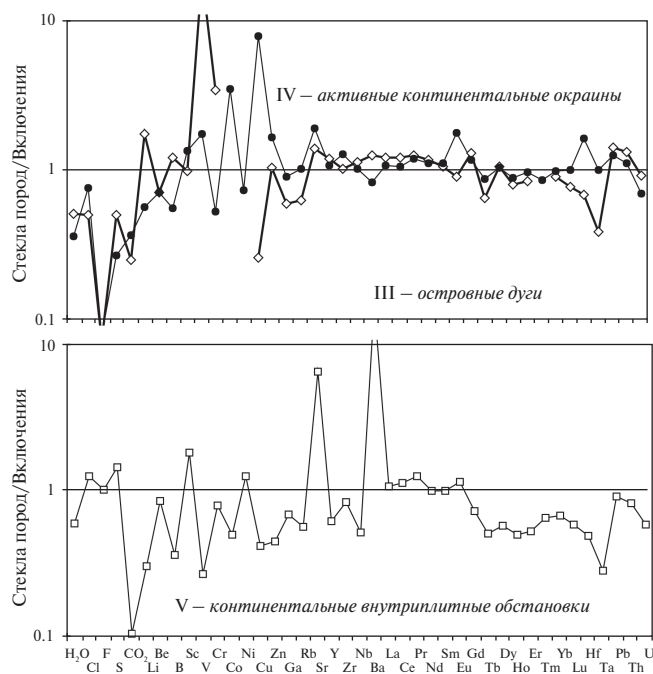


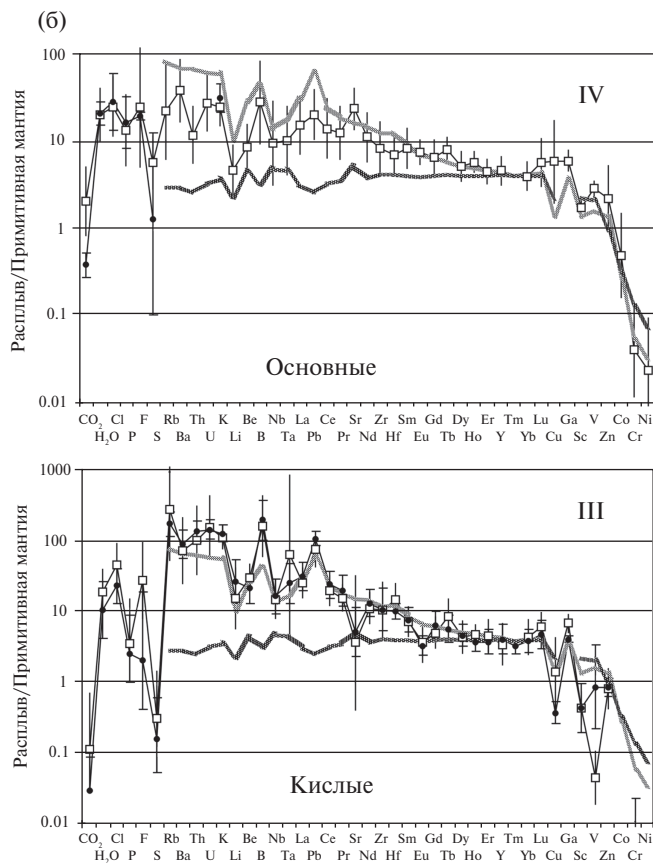
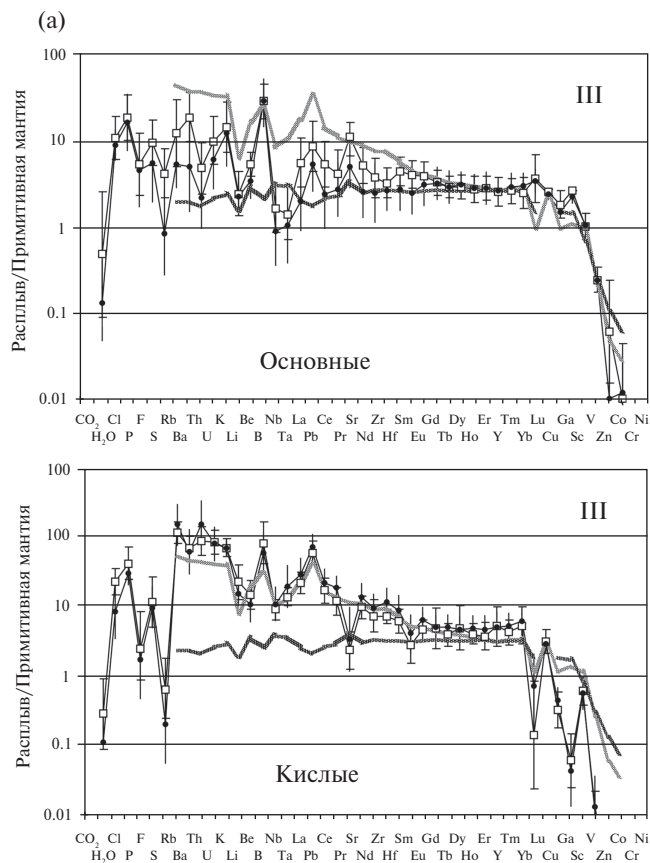
Рис. 2. Отношения содержаний элементов в стеклах и включениях кислого состава из геодинамических обстановок III–V.

данных для конкретных комплексов, и этот вопрос дальше пока не рассматривается.

На рис. 3 показаны составы кислых и основных расплавов, нормированные к содержанию

элементов в примитивной мантии (Palme, O'Neill, 2014). Составы кислых расплавов обстановок III и IV близки друг к другу и повторяют основные черты, отмеченные для основных расплавов (Наумов и др., 2017). Общий уровень содержаний элементов в кислых составах заметно выше, чем в основных, и очень близок к среднему составу континентальной коры (Rudnick, Gao, 2014), превышая этот уровень только для наиболее некогерентных литофильных элементов. Отметим отрицательные аномалии Sr, Eu (фракционирование плагиоклаза) и S (отделение сульфида) в кислых составах, которые не наблюдались в основных расплавах. Близкие геохимические характеристики кислых и основных расплавов позволяют предполагать единый генезис, т.е. образование кислых расплавов за счет кристаллизационной дифференциации основных, либо при частичном плавлении продуктов кристаллизации основных расплавов.

Распределение элементов в стеклах и включениях из внутриплитных пород (обстановка V) носит специфический характер. Отметим, прежде всего, что как основные, так и кислые расплавы характеризуются существенным обогащением по сравнению с расплавами из других обстановок и составом континентальной коры. В отличие от обстановок III и IV, кислые и основные составы



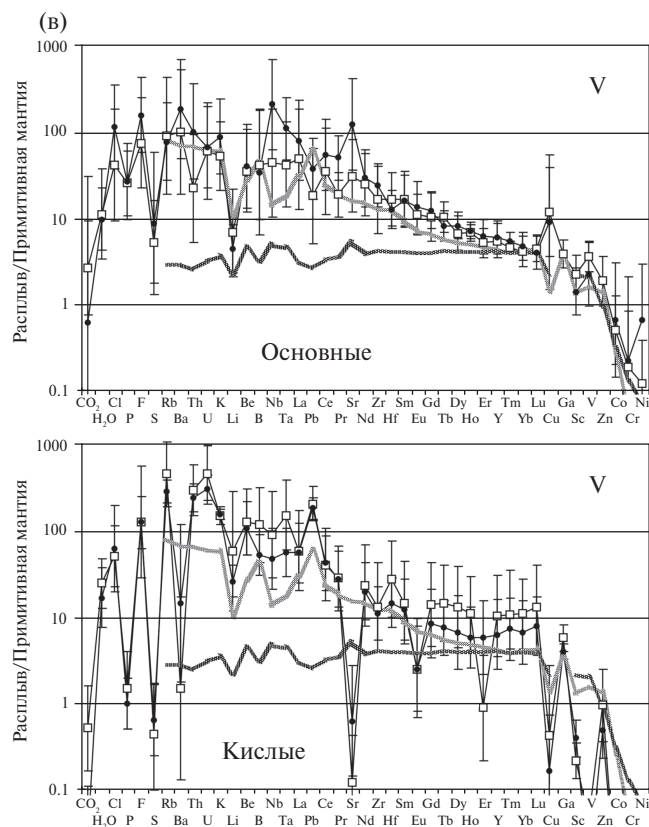
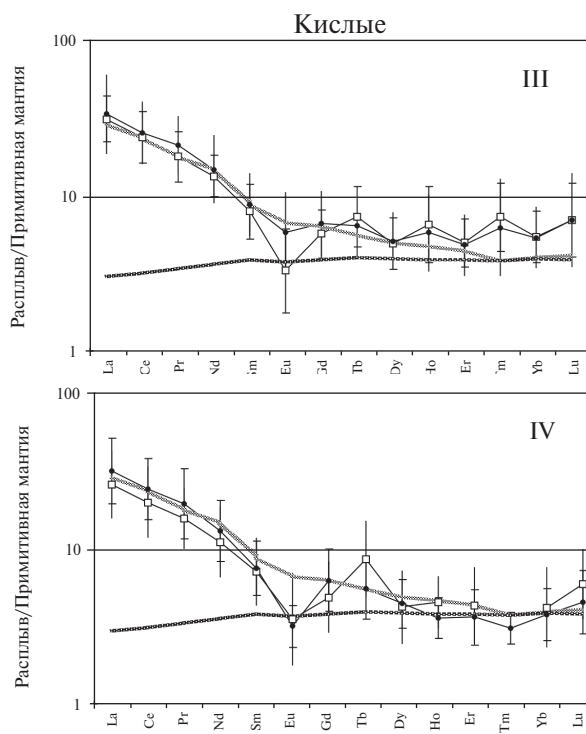
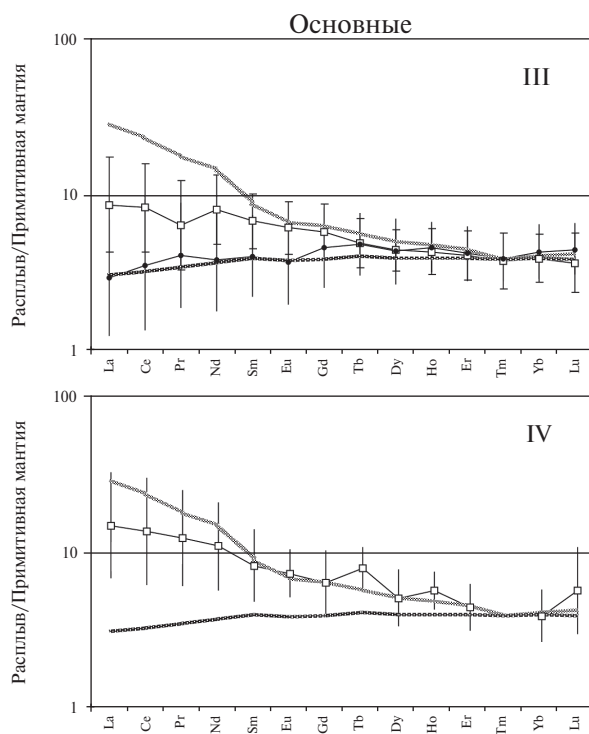


Рис. 3. Спайдер-диаграммы для основных и кислых расплавов. (а) — островные дуги, (б) — активные континентальные окраины, (в) — внутриконтинентальные рифты и области горячих точек. Серые линии — состав континентальной коры и океанической коры. Открытые символы — стекла, залитые — включения. Вертикальные линии — стандартные отклонения. Содержания нормированы к составу примитивной мантии (Palme, O'Neill, 2014).

обстановки V заметно различаются по характеру распределения редких элементов (рис. 4). Для основных составов наблюдается практически линейное увеличение содержаний РЗЭ от тяжелых к легким. В кислых расплавах тяжелые и средние РЗЭ характеризуются плоским распределением, в то время как содержания легких РЗЭ заметно повышены. В этом отношении кислые расплавы обстановки V напоминают составы обстановок III и IV, но при более высоких содержаниях тяжелых РЗЭ. Таким образом, основные и кислые расплавы обстановки V, скорее всего, не связаны общим источником. Основные расплавы с высокими содержаниями редких элементов и сильно фракционированными спектрами РЗЭ могут быть продуктами невысоких степеней плавления мантии в поле стабильности граната. Кислые расплавы образовывались из источника, близкого по составу к континентальной коре. Равномерное обогащение тяжелыми и средними РЗЭ может свидетельствовать о значительной роли амфибола в образовании кислых расплавов, поскольку распределение амфибол-расплав характеризуется как раз близкими и высокими коэффициентами распределения тяжелых РЗЭ и значительным понижением коэффициентов распределения к легким РЗЭ (Nandedkar et al., 2016).

На рис. 5 показано положение средних составов расплавов (совместно включений и стеклов пород) на диаграммах, часто используемых при диагностике геодинамического положения кислых магматических пород (Pearce et al., 1984;



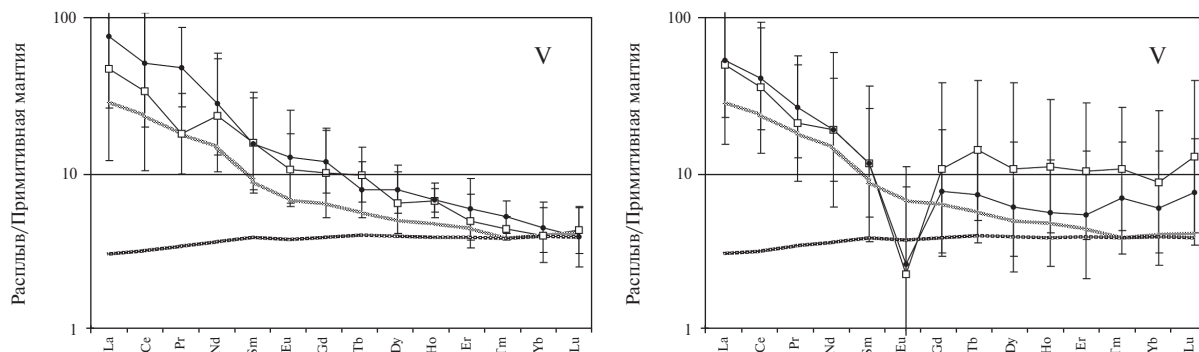


Рис. 4. Распределение нормированных содержаний РЗЭ в основных и кислых расплавах. Открытые символы — стекла, залитые — включения. Серые линии — состав континентальной коры (Rudnick, Gao, 2014) и океанической коры (White, Klein, 2014). Вертикальные линии — стандартные отклонения. Содержания нормированы к составу примитивной мантии (Palme, O'Neill, 2014).

Gorton, Schandl, 2000; Eby, 1992). Хорошо видно, что составы расплавов для каждой из обстановок характеризуются значительными вариациями, и интервалы составов в значительной степени перекрываются. Проблемы достоверности результатов применения геохимических критериев для определения геодинамических обстановок образования магм отмечались и другими авторами (Pearce et al., 1984) и связаны как с перекрытием составов исходных расплавов, так и с влиянием процессов фракционирования, аккумуляции и вторичных изменений. Средние составы, как правило, попадают в соответствующие поля диаграмм, но близко к границам полей. Исключением является положение среднего состава островодужных составов на диаграмме Th/Ta–Yb (Gorton, Schandl, 2000), отношение Th/Ta для которых заметно меньше, чем граничное значение. Такое соотношение расплавов свидетельствует о том, что разделение кислых пород на геохимических диаграммах связано не только с разными составами магматических расплавов, но и с разными процессами, влияющими на геохимические характеристики пород. Так, на диаграмме Rb–Y+Nb показан эффект аккумуляции главных минералов. Аккумуляция полевых шпатов и биотита приводит к противоположным эффектам, поэтому различия пород, содержащих избыточный полевой шпат и темноцветные минералы, будут более значительными по сравнению с составами расплавов.

В табл. 4 показаны отношения ряда элементов и летучих соединений в кислых и основных расплавах из обстановок III–V. Несмотря на значительные вариации, некоторые закономерности прослеживаются достаточно отчетливо и, вероятно, связаны с особенностями образования магм. Можно выделить следующие группы отношений. (1) Отношения, характеризующиеся очень

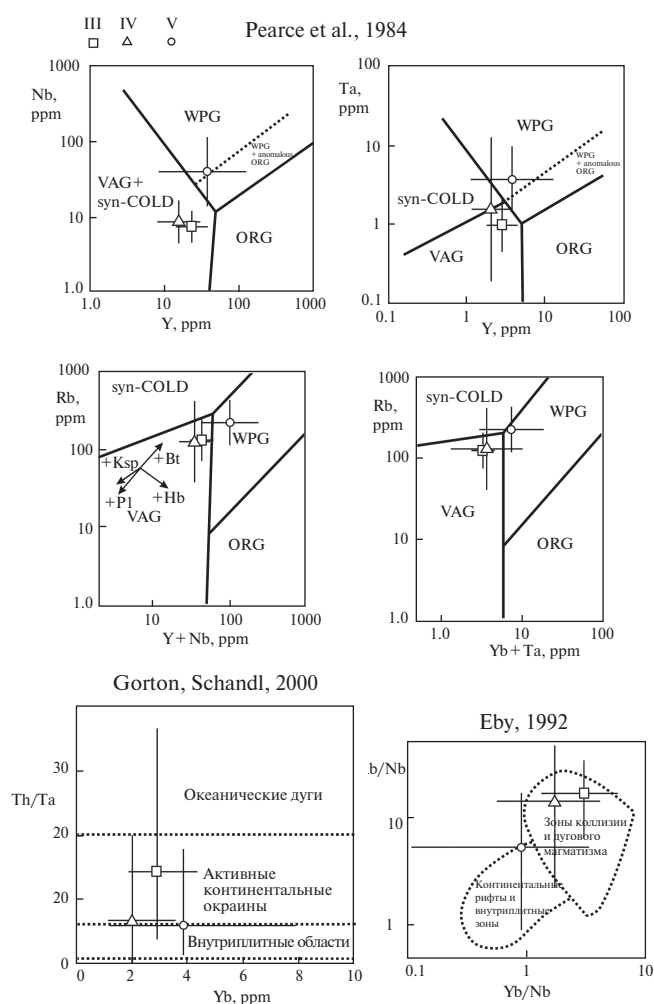


Рис. 5. Средние составы кислых (совместно стекла и включения) расплавов на дискриминантных диаграммах, используемых для определения геодинамической природы кислых вулканических пород и гранитоидов. Условные обозначения: WPG — внутриплитные граниты, VAG — граниты островных дуг, ORG — граниты срединно-океанических хребтов, syn-COLD — синколлизионные граниты. III–V — геодинамические обстановки.

небольшими вариациями как для кислых, так и для основных расплавов и близкие к значениям в примитивной мантии (Palme, O'Neill, 2014). Сюда входят отношения наиболее некогерентных литофильных элементов (Th/U, Zr/Hf, Pb/Ce, Ta/Nb, H₂O/Ce) и отношения умеренно некогерентных элементов, характеризующихся близкими коэффициентами распределения между минералами и расплавом (напр., Zr/Sm). (2) Отношения, близкие к мантийным значениям для основных пород, но значительно отклоняющиеся от них для кислых. Эта группа наиболее многочисленна и включает такие отношения, как K/Cl, U/Nb, Pb/H₂O, Zr/P, Rb/F, Rb/Ba, K/Sr и др. (3) Отношения, отличающиеся от мантийных значений как для кислых, так и для основных составов: Cl/H₂O, K/H₂O, Li/P, Y/Sc и др.

Вариации отношений одного из наиболее некогерентных элементов Th к другим элементам показаны на рис. 6. В большинстве случаев

разница между кислыми и основными расплавами намного больше, чем вариации в пределах каждой из групп. Разница между обстановками часто заметно больше в основных составах по сравнению с кислыми. Это особенно хорошо заметно для отношений Th к тяжелым лантаноидам (рис. 6а). В то же время существует несомненное сходство между кислыми и основными расплавами. Это согласуется с предположением о том, что кислые расплавы в самом общем виде являются производными основных. При этом возможно их образование либо непосредственно путем кристаллизационной дифференциации основных магм, либо за счет частичного плавления мафических магматических пород. Основные расплавы наследуют геохимические черты мантийных резервуаров, а влияние процессов плавления и кристаллизации на отношения наиболее некогерентных элементов (напр. Th/U, Nb/Ta) незначительно. В кислых расплавах степень фракционирования геохимически

Таблица 4. Отношения элементов в магматических расплавах кислого состава (SiO₂ >66 мас.%) в главных геодинамических обстановках (III – V) по данным изучения расплавных включений в минералах и закалочных стеклах вулканических пород

Отношения элементов	III			IV			V		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
H ₂ O/Ce	592	1050 (1530)	+990/-510	256	580 (1070)	+770/-330	1295	400 (50)	+1190/-300
Ce/Pb	1436	2.7 (4.6)	+1.2/-0.8	297	2.1 (6.3)	+2.0/-1.0	2301	2.0 (11.3)	+2.3/-1.1
K ₂ O/ H ₂ O	2554	0.9 (0.4)	+0.7/-0.4	2489	1.8 (0.5)	+2.6/-1.1	2251	1.5 (2.3)	+1.5/-0.7
K ₂ O/Cl	8389	21.7 (7.0)	+16.2/-9.3	3068	30.0 (11.7)	+47.8/-18.4	2553	30.9 (18.8)	+46.1/-18.5
La/Yb	1602	9.1 (2.2)	+7.3/-4.0	281	8.3 (5.4)	+7.8/-4.0	2156	9.0 (13.6)	+7.1/-4.0
Nb/U	1728	2.7 (5.4)	+1.0/-0.7	434	2.5 (12.5)	+2.9/-1.3	2697	4.6 (28.7)	+4.4/-2.2
Nb/Yb	1594	2.8 (0.7)	+3.4/-1.5	289	3.8 (2.5)	+5.2/-2.2	2117	10.2 (9.2)	+8.2/-4.5
Zr/Nb	2193	12.8 (40.4)	+14.8/-6.9	667	13.3 (19.3)	+28.4/-9.1	2978	2.9 (6.2)	+2.8/-1.4
Th/Ta	1125	17.3 (5.8)	+8.1/-5.5	229	10.5 (3.4)	+8.6/-4.7	1809	6.5 (1.7)	+4.9/-2.8
Th/Yb	1469	4.4 (0.3)	+4.4/-2.2	263	2.8 (0.6)	+5.5/-1.8	2088	6.0 (1.4)	+5.2/-2.8
Th/U	1805	3.9 (1.9)	+1.8/-1.2	707	2.8 (2.5)	+1.4/-0.9	2712	2.9 (3.6)	+1.2/-0.8
Ba/Rb	2353	5.5 (14.8)	+5.8/-2.8	860	5.2 (24.1)	+15.7/-3.9	2614	0.2 (11.9)	+1.6/-0.2
P ₂ O ₅ /F	3468	5.8 (4.3)	+40.8/-5.1	1175	1.4 (4.9)	+8.8/-1.2	1141	0.2 (2.2)	+0.9/-0.1
TiO ₂ /Dy	1564	400 (2700)	+580/-240	241	750 (3400)	+1360/-480	1216	100 (3600)	+200/-100
Nb/Ta	1418	12.2 (16.0)	+4.3/-3.2	253	8.8 (17.6)	+6.0/-3.6	1835	12.3 (19.4)	+5.1/-3.6
Zr/Hf	1172	32.0 (33.3)	+7.8/-6.2	227	32.2 (37.5)	+10.9/-8.2	1772	26.7 (41.3)	+10.6/-7.6
Zr/Sm	1746	29.7 (18.9)	+23.9/-13.2	253	39.9 (25.2)	+30.5/-17.3	2244	23.8 (23.9)	+16.1/-9.6
Y/Sc	852	3.2 (0.5)	+2.2/-1.3	160	2.4 (0.7)	+1.5/-0.9	1358	5.6 (0.9)	+16.6/-4.2
P ₂ O ₅ / H ₂ O	284	3.8 (2.2)	+4.0/-1.9	43	8.6 (1.7)	+14.2/-5.3	743	11.6 (21.0)	+18.0/-7.0
Zr/ P ₂ O ₅	545	0.3 (0.03)	+0.9/-0.2	639	0.3 (0.04)	+0.9/-0.2	1152	0.8 (0.04)	+3.0/-0.7
Rb/F	728	0.5 (0.04)	+0.6/-0.3	507	0.2 (0.02)	+0.6/-0.1	1204	0.2 (0.05)	+0.4/-0.1
K ₂ O/Sr	2376	500 (20)	+1000/-340	1168	1020 (10)	+5800/-870	2087	13800 (20)	+34200/-9850
Cl/ H ₂ O	2043	0.05 (0.04)	+0.05/-0.03	1559	0.05 (0.04)	+0.11/-0.04	1380	0.06 (0.23)	+0.13/-0.04
Li/ P ₂ O ₅	563	0.08 (0.004)	+0.5/-0.07	510	0.05 (0.004)	+0.3/-0.04	1014	0.3 (0.002)	+0.6/-0.2

Примечания. В скобках указаны отношения элементов в расплавах основного состава (SiO₂ = 40–54 мас.%).

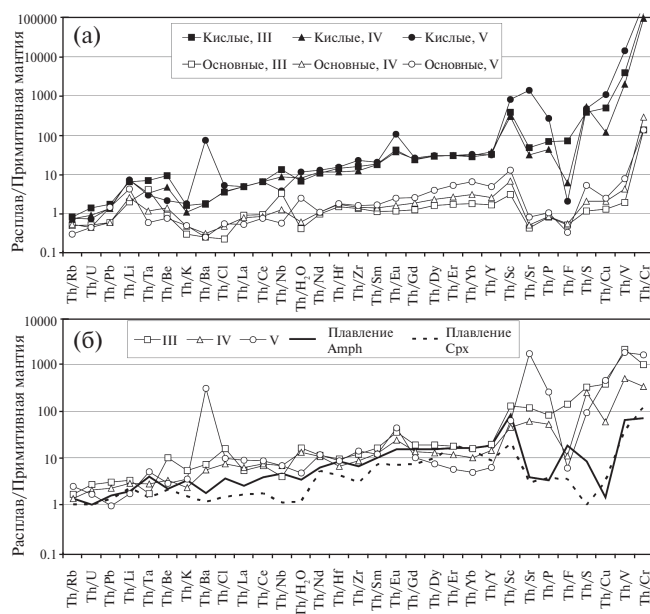


Рис. 6. Вариации средних отношений редких элементов в кислых и основных расплавах геодинамических обстановок III–V. (а) Отношения, нормированные к составу примитивной мантии (Palme, O'Neill, 2014). (б) Отношения средних показателей кислых и основных расплавов. Линиями без символов показаны соответствующие отношения для кислых расплавов, образующихся при частичном плавлении мафических пород, редкоэлементный состав которых определяется амфиболом или клинопироксеном.

родственных элементов возрастает, причем меняются даже такие отношения наиболее некогерентных элементов, как U/Nb и Rb/Ba (табл. 4). Это свидетельствует о том, что при переходе от основных расплавов (пород) к кислым должен участвовать минерал (или ассоциация минералов), характеризующийся сравнительно высокими коэффициентами распределения легких РЗЭ, Nb, Ta и пр. Как и при рассмотрении распределения содержаний элементов, такой возможной фазой является амфибол. Для проверки этой гипотезы на рис. 6б показаны отношения средних параметров кислых и основных расплавов, а также вариации тех же отношений в расплавах, образующихся при 8% плавлении мафического источника, состоящего из амфибола или клинопироксена. Расчет содержаний элементов в выплавках производился по простому уравнению равновесного плавления: $C_i = C_i^0 / [D_i(1-\alpha) + \alpha]$, где C_i и C_i^0 — содержания элемента i в кислом расплаве и источнике (представленном в данном случае средним составом основных расплавов), D_i — коэффициент распределения элемента между минералом и расплавом и α — степень плавления. Использовались экспериментальные данные по распределению редких и летучих элементов между амфиболом (Hilyard et al., 2000;

Condamine, Medard, 2014; Van den Bleeken, Koga, 2015; Nandedkar et al., 2016; и др.) или клинопироксеном (Forsythe et al., 1994; Barth et al., 2002; Huang et al., 2006; Landwehr et al., 2001; Van den Bleeken, Koga, 2015; и др.) и силикатным расплавом, содержащим >55 мас% SiO_2 . Такой упрощенный подход в данном случае оправдан, поскольку мы рассматриваем наиболее общую схему процесса, используя только усредненные составы.

Результаты расчета показывают, что плавление амфиболового источника в целом неплохо воспроизводит распределение элементов в кислых расплавах. Коэффициенты распределения элементов между клинопироксеном и расплавом оказываются слишком низкими для многих некогерентных элементов, поэтому плавление клинопироксенового материала не может объяснить фракционирование, например, Th-Nb, Th-La и Th-Zr. Поведение некоторых элементов определенно контролируется другими фазами, причем в большинстве случаев идентификаций таких фаз достаточно очевидна — плагиоклаз для Sr, апатит для P, сульфид для S и халькофильных элементов и оксидные минералы для Cr и V. Конечно, плавление амфибол-содержащих пород или кристаллизация амфибола в основных расплавах — не единственные процессы, влияющие на отношения наиболее некогерентных элементов. К сходному результату могут привести, например, кристаллизация акцессорных минералов, отделение флюидов, контаминация и пр. Но, учитывая широкое распространение амфибола в средних и кислых породах и их источниках, можно утверждать, что амфибол, несомненно, играл важную роль в формировании геохимических характеристик кислых расплавов.

Другой интересный вопрос — причина значительно больших различий между геодинамическими обстановками в отношении составов основных расплавов по сравнению с кислыми. Эта разница хорошо проявлена на рис. 6а. Такая особенность кислых расплавов вряд ли может быть следствием процессов частичного плавления и кристаллизации. По нашему мнению, возможное объяснение заключается в том, что источник кислых расплавов (коровый разрез) может быть гетерогенным и включать породы, образовавшиеся в разных геодинамических обстановках. В результате, разница составов источников в значительной степени нивелируется, и кислые расплавы всех обстановок оказываются похожими друг на друга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Существенно расширена фактическая основа базы данных по составу расплавных включений в минералах и в закалочных стеклах магматических пород (более 1 500 000 определений по 75 элементам). На этой основе выполнено обобщение по средним содержаниям петрогенных, летучих и редких элементов в магматических расплавах кислого состава, возникших в главных геодинамических обстановках: III и IV — в обстановках конвергентных границ плит (III — островные дуги, IV — активные континентальные окраины), V — во внутриконтинентальных рифтах и горячих точках мантии. Для каждой геодинамической обстановки средние содержания элементов и доверительные интервалы впервые рассчитаны в 3 вариантах: для расплавных включений в минералах, для закалочных стекол пород и совместно по всем данным.

2. Установлены систематические различия между средними составами включений и стекол пород из одних и тех же обстановок. Эти различия связаны с тем, что включения захватывались на более глубоких уровнях и при кристаллизации в среднем менее дифференцированных расплавах по сравнению со стеклами пород, формирующимися из остаточных расплавов в поверхностных условиях.

3. Построены спайдер-диаграммы, отражающие отношения средних содержаний элементов в магматических расплавах для III–V обстановок к содержаниям этих элементов в примитивной мантии (рис. 3). На графиках отражены характерные особенности составов расплавов каждой геодинамической обстановки.

4. На основании обобщения данных по составам расплавных включений и стекол пород оценены средние отношения некогерентных редких и летучих компонентов (H_2O/Se , K_2O/Cl , Nb/U , Ba/Rb , Ce/Pb и др.) в магматических расплавах всех выделенных обстановок. Определены вариации этих отношений и показано, что большинство отношений 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, K_2O/Cl).

Благодарности

Авторы благодарят Н.Л. Миронова за обсуждение результатов и ценные замечания и пожелания к рукописи статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Коваленко В.И., Наумов В.Б., Гирнис А.В., Дорофеева В.А., Ярмолюк 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., Girnits A.V., Dorofeeva V.A., Yarmolyuk V.V. (2006) Estimation of the average contents of the H_2O , Cl , F , and S in the depleted mantle on the basis of the compositions of melt inclusions and quenched glasses of mid-oceanic ridge basalts. *Geochem. Int.* **44** (3), 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** (4), 361–396.
- 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., Ярмолюк В.В. (2010) Средний состав магматических расплавов главных геодинамических обстановок по данным изучения расплавных включений в минералах и закалочных стеклах пород. *Геохимия* (12), 1266–1288.
- Naumov V.B., Kovalenko V.I., Dorofeeva V.A., Girnits 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., Дорофеева В.А., Гирнис А.В., Ярмолюк 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., Girnits 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.
- Barth M.G., Foley S.F., Horn I. (2002) Partial melting in Archean subduction zones: constraints from experimentally determined trace element partition coefficients between eclogitic minerals and tonalitic melts under upper mantle conditions. *Precambrian Res.* **113**, 323–340.
- Clemens J.D., Stevens G. (2012) What controls chemical variation in granitic magmas? *Lithos* **134–135**, 317–329.
- Condamine P., Medard E. (2014) Experimental melting of phlogopite-bearing mantle at 1 GPa: Implications for potassic magmatism. *Earth Planet. Sci. Lett.* **397**, 80–92.

- Eby G.N. (1992) Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications. *Geology* **20** (7), 641–644.
- Forsythe L.M., Nielsen R.L., Fisk M.R. (1994) High-field-strength element partitioning between pyroxene and basaltic to dacitic magmas. *Chem. Geol.* **117**, 107–125.
- 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**, doi:10.1029/2012GC004334
- Gorton, M.P., Schandl, E.S. (2000) From continents to island arcs: a geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks. *Canad. Mineral.* **38**, 1065–1073.
- Hilyard M., Nielsen R.L., Beard J.S., Patino-Douce A., Blencoe J. (2000) Experimental determination of the partitioning behavior of rare earth and high field strength elements between pargasitic amphibole and natural silicate melts. *Geochim. Cosmochim. Acta* **64** (6), 1103–1120.
- Huang F., Lundstrom C.C., McDonough W.F. (2006) Effect of melt structure on trace-element partitioning between clinopyroxene and silicic, alkaline, aluminous melts. *Am. Mineral.* **91**, 1385–1400.
- Landwehr D., Blundy J., Chamorro-Perez E.M., Hill E., Wood B. (2001) U-series disequilibria generated by partial melting of spinel lherzolite. *Earth Planet. Sci. Lett.* **188**, 329–348.
- Nandedkar R.H., Hurlimann N., Ulmer P., Muntener O. (2016) Amphibole–melt trace element partitioning of fractionating calc-alkaline magmas in the lower crust: an experimental study. *Contrib. Mineral. Petrol.* **171** (71), 1–25.
- Palme H., O'Neill H.St.C. (2014) Cosmochemical estimates of mantle composition. *Treatise on Geochemistry (second edition)* **3**, 1–39
- Pearce J.A., Harris N.B.W., Tindle A.G. (1984) Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.* **25**, 956–983.
- Rudnick R.L., Gao S. (2014) Composition of the continental crust. *Treatise on Geochemistry (second edition)* **4**, 1–51.
- Van den Bleeken G., Koga K.T. (2015) Experimentally determined distribution of fluorine and chlorine upon hydrous slab melting, and implications for F-Cl cycling through subduction zones. *Geochim. Cosmochim. Acta* **171**, 353–373.
- White W.M., Klein E.M. (2014) Composition of the oceanic crust. *Treatise on Geochemistry (second edition)* **4**, 457–496.

MEAN CONTENTS OF VOLATILE COMPONENTS, MAJOR AND TRACE ELEMENTS IN MAGMATIC MELTS FROM MAIN GEODYNAMIC SETTINGS OF THE EARTH. II. SILICIC MELTS

© 2019 V. B. Naumov^{a,*}, V. A. Dorofeeva^a, A. V. Girnisa^{b,**}, V. V. Yarmolyuk^b

^aVernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences, ul. Kosygina 19, Moscow, 119991 Russia

^bInstitute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, 35 Staromonetnyi, Moscow, 119017 Russia
e-mail: *naumov@geokhi.ru; **girnisa@igem.ru

Received: 26.07.2017

Received version received: 28.02.2018

Accepted: 05.06.2018

As a continuation of our previous study, we estimated the mean contents of volatile, major, and trace components in silicic (>66 wt % SiO₂) magmatic melts from main terrestrial geodynamic settings on the basis of our database, which includes (as of middle 2017) more than 1 500 000 determination of 75 elements in melt inclusions and quench glasses from rocks. Among the geodynamic settings are those related to subduction processes (III, island-arc zones originated on oceanic crust and IV, magmatic zones of active continental margins, where continental crust is involved in magma formation) and intracontinent rift and continental hot-spot regions (V). For each geodynamic setting, we calculated the mean contents of elements with confidence limits separately for melt inclusions and groundmass glasses and for the entire data set. Systematic differences were found between the mean compositions of melt inclusions and groundmass glasses from these geodynamic settings. Primitive mantle normalized spider diagrams were constructed for all geodynamic settings. Some ratios of elements and volatile components (H₂O/Ce, K₂O/Cl, La/Yb, Nb/U, Ba/Rb, Ce/Pb, etc.) in silicic and mafic melts were compared. Variations in the ratios of various elements to Th, which is one of the most incompatible elements in silicic and mafic melts, were discussed.

Keywords: melt inclusion, quench glass, volatile component, trace element, geodynamic setting

(For citation: Naumov V.B., Dorofeeva V.A., Girnisa A.V., Yarmolyuk V.V. Mean Contents of Volatile Components, Major and Trace Elements in Magmatic Melts from Main Geodynamic Settings of the Earth. II. Silicic Melts. *Geokhimiya*. 2019;64(4):395–408. DOI: 10.31857/S0016-7525644395-408)