

УДК 552.313

В.Д. Щербаков<sup>1</sup>, Н.А. Некрылов<sup>2</sup>, Г.Г. Савостин<sup>3</sup>, Д.В. Попов<sup>4</sup>, О.В. Дирксен<sup>5</sup>СОСТАВ РАСПЛАВНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В МИНЕРАЛАХ ТЕФР  
ПОЧВЕННО-ПИРОКЛАСТИЧЕСКОГО ЧЕХЛА ОСТРОВА СИМУШИР  
(ЦЕНТРАЛЬНЫЕ КУРИЛЫ)<sup>6</sup>

Представлены результаты исследования состава ~70 природно-закаленных расплавных включений во вкрапленниках оливина, клинопироксена, ортопироксена и плагиоклаза из тефр почвенно-пирокластического чехла о. Симушир (Центральные Курилы). Во включениях измерено содержание основных петрогенных компонентов, H<sub>2</sub>O, S и Cl. Реконструированные расплавы содержат 48,6–78,4 масс.% SiO<sub>2</sub>, 0,3–8,26 масс.% MgO и 0,12–1,72 масс.% K<sub>2</sub>O. Содержание S и Cl в расплавах закономерно изменяется с увеличением количества SiO<sub>2</sub>: от 0,14 до ~0,02 масс.% S и от ~0,05 до ~0,28 масс.% Cl. Содержание воды в родоначальных расплавах составляет 4,2–4,5 масс.%.

*Ключевые слова:* расплавные включения, летучие компоненты, Симушир, Курилы.

In the work the composition of nearly 70 naturally-quenched olivine-, plagioclase-, clinopyroxene and orthopyroxene-hosted melt inclusions from tephra of Simushir island (Central Kuriles) was studied. For the inclusions measurements of main petrogenic components, H<sub>2</sub>O, S and Cl were conducted. Reconstructed melts contain 48,6–78,4 wt.% SiO<sub>2</sub>, 0,3–8,26 wt.% MgO and 0,12–1,72 wt.% K<sub>2</sub>O. Content of S and Cl in melts changes naturally with increasing of SiO<sub>2</sub>: S — from 0,14 to 0,02 wt.% and Cl — from 0,05 to 0,28 wt.%. Water content in parental melts is 4,2–4,5 wt.%.

*Key words:* melt inclusions, volatiles, Simushir, Kuriles.

**Введение.** Курильская островная дуга занимает около 2% суммарной длины зон субдукции и насчитывает около 40 действующих вулканических центров. Среди пород Курильской островной дуги, в отличие от Камчатки, мало распространены высокомагнезиальные лавы. Магматическая система о. Симушир, состоящая из нескольких эруптивных центров (влк. Заварицкого, Прево, Горящая Сопка, Уратман, Мильна), характеризуется разнообразием вулканических продуктов: от оливинсодержащих базальтов до дацитов, что позволяет охарактеризовать как состав родоначальных расплавов, так и их эволюцию в коровых условиях.

Предшествующие исследования вулканитов о. Симушир проводились на основе данных о валовом содержании петрогенных и рассеянных элементов в лавах [Мартынов и др. 2010; Парфенова и др. 2015]. Согласно этим работам вулканиты относятся к низко- и умереннокалиевой сериям. На основе их изотопных характеристик предполагается образование магм при плавлении источника MORB индийского типа под воздействием флюида субдуцирующей литосферы. Обедненность

рядом рассеянных элементов связывают с предшествующими относительно молодыми эпизодами плавления сегмента мантии под островами Курильской дуги к югу от о. Шиашкотан. Среди опубликованных данных нет анализов пород высокомагнезиального состава.

Исследования состава расплавов на основе изучения расплавных включений позволяют детальнее охарактеризовать магматическую систему о. Симушир, а также оценить содержание летучих компонентов. Расплавные включения в оливине в условиях малой распространенности магнезиальных лав представляют собой более корректный (по сравнению с валовой геохимией) источник информации о примитивных расплавах и позволяют характеризовать мантийный источник и условия его плавления в надсубдукционной обстановке [Portnyagin et al., 2007].

В статье представлены результаты первой части исследования природно-закаленных расплавных включений в тефрах почвенно-пирокластического чехла, их цель реконструировать содержание петрогенных компонентов в расплавах вулканиче-

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра петрологии, ст. науч. с., канд. геол.-минерал. н.; *e-mail:* vasily7@gmail.com

<sup>2</sup> Минералогический музей имени А.Е. Ферсмана РАН, науч. с., канд. геол.-минерал. н.; *e-mail:* nekrilov.n@gmail.com

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра петрологии, студент; *e-mail:* grsavostin@gmail.com

<sup>4</sup> Университет Женевы, факультет наук о Земле, аспирант; *e-mail:* d.v.s.popov@gmail.com

<sup>5</sup> Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, ст. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail:* dirksen@kscnet.ru

<sup>6</sup> Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 15-17-20011) с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития Московского университета.

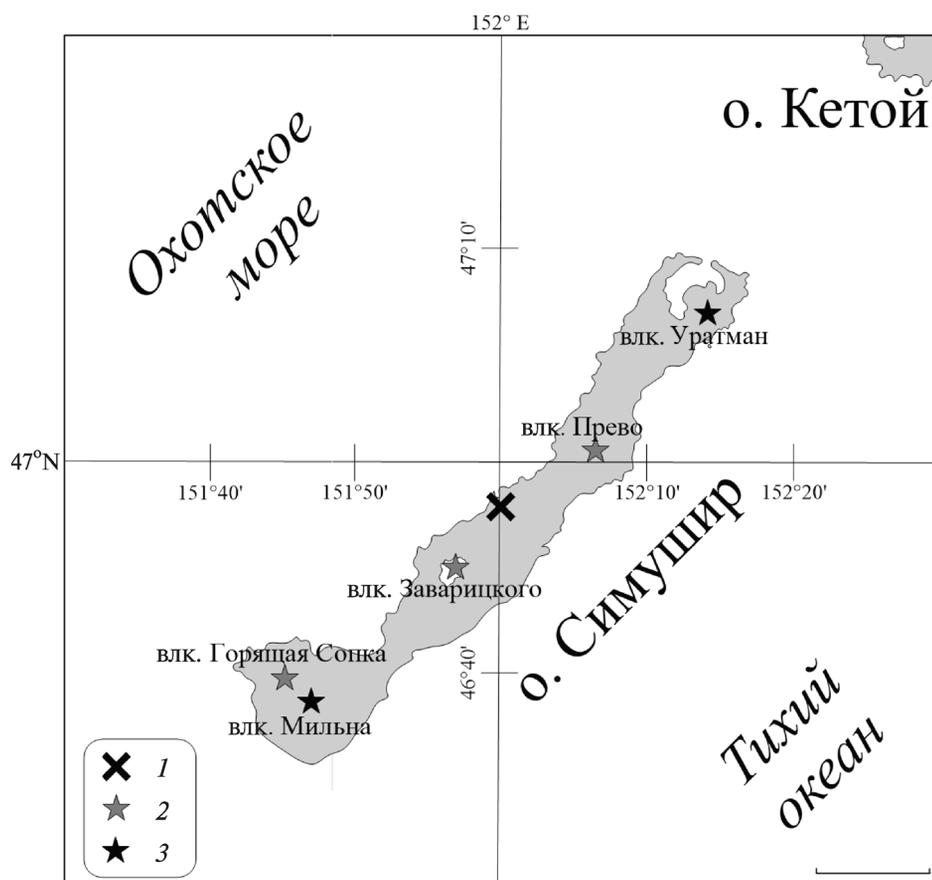


Рис. 1. Карта о. Симушир: 1 — место отбора тефры из почвенно-пирокластического чехла, 2 — активные вулканы, 3 — потухшие вулканы

ских центров о. Симушир и содержание в них  $H_2O$ , S, Cl, проследить их эволюцию и заложить основу для дальнейшего исследования их геохимических характеристик.

**Материалы и методы исследования.** Исследованы расплавные включения во вкрапленниках тефры почвенно-пирокластического чехла (ППЧ) о. Симушир, отобранных О.В. Дирксом. Место отбора тефры (разрез 01118) расположено на террасе высотой 110 м над уровнем моря на западном побережье о. Симушир (N 46°57'56,1"; E 152°00'06,9") вблизи влк. Заварицкого (рис. 1). Разрез имеет мощность более 7 м и включает в себя более 40 слоев тефры.

Тефры представляют собой оптимальный материал для изучения расплавных включений в силу быстрой закалки материала, которая препятствует необратимым процессам изменения состава включений [Lloyd et al., 2013]. Для изучения отобраны только хорошо закаленные стекловатые расплавные включения, подверженные минимальному влиянию постзахватных процессов, приводящих к необратимым преобразованиям их состава, таким, как потеря воды [Bucholz et al., 2013].

Для исследования расплавных включений под биноклем были выбраны тефры, наиболее богатые минералами-вкрапленниками, которые представлены в рассматриваемых породах оливином (Ol), клинопироксеном (Cpx), ортопироксеном (Opx) и плагиоклазом (Pl).

Расплавные включения в фенокристаллах оливина фракции 0,5–1 мм изучались для образцов № 01118-9, 01118-17, 01118-24, 01118-27 и 01118-41. Кристаллы клино- и ортопироксена для изучения расплавных включений выбраны из фракции 0,1–0,25 мм образцов № 01118-12, 01118-17 и 01118-45 в связи с тем, что почти все включения в кристаллах более крупных фракций раскристаллизованы, а также из фракции 0,5–1 мм образца № 01118-13. Расплавные включения в плагиоклазе фракции 0,5–1 мм изучены для образца № 01118-13.

Монофракции этих минералов были выбраны из тефры вручную и смонтированы в дюймовые препараты из эпоксидной смолы. Для дальнейшего изучения отобраны кристаллы, содержащие стекловатые расплавные включения размером более 25 мкм без следов вторичного захвата и вторичных преобразований (критерии их определения приведены в [Плечов, 2014; Попов и др., 2016]). Эти включения выведены на поверхность и отполированы в индивидуальных препаратах. Более подробное описание методики приведено в [Plechov et al., 2015].

Содержание главных компонентов, серы и хлора в стеклах расплавных включений проанализировано в лаборатории локальных методов анализа вещества геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова при помощи электронного сканирующего микроскопа «Jeol JSM-6480LV» с ЭДС приставкой «Oxford XMax<sup>N</sup>» при ускоряющем

Таблица 1

Состав стекол расплавных включений в минералах ППЧ о. Симушир

№	Ми-нерал	Mg#	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	Cl	Сумма	H <sub>2</sub> O
01118-9-2-4	Ol	74,0	51,74	0,95	17,53	9,75	0,25	2,95	10,77	2,41	0,23	0,03	0,09	0,09	96,80	3,25
01118-9-4-1		73,8	48,90	0,99	18,27	8,71	0,19	3,21	12,07	2,56	0,22	0,07	0,11	0,09	95,39	2,32
01118-17-3-3		75,6	49,87	1,01	17,50	8,39	0,21	3,38	11,49	2,68	0,25	0,04	0,15	0,10	95,08	2,38
01118-17-4-15		80,4	46,27	0,62	18,26	8,98	0,23	3,83	11,91	1,74	0,15	0,03	0,15	0,06	92,22	4,02
01118-17-5-1		68,6	52,52	1,01	17,51	8,99	0,23	1,72	9,59	3,05	0,33	0,12	0,07	0,09	95,23	—
01118-17-5-9a		68,0	55,78	1,02	17,13	9,11	0,31	2,77	8,67	3,18	0,33	0,05	0,08	0,07	98,50	2,81
01118-17-5-9b		68,0	55,44	1,04	16,59	9,11	0,28	2,69	8,12	3,18	0,35	0,08	0,07	0,09	97,03	2,80
01118-17-5-11		77,7	46,38	0,68	17,41	9,93	0,23	4,03	11,53	1,80	0,14	0,04	0,11	0,06	92,34	3,93
01118-17-6-6		70,0	52,30	0,76	16,61	9,29	0,25	2,54	9,25	2,61	0,30	0,05	0,07	0,07	94,10	3,41
01118-24-2-2-a		82,5	47,49	0,56	18,22	9,44	0,18	6,07	11,69	1,72	0,12	0,04	0,13	0,06	95,72	3,46
01118-24-2-2-b		82,5	48,02	0,63	19,07	9,02	0,20	4,81	12,02	1,79	0,15	—	0,14	0,07	95,92	—
01118-24-2-5		82,0	46,67	0,63	18,00	9,72	0,27	5,46	11,85	1,62	0,12	0,06	0,15	0,07	94,61	4,83
01118-24-3-8		82,6	46,50	0,59	18,45	9,08	0,16	5,70	11,75	1,60	0,15	—	0,16	0,06	94,21	3,93
01118-24-3-11		82,1	45,57	0,61	17,81	9,37	0,22	5,74	11,71	1,51	0,14	—	0,16	0,03	92,87	4,31
01118-24-4-3		70,5	52,20	0,94	15,45	11,84	0,25	4,67	8,67	2,58	0,28	0,09	0,10	0,06	97,13	2,60
01118-24-5-10		72,8	50,44	1,09	18,90	11,64	0,22	3,95	10,74	2,95	0,29	0,02	0,13	0,09	100,46	0,53
01118-24-6-8		81,1	46,03	0,59	17,46	9,61	0,22	5,70	11,61	1,60	0,13	0,03	0,14	0,05	93,17	3,59
01118-24-6-11		81,4	47,18	0,64	17,97	10,06	0,27	5,78	11,67	1,72	0,14	0,02	0,16	0,06	95,66	3,95
01118-24-6-14		81,0	48,26	0,66	17,71	10,03	0,22	6,17	11,65	1,73	0,13	0,02	0,11	0,06	96,75	3,52
01118-24-8-8a		82,2	46,88	0,62	18,33	9,44	0,21	5,79	11,69	1,65	0,14	0,03	0,15	0,05	94,99	4,44
01118-24-8-8b		82,2	46,59	0,57	18,51	9,21	0,20	4,84	11,98	1,62	0,13	—	0,18	0,04	93,86	—
01118-27-5-9		79,5	48,59	0,81	19,16	9,54	0,21	4,20	12,73	2,12	0,20	0,02	0,13	0,06	97,77	2,69
01118-27-5-11		78,7	46,44	0,73	17,25	10,52	0,23	5,16	12,20	1,93	0,15	0,06	0,11	0,05	94,84	2,89
01118-41-3-2		74,2	52,05	0,97	16,97	10,41	0,24	4,32	9,56	2,68	0,30	0,06	0,08	0,06	97,70	1,94
01118-41-4-12		71,9	59,20	0,95	16,30	10,39	0,21	3,96	7,86	2,90	0,56	0,06	0,06	0,07	102,53	2,41
01118-41-5-3		73,1	50,27	0,99	16,33	10,10	0,22	3,91	9,53	2,51	0,29	0,02	0,08	0,06	94,30	2,43
01118-41-7-3		73,6	52,78	0,97	15,65	10,28	0,26	3,95	8,90	2,57	0,35	0,06	0,09	0,06	95,90	2,73
01118-41-7-5		75,2	44,91	0,85	15,05	9,67	0,19	4,00	9,53	1,93	0,20	0,08	0,10	0,05	86,56	3,09
01118-41-8-1		74,1	50,48	0,96	16,70	9,99	0,24	3,97	9,72	2,57	0,29	0,12	0,08	0,07	95,18	2,18
01118-41-8-5		74,4	51,03	0,89	16,11	10,42	0,29	4,58	9,07	2,50	0,29	0,07	0,08	0,06	95,39	3,10
		An#	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	Cl	Сумма	H <sub>2</sub> O
01118-13-105-1	Pl	82,6	57,87	1,02	14,00	10,15	0,21	2,26	6,76	2,86	0,57	0,19	0,05	0,13	96,05	3,7
01118-13-105-2		71,4	59,30	0,92	14,15	9,38	0,18	2,06	6,39	2,95	0,63	0,17	0,05	0,12	96,31	3,4
01118-13-108-1		77,2	60,60	1,02	13,37	10,46	0,23	2,11	6,14	3,21	0,73	0,19	0,05	0,17	98,28	2,0
01118-13-125-1		83,3	58,99	0,96	14,32	9,88	0,22	2,16	6,64	3,37	0,63	0,18	0,05	0,13	97,53	3,0
01118-13-125-2		83,3	60,32	1,00	14,30	9,22	0,26	2,01	6,34	3,32	0,68	0,20	0,04	0,11	97,79	2,9
01118-13-135-1		84,5	59,12	1,08	13,75	10,55	0,23	2,37	6,54	3,21	0,72	0,16	0,05	0,13	97,92	2,6
		Mg#	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	Cl	Сумма	H <sub>2</sub> O
01118-12-1	Opx	61,7	63,46	0,67	14,00	5,87	0,19	1,50	3,83	3,86	1,38	0,15	0,02	0,16	95,08	—
01118-12-1a		61,7	63,32	0,65	13,85	5,87	0,20	1,54	3,82	3,91	1,38	0,16	0,05	0,18	94,91	—
01118-12-2		67,1	61,44	0,75	14,30	7,58	0,15	1,97	5,47	3,61	0,76	0,11	0,04	0,15	96,33	—
01118-13-24-1		63,8	63,28	1,01	13,34	9,83	0,23	2,19	5,96	3,65	0,72	0,21	0,03	0,13	100,58	1,1
01118-13-24-1		63,8	62,32	0,98	13,38	10,38	0,26	2,22	6,02	3,32	0,71	0,19	0,03	0,11	99,93	1,5
01118-13-24-3		63,8	60,99	0,88	13,82	10,50	0,28	2,30	6,34	3,10	0,53	0,13	0,05	0,09	99,01	1,8
01118-13-83-1		62,6	62,36	1,04	14,03	9,57	0,25	1,34	5,88	3,64	0,70	0,19	0,03	0,12	99,16	1,3
01118-17-1		67,9	60,00	0,76	14,63	7,60	0,24	1,89	5,61	3,76	0,62	0,12	0,06	0,12	95,40	—
01118-17-1a		67,9	61,74	0,81	15,27	8,28	0,23	2,26	5,95	3,82	0,59	0,11	0,07	0,14	99,27	—
01118-17-1b		67,9	62,52	0,77	15,36	7,63	0,22	1,97	5,70	3,89	0,63	0,15	0,09	0,11	99,02	—
01118-17-2		66,2	63,55	0,75	14,12	6,64	0,22	1,74	4,89	3,83	0,69	0,06	0,06	0,14	96,68	—
01118-17-3		70,1	63,83	0,70	14,74	6,21	0,17	1,43	5,01	3,88	0,75	0,13	0,04	0,13	97,02	—
01118-17-5		65,9	63,84	0,62	14,97	5,65	0,19	1,55	5,16	3,90	0,71	0,11	0,05	0,14	96,87	—

Окончание табл. 1

№	Ми-нерал	Mg#	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	Cl	Сумма	H <sub>2</sub> O
01118-17-6	Орх	64,8	62,61	0,62	14,31	5,38	0,16	1,47	4,67	4,07	0,80	0,15	0,03	0,13	94,39	—
01118-17-7		66,9	60,02	0,84	15,11	7,23	0,25	1,96	5,77	3,67	0,63	0,09	0,08	0,15	95,79	—
01118-17-8		64,6	62,00	0,81	14,55	6,98	0,16	1,64	5,19	3,87	0,69	0,18	0,05	0,14	96,26	—
01118-45-3		63,6	73,33	0,32	11,37	2,08	0,08	0,32	1,73	3,50	1,59	0,02	0,02	0,26	94,61	—
01118-13-4-1	Срх	70,3	60,28	1,00	14,89	8,95	0,19	2,01	6,06	3,50	0,86	0,23	0,05	0,17	98,19	1,8
01118-13-39-1		69,5	62,58	1,04	13,39	9,97	0,21	1,93	5,82	3,45	0,75	0,17	0,03	0,11	99,45	1,5
01118-13-39-2		69,5	63,56	0,94	13,68	9,56	0,24	1,84	5,75	3,19	0,73	0,17	0,04	0,10	99,79	0,8
01118-13-44-1		78,2	57,70	0,86	16,53	9,55	0,19	2,42	6,35	3,61	0,65	0,18	0,05	0,15	98,24	2,5
01118-13-58-1		66,3	62,33	1,08	14,34	9,92	0,19	1,66	5,67	3,49	0,73	0,22	0,03	0,13	99,79	1,9
01118-13-58-2		66,3	62,40	1,11	14,41	9,39	0,17	1,62	5,67	3,59	0,72	0,18	0,04	0,12	99,42	1,8
01118-13-66-1		65,6	61,63	1,17	13,17	10,00	0,23	2,16	6,02	3,14	0,77	0,29	0,04	0,15	98,77	2,2
1118-17-4		72,8	59,92	0,60	14,44	6,60	0,17	2,14	5,69	3,57	0,52	0,06	0,04	0,10	93,83	—
1118-45-1		71,9	74,13	0,31	11,36	1,74	0,10	0,31	1,65	3,44	1,62	—	0,01	0,27	94,95	—
1118-45-4		72,6	72,22	0,30	10,98	1,78	0,07	0,29	1,69	3,25	1,55	0,03	0,00	0,25	92,39	—
1118-45-5a		72,3	72,03	0,37	11,19	1,85	0,05	0,27	1,73	3,51	1,54	—	0,03	0,26	92,84	—
1118-45-5b		72,3	74,84	0,38	11,82	1,88	0,05	0,34	1,90	3,68	1,53	—	0,02	0,26	96,70	—
1118-45-6	72,3	72,69	0,34	11,31	1,83	0,11	0,33	1,76	3,73	1,61	—	0,04	0,26	94,00	—	

Примечания. Mg# — магнезиальность минерала-хозяина ( $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ , мол.%) для включений в оливине и пироксенах; Ап# — номер анортитовой составляющей плагиоклаза ( $Ca/(Ca+Na)$ , мол.%). Содержание воды в стекле РВ в оливине измерялось методом рамановской спектроскопии [Plechov et al., 2015], для стекол части включений в пироксенах и плагиоклазе оно оценивалось по недостатку суммы микрозондового анализа.

напряжении 20 кВ и силе тока зонда 0,7 нА (все образцы) и рентгеновском микроанализаторе «Jeol JXA-8230» при ускоряющем напряжении 15 кВ и токе зонда 10 нА (только для образца № 01118-13). Анализ проводился при дефокусированном пучке для минимизации эффекта миграции компонентов стекла.

Содержание воды в стеклах расплавных включений в оливине оценено с помощью микрорамановского спектрометра «Horiba XPlora» на геологическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова по методике [Plechov et al., 2015] с использованием искусственных базальтовых стекол в качестве стандартов [Shishkina et al., 2010]. Содержание воды в стеклах среднего и кислого состава (образец № 01118-13) оценено на основе WDS-анализа по дефициту суммы и по разнице измеренного и рассчитанного содержания кислорода. Состав стекол расплавных включений приведен в табл. 1.

Составы расплавных включений в оливине были скорректированы с учетом эффекта кристаллизации минерала-хозяина на стенках включений. Для восстановления исходного состава расплава проведена коррекция путем моделирования обратной кристаллизации минерала-хозяина до достижения равновесия с ним по модели, приведенной в [Ford et al., 1983], с помощью программы Petrolog3 [Danyushevsky, Plechov, 2011]. Поскольку содержание FeO в расплавных включениях в оливине, не проявляет зависимости ни от SiO<sub>2</sub>, ни от магнезиальности оливина-хозяина, при коррекции мы пренебрегли эффектом потери железа [Danyushevsky et al., 2000] за счет диффузионного

переуравновешивания оливина-хозяина и расплава после захвата. Состав расплавных включений и соответствующих реконструированных расплавов приведен на рис. 2, а.

Для оценки влияния эффекта кристаллизации минерала-хозяина на состав включений в пироксенах и плагиоклазе построены диаграммы, по осям которых отложены компоненты, содержание которых контрастно в разных минералах-контейнерах, например CaO–MgO (рис. 1, б). Отсутствие на этих диаграммах смещений состава включений, соответствующих кристаллизации минерала-хозяина (рис. 1, б) позволяет заключить, что кристаллизация минерала-хозяина не оказала значительного влияния. Таким образом, состав расплавных включений в клинопироксене, ортопироксене и плагиоклазе соответствует составу захваченных расплавов.

Реконструированный состав расплавов, приведенный к 100% суммы петрогенных и летучих компонентов приведен в табл. 2.

**Результаты исследований и их обсуждение. Расплавные включения в оливине.** В образцах № 01118-9, 01118-17, 01118-2 4, 01118-27 и 01118-41 стекловатые расплавные включения находятся в оливине с магнезиальностью 68–83 мол.%. Как правило, они бесцветные, характеризуются округлой формой с неровными «изрезанными» границами, содержат небольшой усадочный пузырек и не содержат дочерних фаз (рис. 3, а). Для расплавов, реконструированных на основе расплавных включений в оливине, содержание SiO<sub>2</sub> варьирует от 46,5 до 55,9 масс.%, закономерно увеличиваясь со снижением

Таблица 2

Состав расплавов о. Симушир

№ расплавного включения	Минерал	Mg#	Kopp.	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O	S	Cl	Сум-ма
01118-9-2-4	ОI	74,0	8,1	50,62	0,87	16,13	11,20	0,22	5,53	9,90	2,21	0,21	0,03	2,9	0,08	0,08	100
01118-9-4-1		73,8	3,8	49,66	0,97	18,00	9,57	0,19	4,54	11,89	2,52	0,22	0,07	2,2	0,10	0,09	100
01118-17-3-3		75,6	4,1	50,72	1,00	17,26	9,26	0,21	4,85	11,33	2,64	0,24	0,04	2,2	0,14	0,09	100
01118-17-4-15		80,4	9,1	47,36	0,58	17,30	10,51	0,22	7,25	11,27	1,65	0,14	0,03	3,5	0,13	0,05	100
01118-17-5-1		68,6	9,2	53,43	0,96	16,69	11,67	0,22	4,41	9,15	2,90	0,32	0,11	—	0,06	0,08	100
01118-17-5-9a		68,0	2,7	54,61	0,98	16,47	9,56	0,30	3,54	8,33	3,05	0,31	0,05	2,7	0,07	0,07	100
01118-17-5-9b		68,0	3,1	55,02	1,01	16,12	9,78	0,28	3,61	7,88	3,10	0,33	0,08	2,6	0,07	0,08	100
01118-17-5-11		77,7	7,4	47,59	0,65	16,80	11,32	0,22	6,71	11,13	1,74	0,14	0,04	3,5	0,10	0,05	100
01118-17-6-6		70,0	6,2	52,72	0,74	16,01	10,84	0,23	4,47	8,91	2,51	0,29	0,05	3,1	0,06	0,07	100
01118-24-2-2-a		82,5	4,6	47,58	0,54	17,56	9,90	0,18	7,80	11,27	1,66	0,12	0,04	3,2	0,12	0,05	100
01118-24-2-2-b		82,5	8,3	49,16	0,60	18,25	10,21	0,19	8,04	11,50	1,71	0,15	—	—	0,12	0,06	100
01118-24-2-5		82,0	6,6	46,54	0,59	16,96	10,40	0,26	7,89	11,17	1,52	0,11	0,06	4,3	0,13	0,06	100
01118-24-3-8		82,6	5,1	47,10	0,57	17,90	9,72	0,15	7,70	11,40	1,55	0,15	—	3,6	0,14	0,05	100
01118-24-3-11		82,1	4,8	46,68	0,60	17,50	10,08	0,22	7,68	11,51	1,49	0,14	—	3,9	0,14	0,03	100
01118-24-4-3		70,5	1,2	52,22	0,93	15,33	12,05	0,25	5,05	8,61	2,56	0,27	0,09	2,5	0,09	0,05	100
01118-24-5-10		72,8	4,7	49,38	1,03	17,82	12,24	0,21	5,40	10,13	2,79	0,27	0,02	0,5	0,12	0,08	100
01118-24-6-8		81,1	4,3	47,34	0,58	17,31	10,34	0,22	7,46	11,51	1,58	0,13	0,03	3,3	0,13	0,04	100
01118-24-6-11		81,4	5,3	47,01	0,61	17,11	10,60	0,26	7,73	11,11	1,64	0,13	0,02	3,6	0,14	0,05	100
01118-24-6-14		81,0	3,5	47,87	0,63	17,06	10,32	0,21	7,42	11,22	1,68	0,13	0,02	3,3	0,10	0,05	100
01118-24-8-8a		82,2	5,1	46,85	0,60	17,54	9,96	0,20	7,69	11,19	1,58	0,14	0,03	4,0	0,13	0,05	100
01118-24-8-8b		82,2	8,4	48,76	0,55	18,08	10,61	0,20	8,20	11,70	1,58	0,12	—	—	0,16	0,04	100
01118-27-5-9		79,5	7,0	47,72	0,75	17,75	10,36	0,20	6,66	11,79	1,97	0,18	0,02	2,4	0,11	0,05	100
01118-27-5-11		78,7	4,5	47,19	0,71	16,88	11,26	0,23	6,85	11,94	1,89	0,15	0,06	2,7	0,10	0,05	100
01118-41-3-2		74,2	3,1	51,83	0,94	16,51	10,89	0,24	5,37	9,30	2,61	0,29	0,06	1,8	0,07	0,06	100
01118-41-4-12		71,9	2,8	55,86	0,88	15,09	10,36	0,20	4,67	7,27	2,69	0,52	0,06	2,3	0,05	0,07	100
01118-41-5-3		73,1	3,4	51,58	0,99	16,33	10,98	0,22	5,13	9,53	2,51	0,28	0,02	2,3	0,07	0,05	100
01118-41-7-3		73,6	4,3	52,91	0,94	15,20	11,08	0,25	5,38	8,65	2,50	0,34	0,06	2,5	0,08	0,05	100
01118-41-7-5		75,2	4,6	49,79	0,91	16,09	11,47	0,21	5,98	10,19	2,07	0,22	0,09	2,9	0,09	0,04	100
01118-41-8-1		74,1	3,8	51,39	0,95	16,52	10,84	0,24	5,31	9,63	2,54	0,28	0,11	2,1	0,08	0,06	100
01118-41-8-5		74,4	2,6	51,54	0,88	15,96	10,94	0,29	5,51	8,99	2,47	0,29	0,07	2,9	0,07	0,05	100
		An#	Kopp.	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O	S	Cl	Сум-ма
01118-13-105-1	PI	82,6	—	58,12	1,02	14,06	10,17	0,21	2,27	6,79	2,88	0,57	0,19	3,5	0,05	0,13	100
01118-13-105-2		71,4	—	59,55	0,93	14,20	9,41	0,18	2,07	6,42	2,96	0,63	0,17	3,3	0,05	0,12	100
01118-13-108-1		77,2	—	60,49	1,02	13,35	10,42	0,23	2,11	6,13	3,21	0,73	0,19	1,9	0,05	0,17	100
01118-13-125-1		83,3	—	58,77	0,95	14,26	9,82	0,22	2,15	6,62	3,35	0,63	0,17	2,9	0,05	0,13	100
01118-13-125-2		83,3	—	59,96	0,99	14,22	9,15	0,26	1,99	6,30	3,30	0,68	0,19	2,8	0,04	0,11	100
01118-13-135-1		84,5	—	58,87	1,07	13,69	10,48	0,22	2,36	6,51	3,20	0,72	0,16	2,5	0,05	0,13	100
		Mg#	Kopp.	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O	S	Cl	Сум-ма
01118-12-1	Opx	61,7	—	66,74	0,71	14,73	6,17	0,20	1,58	4,03	4,06	1,45	0,16	—	0,02	0,16	100
01118-12-1a		61,7	—	66,72	0,69	14,59	6,17	0,21	1,62	4,02	4,12	1,46	0,17	—	0,05	0,19	100
01118-12-2		67,1	—	63,78	0,78	14,85	7,86	0,16	2,05	5,68	3,75	0,79	0,11	—	0,04	0,16	100
01118-13-24-1		63,8	—	62,26	0,99	13,12	9,66	0,23	2,16	5,86	3,59	0,71	0,21	1,0	0,03	0,13	100
01118-13-24-1		63,8	—	61,44	0,97	13,19	10,22	0,26	2,19	5,93	3,27	0,70	0,19	1,5	0,03	0,11	100
01118-13-24-3		63,8	—	60,51	0,87	13,71	10,40	0,28	2,28	6,29	3,08	0,53	0,13	1,8	0,05	0,09	100
01118-13-83-1		62,6	—	62,08	1,04	13,97	9,51	0,25	1,33	5,85	3,62	0,70	0,19	1,3	0,03	0,12	100
01118-17-1		67,9	—	62,90	0,80	15,33	7,96	0,25	1,98	5,88	3,94	0,65	0,13	—	0,06	0,12	100
01118-17-1a		67,9	—	62,20	0,82	15,39	8,33	0,23	2,28	6,00	3,85	0,59	0,11	—	0,07	0,14	100
01118-17-1b		67,9	—	63,14	0,78	15,51	7,69	0,22	1,99	5,76	3,93	0,64	0,15	—	0,09	0,11	100
01118-17-2		66,2	—	65,74	0,78	14,61	6,85	0,23	1,80	5,06	3,97	0,71	0,06	—	0,06	0,14	100
01118-17-3		70,1	—	65,79	0,72	15,20	6,40	0,18	1,48	5,17	4,00	0,77	0,13	—	0,04	0,13	100

Окончание табл. 2

№ расплавленного включения	Минерал	Mg#	Kopp.	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O	S	Cl	Сумма
01118-17-5	Орх	65,9	—	65,91	0,64	15,46	5,82	0,20	1,60	5,32	4,03	0,73	0,11	—	0,05	0,14	100
01118-17-6		64,8	—	66,33	0,66	15,16	5,69	0,17	1,56	4,95	4,32	0,85	0,16	—	0,03	0,14	100
01118-17-7		66,9	—	62,66	0,88	15,77	7,53	0,26	2,05	6,02	3,84	0,66	0,09	—	0,09	0,15	100
01118-17-8		64,6	—	64,41	0,84	15,12	7,24	0,17	1,71	5,40	4,02	0,72	0,19	—	0,05	0,15	100
01118-45-3		63,6	—	77,51	0,34	12,02	2,19	0,08	0,34	1,83	3,70	1,69	0,02	—	0,02	0,27	100
01118-13-4-1	Срх	70,3	—	60,29	1,00	14,90	8,93	0,19	2,01	6,07	3,50	0,86	0,23	1,8	0,04	0,17	100
01118-13-39-1		69,5	—	61,99	1,03	13,27	9,86	0,21	1,91	5,77	3,42	0,74	0,17	1,5	0,03	0,11	100
01118-13-39-2		69,5	—	63,18	0,93	13,59	9,49	0,24	1,83	5,72	3,18	0,72	0,17	0,8	0,04	0,10	100
01118-13-44-1		78,2	—	57,34	0,86	16,42	9,47	0,19	2,40	6,31	3,59	0,64	0,18	2,4	0,05	0,15	100
01118-13-58-1		66,3	—	61,29	1,06	14,10	9,74	0,19	1,63	5,57	3,44	0,72	0,22	1,9	0,03	0,13	100
01118-13-58-2		66,3	—	61,68	1,10	14,24	9,26	0,17	1,60	5,60	3,55	0,71	0,18	1,8	0,04	0,12	100
01118-13-66-1		65,6	—	61,08	1,16	13,06	9,90	0,23	2,14	5,97	3,11	0,76	0,28	2,1	0,04	0,15	100
1118-17-4		72,8	—	63,86	0,64	15,38	7,02	0,18	2,28	6,07	3,81	0,55	0,06	—	0,05	0,11	100
1118-45-1		71,9	—	78,07	0,33	11,97	1,83	0,11	0,33	1,73	3,62	1,71	—	—	0,01	0,29	100
1118-45-4		72,6	—	78,16	0,33	11,88	1,92	0,08	0,31	1,83	3,52	1,68	0,03	—	—	0,27	100
1118-45-5a		72,3	—	77,61	0,40	12,06	1,99	0,05	0,29	1,86	3,78	1,66	—	—	0,03	0,27	100
1118-45-5b		72,3	—	77,40	0,39	12,23	1,95	0,05	0,35	1,96	3,81	1,59	—	—	0,02	0,27	100
1118-45-6		72,3	—	77,32	0,36	12,03	1,95	0,12	0,35	1,87	3,97	1,71	—	—	0,04	0,28	100

Примечания. Mg# — магнезиальность минерала-хозяина ( $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ , мол.%) для включений в оливине и пироксенах; An# — номер анортитовой составляющей плагиоклаза ( $Ca/(Ca+Na)$ , мол.%). Процент обратной кристаллизации минерал-хозяина — по [Danyushevsky, Plechov, 2011].

магнезиальности оливина-хозяина. Рост содержания SiO<sub>2</sub> сопровождается заметным увеличением содержания (масс.%) TiO<sub>2</sub> (от 0,5 до 1) и суммы щелочей (от 1,6 до 3,4), а также уменьшением содержания Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (от 18,2 до 15,1), MgO (8,2–3,5) и CaO (11,9–7,3). Содержание H<sub>2</sub>O находится в диапазоне 0,5–4,3, S — 0,06–0,16, Cl — 0,03–0,09 масс.%.

**Расплавные включения в пироксенах.** В образцах № 01118-17, 01118-45, 01118-13, 01118-12 стекловатые расплавные включения обнаружены в ортопироксене (Mg#=62÷70 мол.%), в образцах № 01118-17, 01118-45, 01118-13 — также в клинопироксене (Mg#=66÷78 мол.%). Расплавные включения бесцветные, имеют округлую форму, реже неровные границы. Большая часть включений не имеет усадочных пузырьков или они сравнительно небольшие (рис. 3 б, в).

Расплавы, соответствующие расплавленным включениям в клинопироксене, по содержанию SiO<sub>2</sub> имеют состав от среднего (57,3 масс.%) до кислого (78,2 масс.%). Примечательно, что в образце № 01118-13 расплавы среднего состава находятся в равновесии с клинопироксеном, имеющим магнезиальность 65,6–70,3 мол.%, в то время как в образцах № 01118-17 и 01118-45 расплавные включения кислого состава содержатся в клинопироксене с магнезиальностью 71,9–72,6 мол.%.

Содержание SiO<sub>2</sub> для большей части расплавов, соответствующих расплавленным включениям в ортопироксене, находится в интервале 60,5–66,7 масс.% (при магнезиальности ортопироксена-хозяина, равной 61,7–70,1 мол.%). Только один

состав имеет 77,5 масс.% SiO<sub>2</sub>, при этом магнезиальность его ортопироксена-хозяина отвечает общему диапазону (63,6 масс.%).

Расплавы, равновесные с пироксенами, ложатся на продолжение серии расплавов, реконструированных на основе расплавных включений в оливине, по всем компонентам. При этом с увеличением содержания SiO<sub>2</sub> снижается содержание (масс.%) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (от 16,4 до 11,9), MgO (от 2,4 до 0,3) и CaO (от 6,3 до 1,7), а содержание щелочей увеличивается (от 3,6 до 5,7). Поведение TiO<sub>2</sub> и P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> в этих включениях меняется относительно включений в оливине, и их концентрация начинает снижаться с возрастанием содержания SiO<sub>2</sub> (от 1,2 до 0,3 масс.% и от 0,25 до 0,01 масс.% соответственно). Содержание S составляет 0–0,09 масс.%, Cl — 0,09–0,29 масс.%. Оцененное содержание H<sub>2</sub>O находится в диапазоне 0,8–2,4 масс.%

**Расплавные включения в плагиоклазе.** В плагиоклазе An<sub>71,5–84,5</sub> из образца № 01118-13 присутствуют стекловатые расплавные включения. Они бесцветные, имеют удлиненную форму с округлыми краями и ровные границы, содержат усадочные пузырьки (рис. 3, г). Содержание SiO<sub>2</sub> в расплавах, равновесных с плагиоклазом, находится в пределах 58,1–60,5 масс.%. Большая часть других главных компонентов не проявляет зависимости от SiO<sub>2</sub> и позволяет судить только о среднем содержании (масс.%): TiO<sub>2</sub> — 1, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 14,0, FeO — 9,9, MgO — 2,2, сумма щелочей — 3,8. В то же время содержание CaO в расплавных включениях снижается от 6,8 до 6,1 масс.% при увеличении содержания SiO<sub>2</sub>. Столь малый диа-

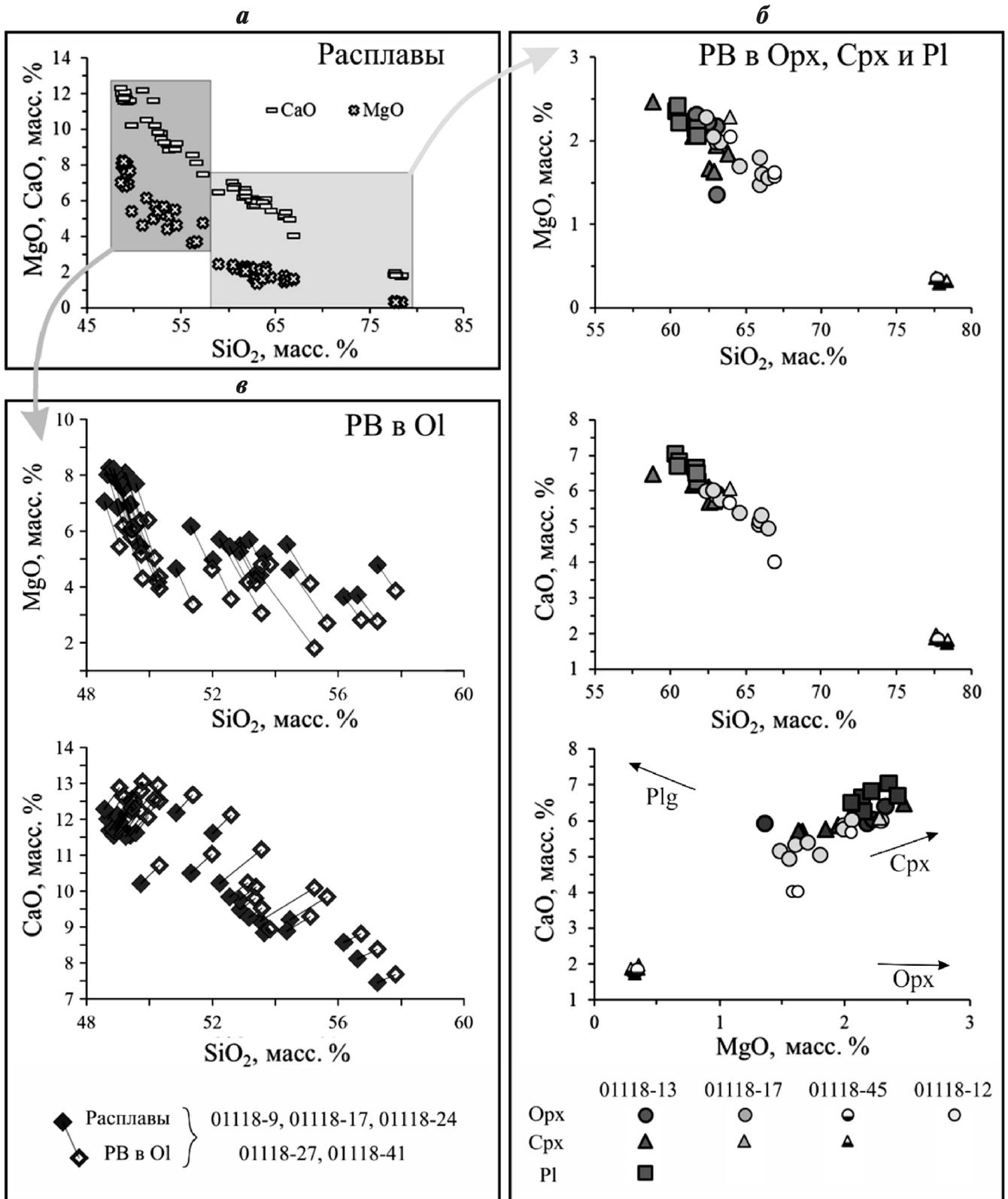


Рис. 2. Диаграммы SiO<sub>2</sub>-MgO и SiO<sub>2</sub>-CaO для всех расплавов (а), SiO<sub>2</sub>-MgO, SiO<sub>2</sub>-CaO и MgO-CaO для расплавных включений в Орх, Сrx и Pl (б), а также диаграммы SiO<sub>2</sub>-MgO и SiO<sub>2</sub>-CaO для расплавных включений в оливине и реконструированного из их состава расплава (в) тефр ППЧ о. Симушир

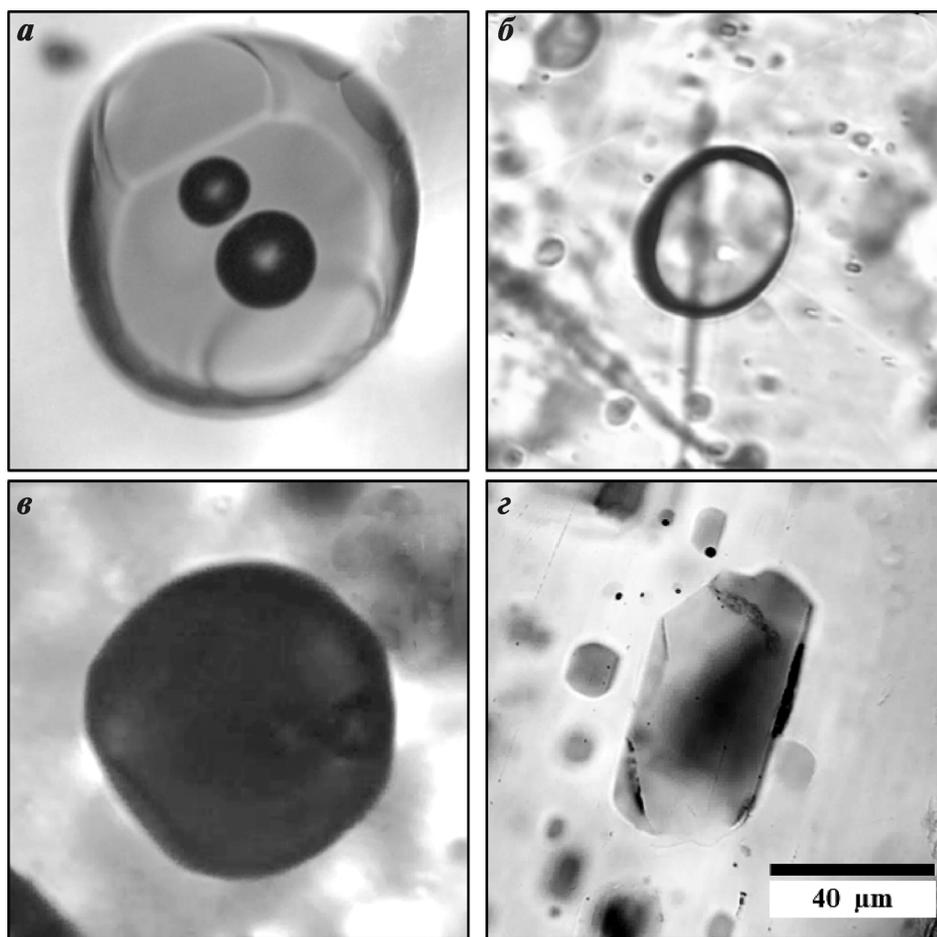


Рис. 3. Фото представительных расплавных включений в оливине (№ 01118-24-2-2) (а), клинопироксене (№ 01118-13-45-6) (б), ортопироксене (№ 01118-17-1) (в) и плагиоклазе 01118-13-125 (г)

пазон значений содержания большинства главных компонентов может свидетельствовать о том, что все расплавные включения фиксируют один этап магматической эволюции расплава, который полностью перекрывается с соответствующими ему по содержанию  $\text{SiO}_2$  этапами магматической эволюции расплавов, равновесных с пироксенами. Содержание S составляет 0,04–0,05 масс.%, а Cl — 0,11–0,17 масс.%. Оцененное содержание  $\text{H}_2\text{O}$  находится в диапазоне 1,9–3,5 масс.%.

Реконструированные составы расплавов на диаграммах Харкера образуют единый тренд для основных петрогенных компонентов (рис. 4). Тренд характеризуется закономерным снижением содержания Mg, Ca, Al и накоплением K по мере увеличения содержания  $\text{SiO}_2$ . Составы расплавов относятся к низкокалийевому толеитовому тренду, как и вулканические продукты основных центров о. Симушир [Парфенова и др., 2015; Мартынов и др., 2010]. Принимая это во внимание, мы относим все исследованные тефры к извержениям, произошедшим в пределах острова.

Наиболее магнезиальные реконструированные расплавы содержат 8,2 масс.% MgO. Наиболее магнезиальные составы вулканических пород Курильской островной дуги содержат как максимум 7,9 масс.% MgO (по базе данных GEOROC). В опубликованных данных о составе расплавных включений максимальное содержание MgO для

большинства образцов составляет 8 масс.%, исключения составляют три анализа расплавных включений в породах влк. Кудрявый и Меньшой Брат с содержанием до 10 масс.% MgO [Толстых и др., 1997].

Оцененное содержание воды в расплавах наиболее основного состава (от 46,5 до 47,9 масс.%  $\text{SiO}_2$ ) варьирует от 2,4 до 4,3 масс.% (со средним значением  $3,4 \pm 0,5$  масс.%). Измеренное содержание воды в расплавных включениях в оливине может быть ниже, чем при захвате включения, что обусловлено диффузионной потерей за счет миграции  $\text{H}^+$  [Bucholz et al., 2013; Gaetani et al., 2012]. Этот процесс сопровождается образованием усадочного пузырька, потерей расплавом  $\text{CO}_2$  и частичной потерей S. Степень влияния эффекта потери воды на состав расплавных включений зависит от размера включения и его удаленности от границ кристалла — так, крупные включения в центральной части вкрапленников претерпевают наименьшие изменения.

Измеренное содержание воды в наиболее магнезиальных оливинах  $\text{Fo}_{>80}$  составляет  $3,6 \pm 0,8$  (2 $\sigma$ ) масс.%. Учитывая эффекты потери, минимальным исходным содержанием воды в родоначальных расплавах можно считать максимальную измеренную концентрацию воды, равную 4,3 масс.%. Независимая оценка исходного содержания воды в расплаве может быть проведена на основе зависимости

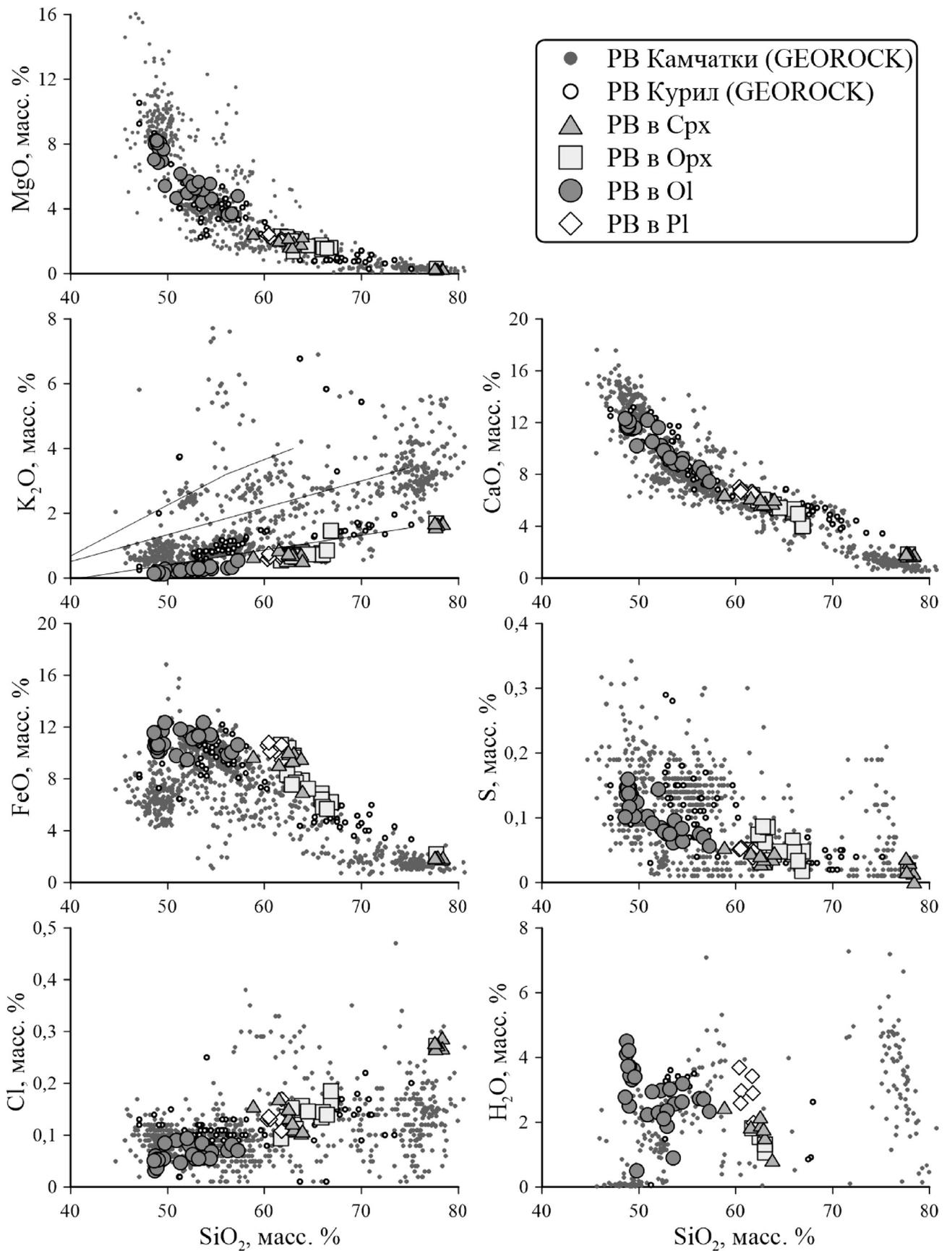


Рис. 4. Реконструированный состав расплавов тефр ППЧ о. Симушир. Отдельными символами нанесены расплавные включения в оливине (Ol), ортопироксене (Орх), клинопироксене (Срх) и плагиоклазе (Pl). Для сравнения приведены составы расплавных включений из пород Камчатки и Курильских островов по данным базы данных GEOROC

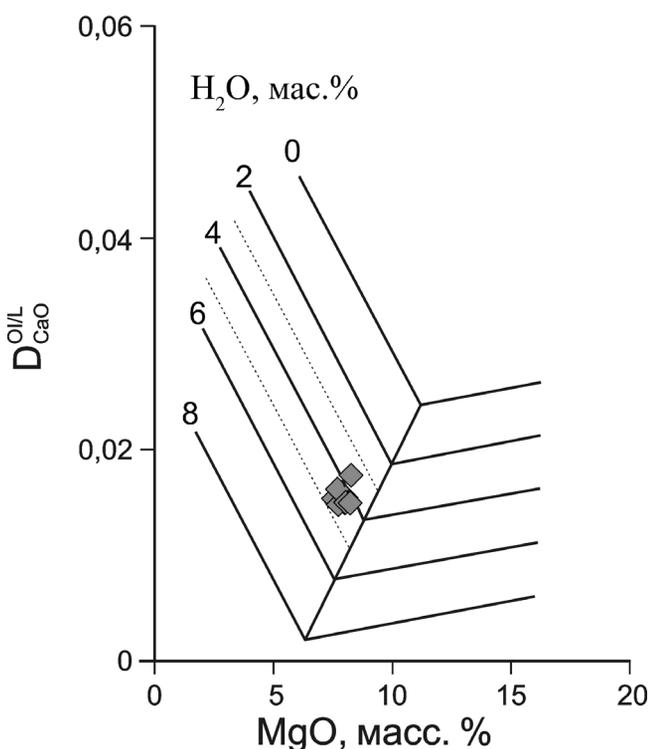


Рис. 5. Диаграмма зависимости коэффициента распределения Ca между оливином и расплавом в зависимости от содержания MgO и H<sub>2</sub>O в расплаве, по [Gavrilenko et al., 2016]. Ромбы — данные пар расплав–оливин (Fo>80)

коэффициента распределения Ca между оливином и расплавом от содержания воды [Gavrilenko et al., 2016]. Расчетное содержание воды в расплаве для расплавных включений в оливине (Fo<sub>>80</sub>) составляет 3,6–4,5 масс.% H<sub>2</sub>O при среднем значении 4,2±0,5 масс.% (рис. 5). Таким образом, родоначальные расплавы содержали 4,2–4,3 масс.% H<sub>2</sub>O. Подобное содержание воды характерно для родоначальных расплавов многих островных дуг [Mironov et al., 2015; Wallace, 2005].

Количественная реконструкция эволюции содержания воды в расплавах по мере увеличения содержания SiO<sub>2</sub> затруднена, поскольку прямые измерения не проводились для стекол среднего и кислого состава. В диапазоне SiO<sub>2</sub> 57,3–60 масс.% ее содержание, оцененное на основе дефицита суммы микронзондовых анализов, составляет 2,4–3,5 масс.% (рис. 4). В интервале от 60–63,2 масс.% SiO<sub>2</sub> происходит резкое уменьшение содержания воды до 0,8 масс.% (рис. 4), что может быть свидетельством захвата включений при декомпрессионной дегазации магмы во время подъема к поверхности перед извержением [Blundy, Cashman, 2005].

Содержание серы в расплавных включениях в оливине лежит в диапазоне 0,06–0,16 масс.%, причем для включений с низким содержанием серы характерно пониженное содержание измеренного содержания воды, что может быть вызвано

частичной потерей серы за счет диффузии воды из расплавных включений [Buchholz et al., 2013]. В то же время расплавные включения в оливине (Fo<sub>>80</sub>), содержащие максимальное количество воды, характеризуются максимальным содержанием серы (0,13±0,3 (2σ)), что позволяет принять это значение за оценку содержания S в родоначальном расплаве. Содержание серы в расплавах закономерно снижается по мере их магматической эволюции, что обусловлено высоким коэффициентом распределения этого элемента между расплавом и флюидной фазой [Webster, Botcharnikov, 2011]. В интервале содержания SiO<sub>2</sub> в расплаве от 46,5 до 66 масс.% SiO<sub>2</sub> содержание S снижается от 0,14 до 0,04±0,02 (2σ) масс.% (рис. 4). В интервале содержания SiO<sub>2</sub> в расплаве от 66 до 78 масс.% концентрация S уменьшается не столь существенно (от 0,04±0,016 (2σ) до 0,02±0,013 (2σ) масс.%), что можно объяснить изменением окислительно-восстановительных условий, которые служат одним из важнейших факторов, влияющих на  $Kd_S^{f/l}$  [Webster, Botcharnikov, 2011], что непосредственно связано с изменением степени окисления серы [Botcharnikov et al., 2011].

Содержание хлора в расплаве закономерно растет от 0,05±0,015 (2σ) в наиболее магнезиальных расплавах до 0,27±0,02 (2σ) масс.% в наиболее кремнекислых расплавах (рис. 4).  $Kd_{Cl}^{f/l}$  при условиях давления магматических очагов (1–2 кбар) имеет значения почти на порядок меньше, чем  $Kd_{Cl}^{f/l}$  для базальтовых расплавов (~6) [Alletti et al., 2009], для андезитовых расплавов (~1,4) [Zajacz et al., 2012] и для риолитовых расплавов (~2) [Botcharnikov et al., 2004], что приводит к накоплению хлора за счет малого объема газовой фазы.

**Заключение.** Полученные данные позволяют охарактеризовать содержание петрогенных компонентов, H<sub>2</sub>O, S и Cl в расплавах. Наиболее примитивные из них равновесны с оливином Fo<sub>83</sub>, что свидетельствует о близости их состава к родоначальным расплавам. Полученные данные являются основой для дальнейшего изучения магматической системы о. Симушир и вместе с данными о содержании рассеянных элементов позволят охарактеризовать состав источника и условия магмогенерации.

Полученные оценки содержания летучих компонентов в расплавах свидетельствуют о том, что близкие по составу тефры разных извержений характеризуются близкими значениями предэруптивной концентрации S и Cl в расплавах, содержание которых закономерно изменяется по мере увеличения количества SiO<sub>2</sub>. Эта корреляция может быть применена для оценки эмиссии этих компонентов в атмосферу во время эксплозивных извержений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Мартынов Ю.А., Ханчук А.И., Рыбин А.В., Мартынов А.Ю.* Геохимия и петрогенезис четвертичных вулканитов Курильской островной дуги // *Петрология*. 2010. Т. 18, № 5. С. 512–535.
- Парфенова О.В., Бурикова И.А., Дриль С.И.* Особенности эволюции состава кремнекислых пород низкокальцевой известково-щелочной серии вулкана Заварицкого (Курильская островная дуга, о. Симушир) // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология*. 2015. № 6. С. 53–61.
- Плечов П.Ю.* Методы изучения флюидных и расплавных включений. М., 2014. 266 с.
- Попов Д.В., Некрылов Н.А., Плечов П.Ю.* Петрология верхнеальбских туффицитов в районе Бахчисарая (Юго-Западный Крым) // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология*. 2016. № 1. С. 82–91.
- Толстых М.Л., Наумов В.Б., Кононкова Н.Н.* Три типа расплавов, участвовавших в формировании андезитобазальтов кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Южные Курилы) // *Геохимия*. 1997. № 4. С. 391–397.
- Alletti M., Baker D.R., Scaillet B.* et al. Chlorine partitioning between a basaltic melt and H<sub>2</sub>O–CO<sub>2</sub> fluids at Mount Etna // *Chem. Geol.* 2009. Vol. 263, Iss. 1. P. 37–50.
- Blundy J., Cashman K.* Rapid decompression-driven crystallization recorded by melt inclusions from Mount St. Helens volcano // *Geology*. 2005. Vol. 33, Iss. 10. P. 793–796.
- Botcharnikov R.E., Behrens H., Holtz F.* et al. Sulfur and chlorine solubility in Mt. Unzen rhyodacitic melt at 850 °C and 200 MPa // *Chem. Geol.* 2004. Vol. 213, Iss. 1. P. 207–225.
- Botcharnikov R.E., Linnen R.L., Wilke M.* et al. High gold concentrations in sulphide-bearing magma under oxidizing conditions // *Nat. Geosci.* 2011. Vol. 4, Iss. 2. P. 112–115.
- Bucholz C.E., Gaetani G.A., Behn M.D., Shimizu N.* Post-entrapment modification of volatiles and oxygen fugacity in olivine-hosted melt inclusions // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2013. Vol. 374. P. 145–155.
- Danyushevsky L.V., Plechov P.* Petrolog3: Integrated software for modeling crystallization processes // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2011. Vol. 12, Iss. 7.
- Danyushevsky L.V., Della-Pasqua F.N., Sokolov S.* Re-equilibration of melt inclusions trapped by magnesian olivine phenocrysts from subduction-related magmas: petrological implications // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2000. Vol. 138, Iss. 1. P. 68–83.
- Ford C.E., Russell D.G., Craven J.A., Fisk M.R.* Olivine-liquid equilibria: temperature, pressure and composition dependence of the crystal/liquid cation partition coefficients for Mg, Fe<sup>2+</sup>, Ca and Mn // *J. Petrol.* 1983. Vol. 24, Iss. 3. P. 256–266.
- Gaetani G.A., O'Leary J.A., Shimizu N.* et al. Rapid re-equilibration of H<sub>2</sub>O and oxygen fugacity in olivine-hosted melt inclusions // *Geology*. 2012. Vol. 40, Iss. 10. P. 915–918.
- Gavrilenko M., Herzberg C., Vidito C.A.* et al. Calcium-in-Olivine Geohygrometer and its Application to Subduction Zone Magmatism // *J. Petrol.* 2016. Vol. 57, Iss. 9. P. 1811–1832.
- Lloyd A.S., Plank T., Ruprecht P.* et al. Volatile loss from melt inclusions in pyroclasts of differing sizes // *Contrib. to Mineral. Petrol.* 2013. Vol. 165, Iss. 1. P. 129–153.
- Mironov N., Portnyagin M., Botcharnikov R.* Quantification of the CO<sub>2</sub> budget and H<sub>2</sub>O–CO<sub>2</sub> systematics in subduction-zone magmas through the experimental hydration of melt inclusions in olivine at high H<sub>2</sub>O pressure // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2015. Vol. 425. P. 1–11.
- Plechov P., Blundy J., Nekrylov N.* et al. Petrology and volatile content of magmas erupted from Tolbachik Volcano, Kamchatka, 2012–13 // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2015. Vol. 307. P. 182–199.
- Portnyagin M., Hoernle K., Plechov P.* et al. Constraints on mantle melting and composition and nature of slab components in volcanic arcs from volatiles (H<sub>2</sub>O, S, Cl, F) and trace elements in melt inclusions from the Kamchatka Arc // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2007. Vol. 255, Iss. 1. P. 53–69.
- Shishkina T.A., Botcharnikov R.E., Holtz F.* et al. Solubility of H<sub>2</sub>O- and CO<sub>2</sub>-bearing fluids in tholeiitic basalts at pressures up to 500 MPa // *Chem. Geol.* 2010. Vol. 277, Iss. 1. P. 115–125.
- Wallace P.J.* Volatiles in subduction zone magmas: concentrations and fluxes based on melt inclusion and volcanic gas data // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2005. Vol. 140, Iss. 1. P. 217–240.
- Webster J.D., Botcharnikov R.E.* Distribution of sulfur between melt and fluid in S–O–H–C–Cl-bearing magmatic systems at shallow crustal pressures and temperatures // *Rev. Mineral. Geochem.* 2011. Vol. 73, Iss. 1. P. 247–283.
- Zajacz Z., Candela P.A., Piccoli P.M., Sanchez-Valle C.* The partitioning of sulfur and chlorine between andesite melts and magmatic volatiles and the exchange coefficients of major cations // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2012. Vol. 89. P. 81–101.

Поступила в редакцию  
28.04.2017