

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: vasilii7@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:

<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.

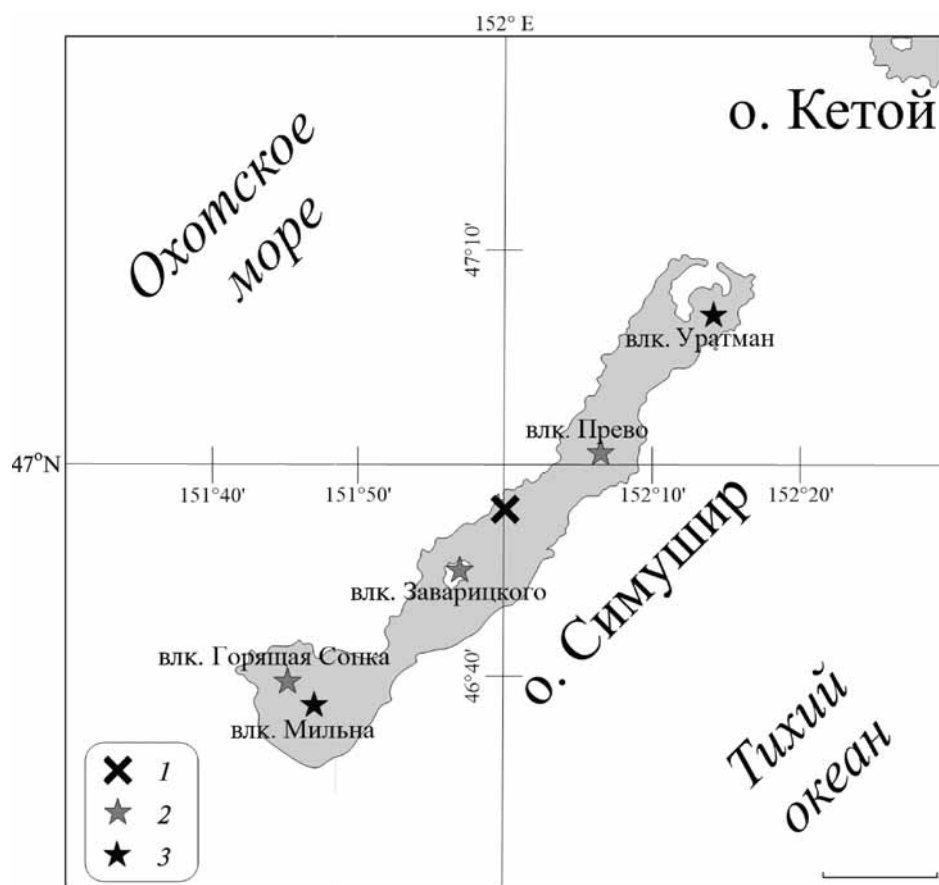


Рис. 1. Карта о. Симушир: 1 — место отбора тефр из почвенно-пирокластического чехла, 2 — активные вулканы, 3 — потухшие вулканы

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 тефр почвенно-пирокластического чехла (ППЧ) о. Симушир, отобранных О.В. Дирксом. Место отбора тефр (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 тефр.

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 тефр 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-<br>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-<br>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             | Ol      | 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          | Pl      | 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; Ап# — 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 Ап<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-

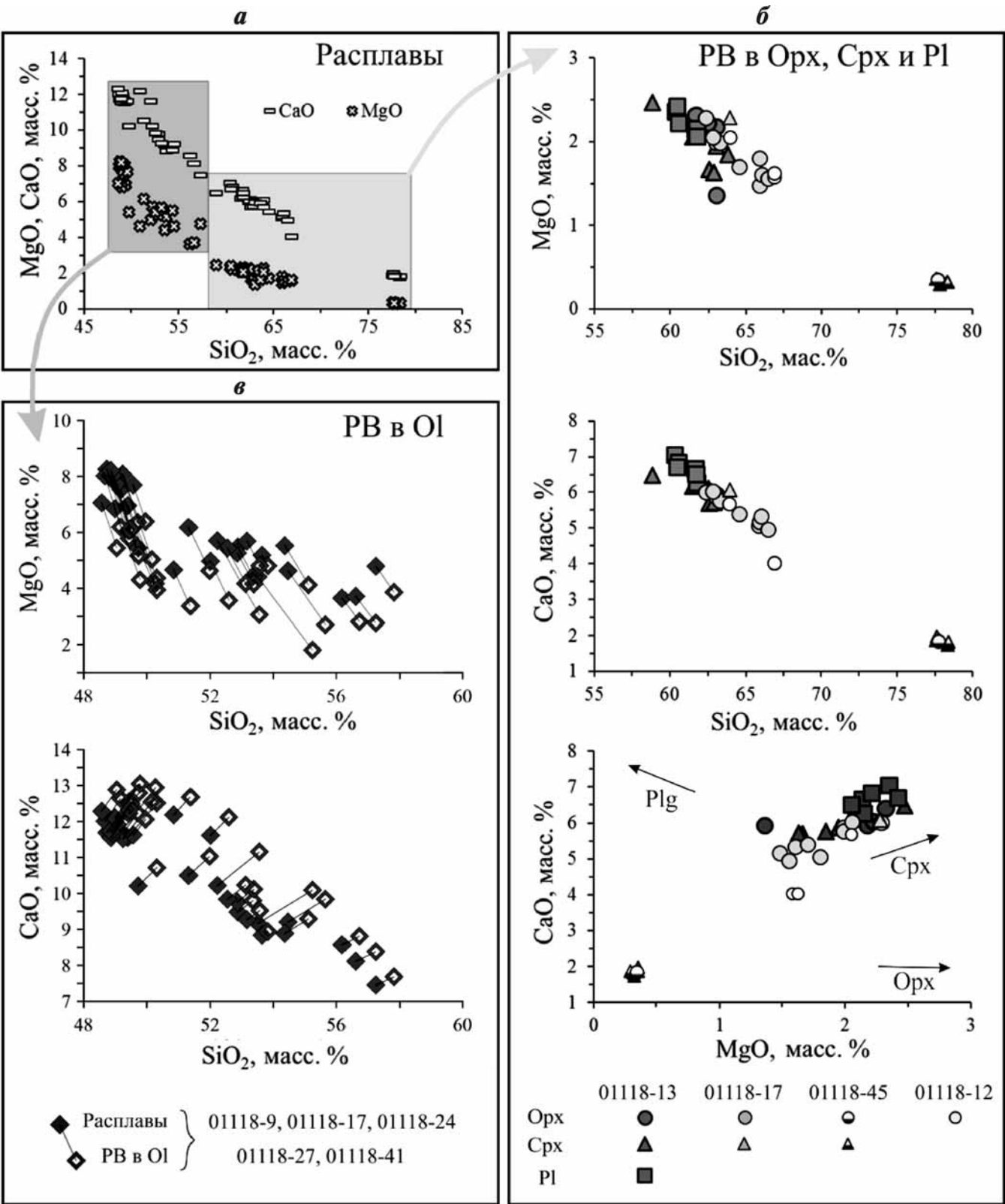


Рис. 2. Диаграммы SiO<sub>2</sub>–MgO и SiO<sub>2</sub>–CaO для всех расплавов (а), SiO<sub>2</sub>–MgO, SiO<sub>2</sub>–CaO и MgO–CaO для расплавных включений в Орх, Срх и Pl (б), а также диаграммы SiO<sub>2</sub>–MgO и SiO<sub>2</sub>–CaO для расплавных включений в оливине и реконструированного из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

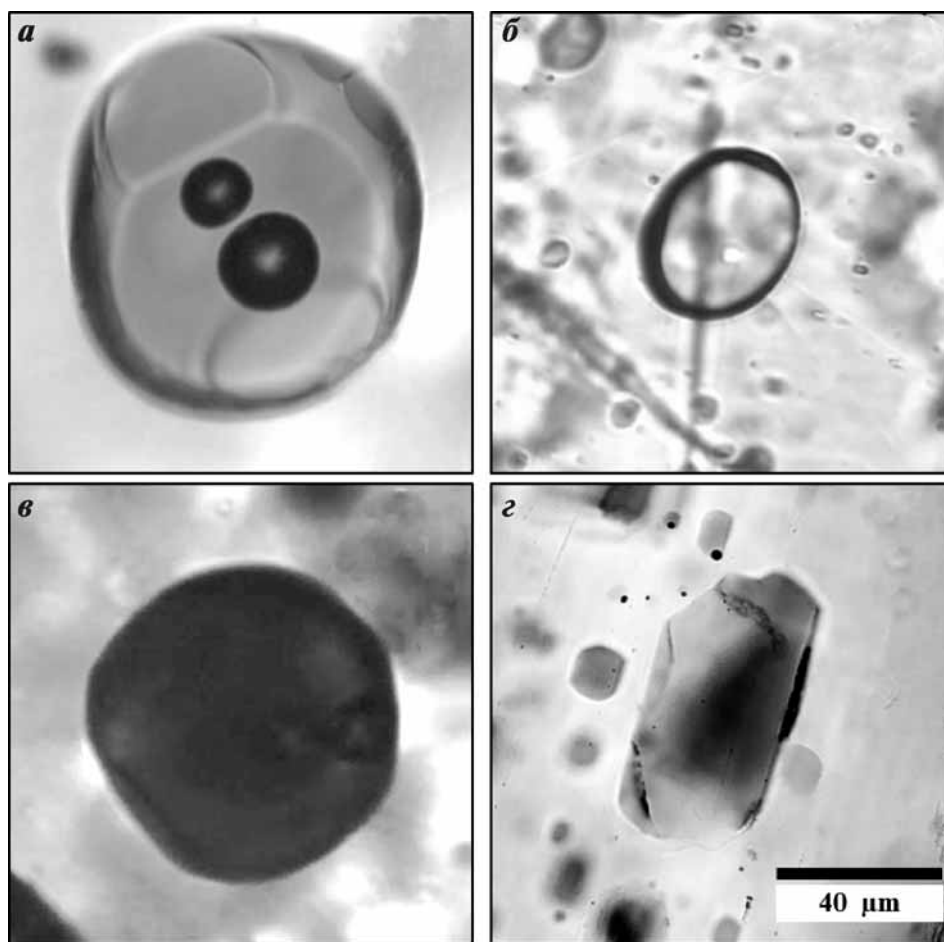


Рис. 3. Фото представительных расплавных включений в оливине (№ 01118-24-2-2) (а), клинопироксене (№ 01118-13-45-6) (б), ортопироксене (№ 01118-17-1) (в) и плагиоклазе 01118-13-125 (з)

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 низкокалиевому 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.%, исключение 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



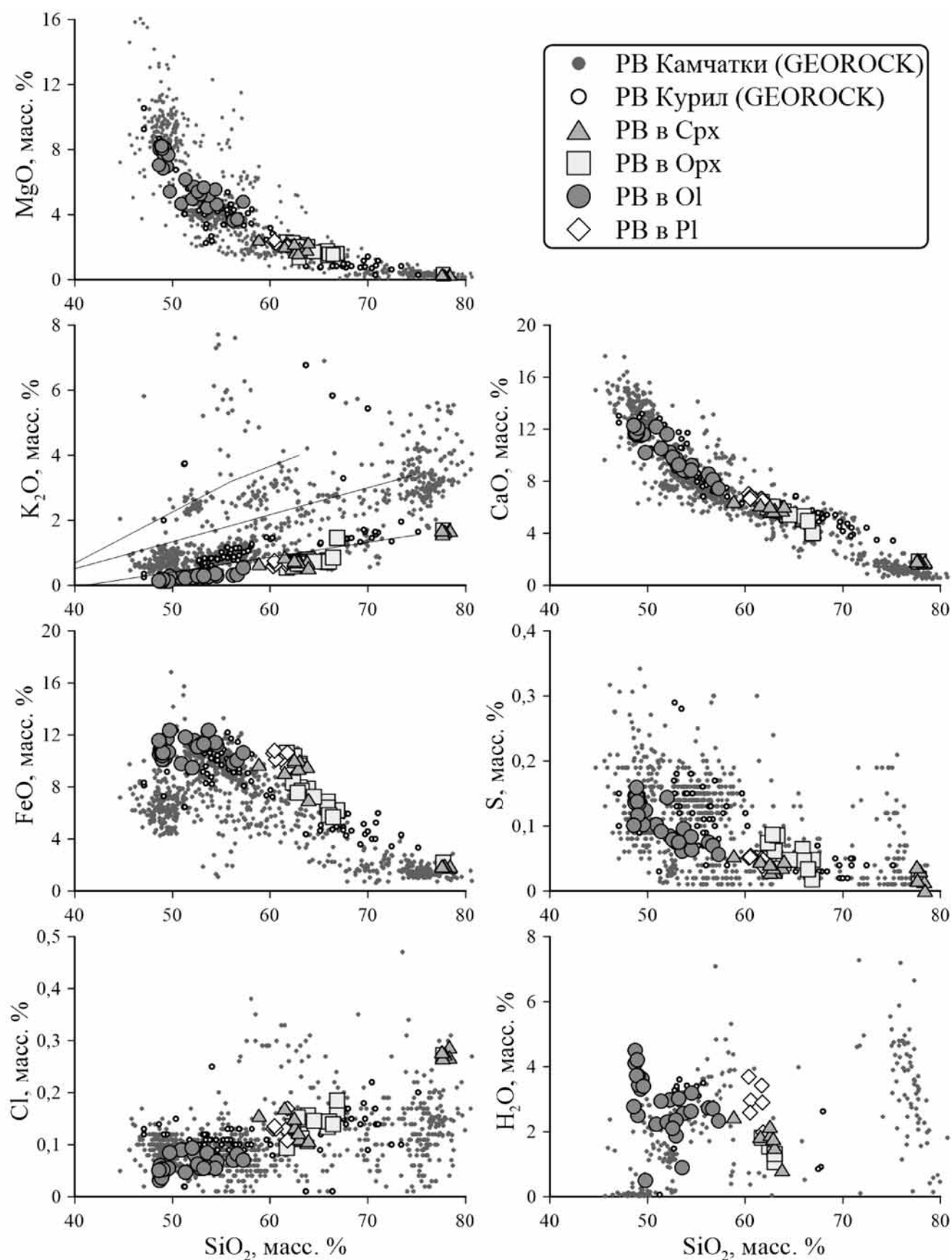


Рис. 4. Реконструированный состав расплавов тефр ППЧ о. Симушир. Отдельными символами нанесены расплавные включения в оливине (ОI), ортопироксене (Орх), клинопироксене (Срх) и плагиоклазе (Pl). Для сравнения приведены составы расплавных включений из пород Камчатки и Курильских островов по данным базы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

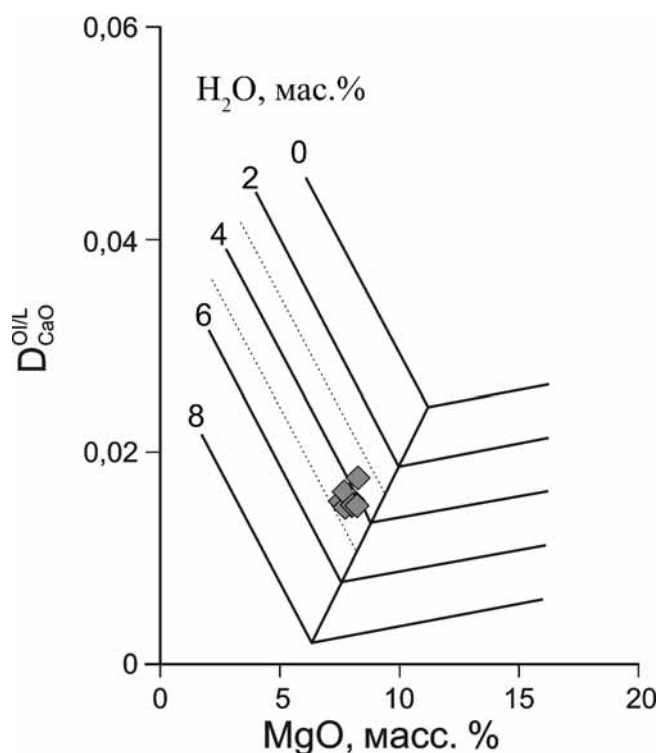


Рис. 5. Диаграмма зависимости коэффициента распределения Са между оливином и расплавом в зависимости от содержания MgO и H<sub>2</sub>O в расплаве, по [Gavrilenko et al., 2016]. Ромбы — данные пар расплав–оливин (Fo>80)

коэффициента распределения Са 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 [Bucholz 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 низкотемпературной 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 верхнеальпских туффинов 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