

## Минеральные формы серы в мантийном источнике и примитивных магмах Ключевской группы вулканов

Каменецкий В.С. <sup>1,2</sup>, Каргин А.В. <sup>3</sup>, Зеленский М.Е. <sup>1</sup>, Кузьмин И.А. <sup>1</sup>, Белоусов А.Б. <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт экспериментальной минералогии РАН, Черногоровка, [saltykimberlite@gmail.com](mailto:saltykimberlite@gmail.com)

<sup>2</sup> Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, [belousov@mail.ru](mailto:belousov@mail.ru)

<sup>3</sup> Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, [alesha.kargin@gmail.com](mailto:alesha.kargin@gmail.com)

**Аннотация.** Мантийный клин в зонах субдукции, представленный гарцбургитами, преобразуется под воздействием флюидов, поступающих от погружающейся океанической коры, является источником островодужных базальтовых магм. В данном исследовании, на примере метасоматизированного перидотитового ксенолита Ключевского вулкана и расплавных включений в магнезиальных вкрапленниках оливина базальтов вулкана Толбачик, рассматриваются формы нахождения и поведение серы в продуктах и в процессах островодужного магматизма Камчатки. Включения ангидрита в новообразованных силикатах мантии под Ключевской группой вулканов представляют собой: а) результат привноса серы из субдуктированной плиты и б) ранее неизвестный источник серы для островодужных магм. Примитивные магмы в равновесии с таким источником характеризуются обогащением серой (до 1.2 мас. %), которое может вызвать как силикатно-сульфидную, так и силикатно-сульфатную ликвацию. Кристаллизация магматического ангидрита, ранее предполагавшаяся для некоторых (суб)вулканических систем, продемонстрирована в нашей работе с помощью комбинированных силикатно-сульфидно-сульфатных включений в оливине (86–90 мол % Фо), образовавшихся при высоких давлении и температуре (> 3 кбар, > 1200 °С) и относительно высокой фугитивности кислорода (QFM +1).

**Ключевые слова:** субдукция, мантийный перидотит, метасоматизм, рециклинг серы, сульфидный расплав, ангидрит.

## Minerals of sulfur in the mantle source and primitive magmas of the Klyuchevskoy group of volcanoes

Kamenetsky V.S. <sup>1,2</sup>, Kargin A.V. <sup>3</sup>, Zelenski M.E. <sup>1</sup>, Kuzmin I.A. <sup>1</sup>, Belousov A.B. <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Experimental Mineralogy, Chernogolovka, [saltykimberlite@gmail.com](mailto:saltykimberlite@gmail.com)

<sup>2</sup> Institute of Volcanology and Seismology, Petropavlovsk-Kamchatsky, [belousov@mail.ru](mailto:belousov@mail.ru)

<sup>3</sup> Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry, Moscow, [alesha.kargin@gmail.com](mailto:alesha.kargin@gmail.com)

**Abstract.** The mantle wedge in subduction zones represented by harzburgites modified by fluids/melts derived from the subducting oceanic crust is a source of island-arc basaltic magmas. In this study, the metasomatised peridotitic xenolith of Klyuchevsky volcano and melt inclusions in the magnesian phenocrysts of olivine of Tolbachik volcano are considered as representative of sulfur occurrence and behaviour in products and processes of island-arc magmatism in Kamchatka. The anhydrite inclusions in metasomatically formed mantle silicates beneath the Klyuchevsky group of volcanoes represent a) a result of sulfur input from the subducted plate and b) a previously unknown source of sulfur for island-arc magmas. Primitive magmas in equilibrium with such a source are characterized by sulfur enrichment (up to 1.2 wt %), which can cause both silicate-sulfide and silicate-sulfate liquid immiscibility. Magmatic anhydrite crystallization, previously assumed for some (sub)volcanic systems, is clearly demonstrated in our work by using multiphase silicate-sulfide-sulfate inclusions in olivine (86–90 mol % Fo) that formed at high pressure and temperature (> 3 kbar, > 1200 °C) and relatively high oxygen fugacity (QFM +1).

**Keywords:** subduction, mantle peridotite, metasomatism, sulfur recycling, sulfide melt, anhydrite.

### Введение

Погружение океанической литосферы в зонах субдукции инициирует плавление вышележащего мантийного клина, который представляет собой перидотитовый рестит после выплавления рифтогенных океанических магм. Образование островодужных магм в результате частичного плав-

ления надсубдукционной мантии обусловлено снижением солидусной температуры перидотита за счет добавления летучих компонентов из погружающегося слэба (например, Hilton et al., 2002; Shinohara, 2013). Преобладание воды и других летучих компонентов ( $\text{CO}_2$ , S, HCl и HF) в составе субдукционных флюидов (например, Gill, 1981) является основным фактором, определяющим понижение солидуса мантии и составы частичных расплавов.

Сера, как один из основных элементов, рециклирующих в зонах субдукции, имеет огромное влияние на ряд фундаментальных геологических процессов, включая динамику извержений, выброс вулканических газов в атмосферу, несмешимость силикатных и сульфидных расплавов и постмагматическая гидротермальная деятельность. В частности, магматизм зон субдукции сопровождается выбросом в атмосферу большого количества серы, например, извержение 1991 г. дацитовой пемзы и тефры вулкана Пинатубо на Филиппинах (Hattori, 1993). Исследования продуктов магматизма такого типа, а также экспериментальные работы в области растворимости серы в магмах зон субдукции показывают, что измеряемое количество серы на один-два порядка больше, чем данные магмы могли в себе растворить (Pasteris, 1996). Это известно как проблема «избытка серы», и возможный источник «избыточной» серы в газовых продуктах извержений возможно представлен сульфидами и ангидридом в корневых областях вулканических систем (Baker and Rutherford, 1996; Luhr, 2008).

Общепризнано, что сера играет ключевую роль в формировании магматических и магматогидротермальных рудных месторождений. Магмы, образующиеся в надсубдукционных, особенно континентальных условиях, имеют повышенный потенциал для образования так называемых порфировых Cu-Au-Mo сульфидных месторождений (Henley et al., 2015; Simon and Ripley, 2011). Содержание серы в 98.5 % расплавных включений из островодужных базальтов не превышает 4000 ppm (Zelenski et al., 2022), тогда как экспериментально установленные пределы растворимости серы в базальтовых расплавах при высоком  $f\text{O}_2$  (характерном для зон субдукции, например, QFM + 2) превышают 14000 ppm. Поэтому «фертильность» магмы с точки зрения содержания серы (т. е. способность образовывать сульфидные «порфировые» месторождения) может в значительной степени зависеть от наличия серы в области мантийного источника.

Курило-Камчатская вулканическая дуга является одной из хорошо изученных, но сложных тектонических зон с геологической историей, начавшейся, по крайней мере, в позднем мелу. В отличие от многих других зон субдукции, на Камчатке распространены примитивные базальты с  $\text{Mg} \# > 65$  и установлены базальтовые и андезитовые магмы, выносящие ксенолиты мантийных перидотитов. Изучение образцов Камчатки и Курильских островов позволяет характеризовать наиболее примитивные расплавы островных дуг и условия их выплавления в мантийном источнике, насыщенные разновалентными формами серы (в основном,  $\text{S}^{6+}$  и  $\text{S}^{2-}$ ) и, соответственно, возможность силикатно-сульфидной ликвации.

В настоящей работе проводится обсуждение метасоматизированного в зоне субдукции мантийного клина в качестве источника серы в продуктах островодужного магматизма. Мы также рассматриваем возможность силикатно-сульфидной ликвации в примитивных островодужных расплавах. Полученные выводы базируются на результатах изучения минерального состава и метасоматической эволюции ксенолита мантийного перидотита из Ключевского вулкана и расплавных включений в примитивном оливине вулкана Толбачик.

### **Материалы и методы**

Нами изучались: 1) ксенолит мантийного перидотита, найденный в окрестностях Ключевского вулкана; 2) более 200 тыс. зерен фенокристаллов оливина в магнезиальных базальтах вулкана Толбачик (извержение 1941 г.). Аналитические исследования проводились:

1) в университете Тасмании (Австралия) с помощью следующего оборудования: электронный микрозонд JEOL JXA 8530F Plus, сканирующий электронный микроскоп FEI MLA650, сканирующий электронный микроскоп с полевой эмиссией Hitachi SU-70 с катодолюминесценцией и микродифракцией в обратно-рассеянных электронах, микро-рамановский спектрометр Renishaw;

2) ИГЕМ РАН с использованием электронного микрозонда JEOL JXA-8200.

## Результаты

Мантийный ксенолит Ключевского вулкана представлен шпинелевым гарцбургитом  $2.5 \times 3.0 \times 6.0$  см (рис. 1), с высоким содержанием ортопироксена  $\sim 25$  об. %. Ранняя (первичная?) ассоциация оливина и ортопироксена имеет гранобластовую крупнозернистую (5–7 мм) структуру и высокую магнезиальность: оливин ( $Mg\#$  0.91–0.92), ортопироксен ( $Mg\#$  0.92–0.93, до 1.9 мас. %  $Al_2O_3$ , до 0.5 мас. %  $Cr_2O_3$  и до 1.3 мас. %  $CaO$ ) и Cr-шпинель ( $Mg\#$  0.65–0.68 и  $Cr\#$  0.59–0.64).

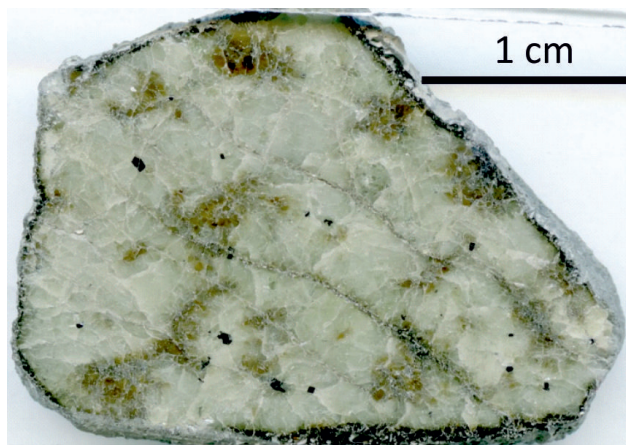


Рис. 1. Полированный срез ксенолита метасоматизированного перидотита из Ключевского вулкана.

Fig. 1. Polished outcrop of the metasomatised mantle xenolith from the Klyuchevskoy volcano.

Мы предполагаем, что мантия, представленная этим ксенолитом, подверглась преобразованию под воздействием флюидов/расплавов, отделившихся от слэба в зоне субдукции. Метасоматические реакции привели к образованию мелкозернистых гранобластовых доменов с перекристаллизацией силикатных минералов (рис. 2) и частичным плавлением. Также произошло преобразование раннего ортопироксена, выразившееся в выделении ламелей и округлых зерен Cr-шпинели (рис. 2) с более высокими значениями  $Mg\#$  (0.64–0.75) и более низкими  $Cr\#$  (0.56–0.61), чем составы «первичной» Cr-шпинели. Участки с метасоматическим ортопироксеном имеют медовый оттенок на полированной поверхности ксенолита (рис. 1).

Перекристаллизация ортопироксена также сопровождается плавлением и захватом включений силикатного стекла. Новообразованный ортопироксен в некоторых частях ксенолита интенсивно замещается оливином, который исключительно богат включениями силикатного стекла, флюида, шпинели и ангидрита (рис. 3). Вышеперечисленные фазы часто встречаются вместе в пределах одного включения (рис. 4). Ангидрит и сульфаты щелочных и щелочноземельных металлов встречены в ассоциации с глобулами Fe-Ni±Cu сульфидов (рис. 4). Интерстициальное K-Na силикатное стекло встречается в виде пленок по границам зерен оливина

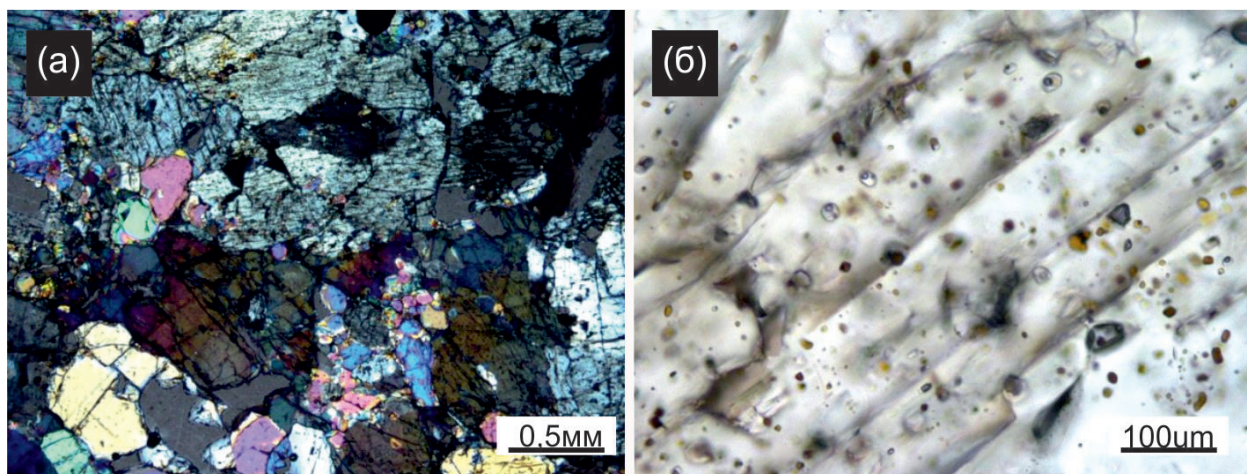


Рис. 2. Изображения в проходящем свете а) шлифа метасоматизированного мантийного ксенолита из Ключевского вулкана, показывающие взаимоотношения между перекристаллизованными силикатными минералами (оливин и ортопироксен, с высокими и низкими интерференционными окрасками, соответственно); б) многочисленными включениями Cr-шпинели, силикатного стекла и флюида в ортопироксене.

Fig. 2. Thin section images in transmitted light of the metasomatised mantle xenolith from the Klyuchevskoy volcano, showing relationships between recrystallised silicate minerals (olivine and orthopyroxene, high and low birefringence, respectively) and abundant Cr-spinel, silicate glass and fluid inclusions in orthopyroxene.

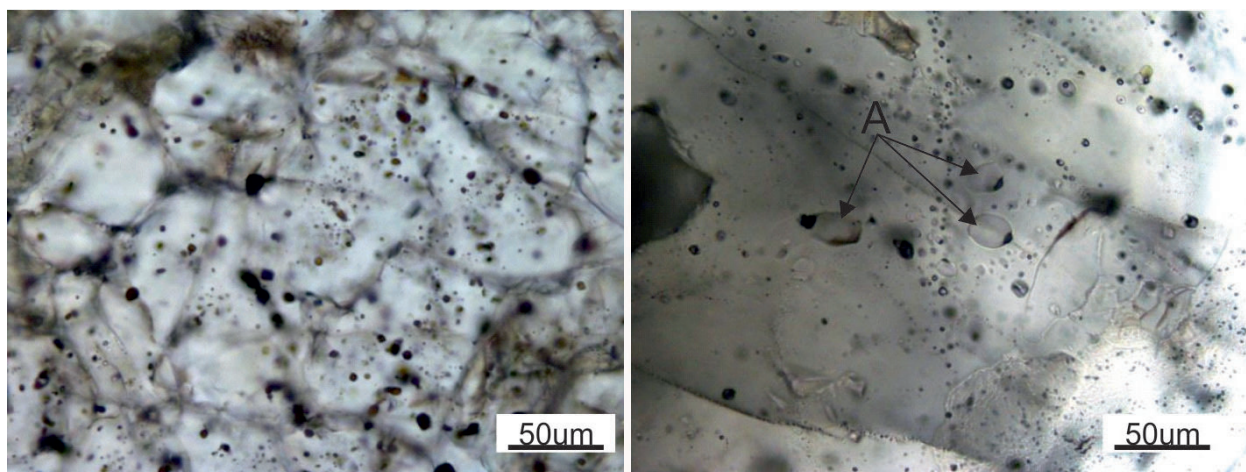


Рис. 3. Изображения в проходящем свете новообразованного оливина в метасоматизированном мантийном ксенолите из Ключевского вулкана, демонстрирующие многочисленные включения силикатного стекла, флюидных пузырей, реликтов ортопироксена и ангидрита (А).

Fig. 3. Transmitted light images of newly formed olivine in the metasomatised mantle xenolith from the Klyuchevskoy volcano, showing abundant inclusions of silicate glass, fluid bubbles, relic orthopyroxene and anhydrite (A).

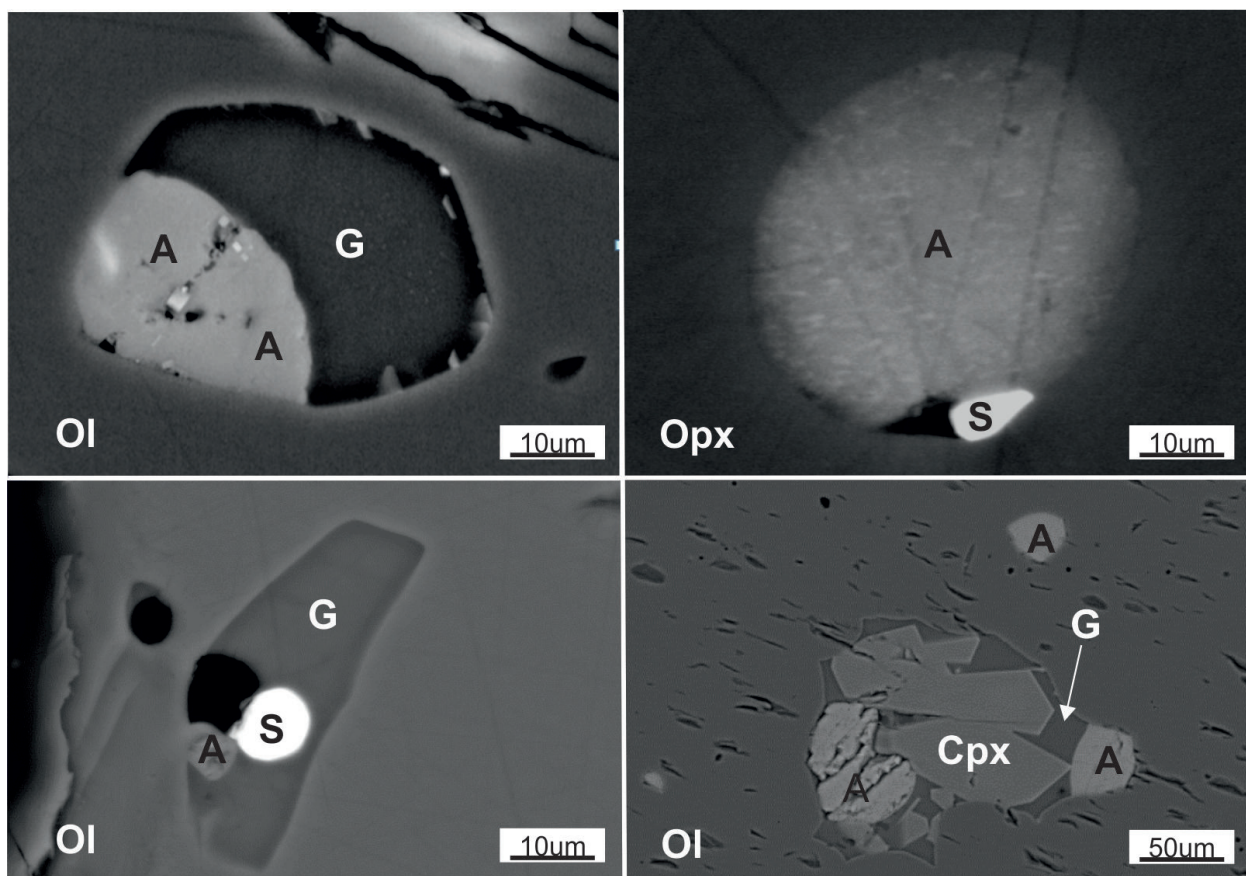


Рис. 4. Многофазовые включения, выведенные на поверхность оливина (Ol) and ортопироксена (Opx) в метасо-матизированном мантийном ксенолите из Ключевского вулкана. Фазы представлены стеклом даци-тового состава (G), ангидритом (A), Fe-Ni+Cu сульфидом (S) и клинопироксеном (Cpx). Снято в отраженных электронах.

Fig. 4. Back-scattered electron images of exposed multiphase inclusions in olivine (Ol) and orthopyroxene (Opx) of the metasomatised mantle xenolith from the Klyuchevskoy volcano. Note the coexistence of dacitic glass (G), anhydrite (A), Fe-Ni+Cu sulfide (S) and clinopyroxene (Cpx).

и ортопироксена. Стекло часто содержит ту же минеральную ассоциацию (ангидрит, Fe-Ni-Cu сульфид, высоко-Cr шпинель и клинопироксен), что и индивидуальные многофазные включения в оливине.

Расплавные включения в магнезиальном оливине (Mg# 0.86–0.91) из магм извержения 1941 г. вулкана Толбачик (Kamenetsky et al., 2017; Zelenski et al., 2018 a; Zelenski et al., 2022) обычно представлены ассоциацией стекла, пузырьков флюида, дочерних силикатов (клинопироксен, амфибол), Cr-шпинелью, Fe-Ni-Cu сульфидом и ангидритом. Состав стекла (или тонкокристаллического агрегата) во включениях соответствует базальтовому расплаву извержения Толбачик 1941 г. Концентрации летучих элементов – H<sub>2</sub>O до 5.43 мас. %, CO<sub>2</sub> до 7600 г/т, F до 870 г/т и Cl до 1600 г/т типичны для расплавных включений в оливине островодужных вулканов. Содержания серы в изученных нами включениях необычны не только большим диапазоном значений (545–11700 г/т), но и аномально высоки (> 4000 г/т), особенно в стекле включений, которые включают сульфид и/или ангидрит. Высокие концентрации обнаружены только в 2 % проанализированных включений, в то время как большинство включений содержат 2500 ± 1500 г/т. Сера коррелирует с хлором в большинстве «нормальных» включений и следует тренду дегазации. Высокие содержания серы можно связать с многочисленными мелкими шариками (< 1 мкм) ангидрита в частично раскристаллизованных расплавных включениях.

Приблизительно 0.6 % зерен от общего количества вкрапленников оливина содержат включения Fe-Cu-Ni-PGE сульфидного расплава, которые сохранили первоначальный химический состав магматической сульфидной жидкости (Zelenski et al., 2018 a; Zelenski et al., 2018 b). В многофазных включениях с захваченными Cr-шпинелью и/или глобулами сульфида мы обнаружили крупные (до 20 мкм) агрегаты и хорошо сформированные кристаллы ангидрита (рис. 5). Ангидрит встречается только внутри частично кристаллизованных расплавных включений, обычно в ассоциации с глобулами сульфида (рис. 5), но не наблюдался в виде индивидуальных включений в оливине или основной массе базальта. Небольшие глобулы и кристаллы ангидрита, вероятно, образовались при охлаждении богатого серой расплава, захваченного во включении. Более крупные глобулы ангидрита 5 не могли образоваться внутри включения во время кристаллизации, так как общая масса глобул значительно превышает количество ангидрита, которое может раствориться в данном объеме силикатного расплава. Ангидрит может составлять до 20 % объема включений, и его «расплавное» происхождение подтверждается деформированными зернами, зажатыми между соседними фазами, т. е. оливином и случайно захваченными сульфидом и Cr-шпинелем (рис. 5).

### **Обсуждение результатов и выводы**

Исследование перидотитового ксенолита Ключевского вулкана подтверждает его происхождение в мантийном клине, преобразованном под воздействием субдукционных флюидов и расплавов. Следует подчеркнуть, что в данном случае метасоматоз приводит не только к перекристаллизации и минералообразованию в мантийном перидотите, но и накоплению коровой серы из слэба в виде Fe-Ni-Cu сульфидов и сульфатов (преобладает ангидрит). Метасоматоз также способствует частичному плавлению перидотита (гарцбургита) и генерации базальтовых магм (например 1941 г. Толбачик), которые возвращают (рециклируют) серу на поверхность.

Одновременное присутствие сульфидов и сульфатов в перидотите и расплаве определяется не только насыщением системы серой, но и значениями фугитивности кислорода. Кристаллизация ангидрита и сульфидная ликвация означают, что значения  $\log fO_2$  были близки к  $\Delta FMQ + 2.5$  при 800 °C и  $\Delta FMQ + 1.5 < \log fO_2 < \Delta FMQ + 3.5$  при 950 °C (Parat et al., 2011). Это согласуется с  $fO_2$  островодужных магм ( $\Delta FMQ = +0.5 - +2.0$ ) (обзор в Richards, 2015), и подтверждается значениями летучести кислорода для ксенолитов из вулканитов активных зон субдукции ( $\Delta FMQ =$  до +3.5) (обзор в Arai and Ishimaru, 2008), а также из вулканов Ключевской группы (Ionov et al., 2013). Эти значения летучести кислорода предполагают, что перидотит мантийного клина содержал сульфат, в отличие от субконтинентальной литосферной мантии, где сера обычно встречается в восстановленной форме S<sup>2-</sup> и образует сульфиды.

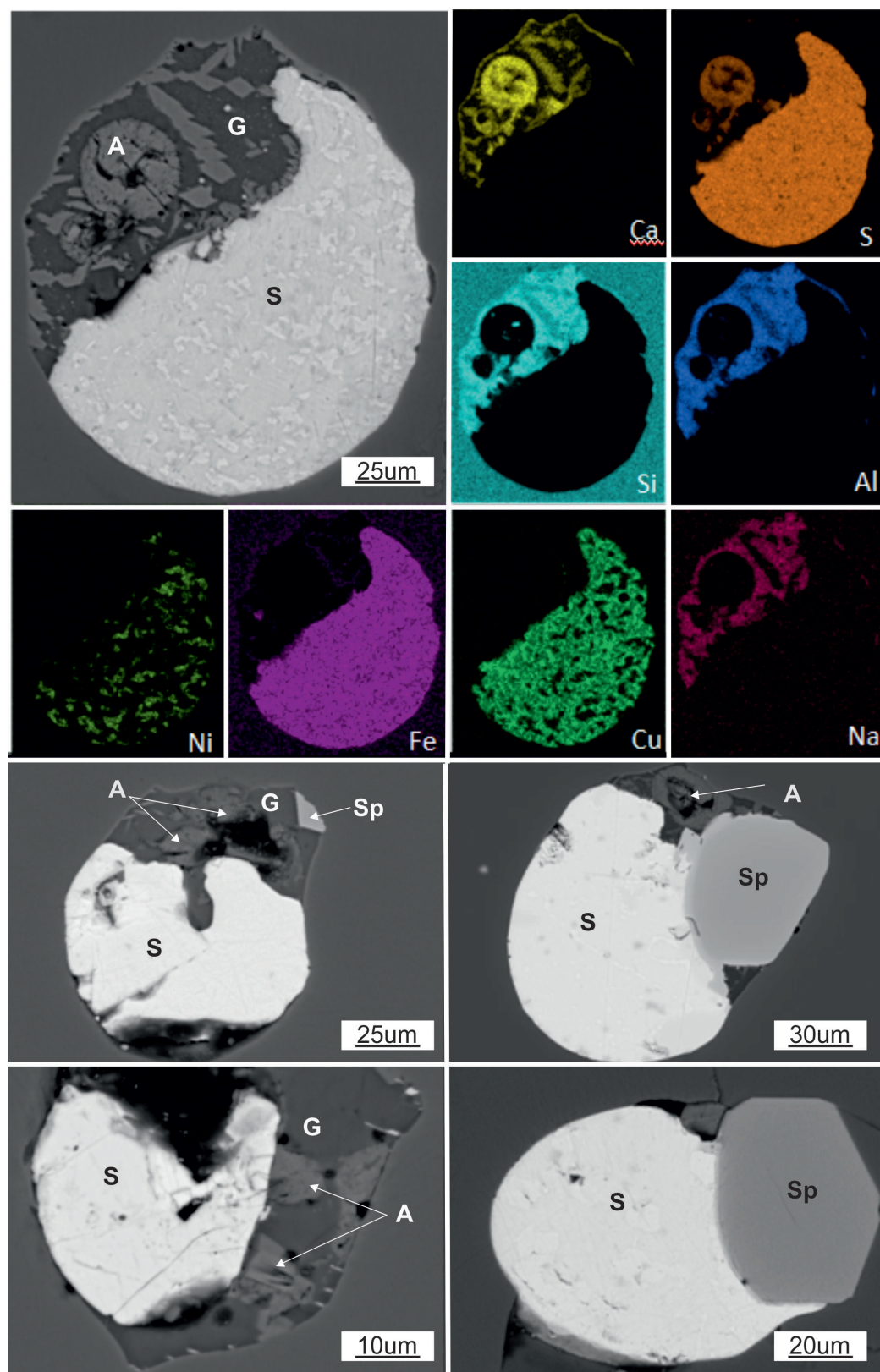


Рис. 5. Электронные изображения (в обратно-рассеянных электронах) и элементные карты (в рентгеновских лучах) многофазных включений в оливине пеплов извержения Толбачика 1941 г. Фазы представлены сульфидными глобулами (S), базальтовым стеклом (G) со скелетными кристаллами клинопироксена, Cr-шпинелью (Sp) и каплями и кристаллами ангидрита (A).

Fig. 5. Backscattered electron images and X-ray element maps of the olivine-hosted multiphase inclusions composed of large sulfide globules (S), silicate glass (G) with skeletal clinopyroxene crystals, occasional Cr-spinel grains (Sp) and anhydrite droplets and crystals (A). Olivine phenocrysts are from scoria of the 1941 Tolbachik eruption.

Добавление коровой серы в виде сульфата из измененной морской водой океанической коры в мантийный клин было ранее предположено на основе изучения насыщенных ангидритом и сульфидом расплавных и флюидных включений в перидотитовых ксенолитах в нескольких островодужных базальтах (Bénard et al., 2018; Métrich et al., 1999). Однако, редкие сообщения о S-содержащих фазах микронного размера, связанных как с силикатным стеклом, так и с водным флюидом, не несут информации о происхождении этих включений и вмещающих их минералов в метасоматизированном перидотите. Наше исследование включений сульфатов и сульфидов в мантийных минералах (оливин, ортопироксен и Ст-шпинель) показывает, что роль и составы субдукционных флюидов и расплавов в преобразовании перидотита мантийного клина могут трассироваться через доставленную субдукцией серу, соответствующие редокс-реакции и новообразованные сульфиды и сульфаты.

Обогащенная разными формами серы надсубдукционная мантия является источником базальтовых магм с высокими содержаниями серы (например, вулкана Толбачик), о чем говорит магматический ангидрит в расплавных включениях (рис. 3–5). Форма и размер ангидрита указывают на существование сульфатной жидкости в силикатном расплаве (рис. 4, 5). Локально аномальные концентрации серы в магматической системе Толбачика способствуют ранней силикатно-сульфидной несмесимости при повышенном давлении ( $> 3$  кбар) и высокой температуре ( $< 1250^\circ\text{C}$ ). Таким образом, сульфидная ликвация в островодужных магмах не требует сильно восстановительных условий, а достигается при  $> \text{QFM} + 1$  и высоких содержаниях серы.

Исследования финансировались Российским Научным Фондом (грант № 21-17-00122).

## Литература

1. Arai S., Ishimaru S. Insights into petrological characteristics of the lithosphere of mantle wedge beneath arcs through peridotite xenoliths: A review // *Journal of Petrology*. 2008. V. 49. P. 665–695. 10.1093/petrology/egm069.
2. Baker L.L., Rutherford M.J. Crystallisation of anhydrite-bearing magmas // *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences*. 1996. V. 87. P. 243–250. 10.1017/S0263593300006659.
3. Bénard A., Klimm K., Woodland A.B., Arculus R.J., Wilke M., Botcharnikov R.E., Shimizu N., Nebel O., Rivard C., Ionov D.A. Oxidising agents in sub-arc mantle melts link slab devolatilisation and arc magmas // *Nature Communications*. 2018. V. 9. P. 3500. 10.1038/s41467-018-05804-2.
4. Gill J.B. *Orogenic andesites and plate tectonics*. Berlin-Heidelberg. 1981. Springer-Verlag. 390 p.: Hattori K. High-sulfur magma, a product of fluid discharge from underlying mafic magma: Evidence from Mount Pinatubo, Philippines // *Geology*. 1993. V. 21. P. 1083–1086. 10.1130/0091-7613(1993)021<1083:HMAPO>2.3.CO;2.
5. Henley R.W., King P.L., Wykes J.L., Renggli C.J., Brink F.J., Clark D.A., Troitzsch U. Porphyry copper deposit formation by sub-volcanic sulphur dioxide flux and chemisorption // *Nature Geoscience*. 2015. V. 8. P. 210–215. 10.1038/ngeo2367.
6. Hilton D.R., Fischer T.P., Marty B. Noble gases and volatile recycling at subduction zones // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2002. V. 47. P. 319–370. 10.2138/rmg.2002.47.9.
7. Ionov D.A., Bénard A., Plechov P.Y., Shcherbakov V.D. Along-arc variations in lithospheric mantle compositions in Kamchatka, Russia: First trace element data on mantle xenoliths from the Klyuchevskoy Group volcanoes // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2013. V. 263. P. 122–131. 10.1016/j.jvolgeores.2012.12.022.
8. Kamenetsky V.S., Zelenski M., Gurenko A., Portnyagin M.V., Ehrig K., Kamenetsky M., Churikova T., Feig S. Silicate-sulfide liquid immiscibility in modern arc basalt (Tolbachik volcano, Kamchatka): Part II. Composition, liquidus assemblage and fractionation of the silicate melt // *Chemical Geology*. 2017. V. 471. P. 92–110. 10.1016/j.chemgeo.2017.09.019.
9. Luhr J.F. Primary igneous anhydrite: Progress since its recognition in the 1982 El Chichón trachyandesite // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2008. V. 175. P. 394–407. 10.1016/j.jvolgeores.2008.02.016.
10. Métrich N., Schiano P., Clocchiatti R., Maury R.C. Transfer of sulfur in subduction settings: an example from Batan Island (Luzon volcanic arc, Philippines) // *Earth and Planetary Science Letters*. 1999. V. 167. P. 1–14. 10.1016/S0012-821X(99)00009-6.
11. Pasteris J. D. Mount Pinatubo volcano and "negative" porphyry copper deposits // *Geology*. 1996. V. 24. P. 1075–1078. 10.1130/0091-7613(1996)024<1075:MPVANP>2.3.CO;2.

12. Richards J.P. The oxidation state, and sulfur and Cu contents of arc magmas: implications for metallogeny // *Lithos*. 2015. V. 233. P. 27–45. 10.1016/j.lithos.2014.12.011.
13. Shinohara H. Volatile flux from subduction zone volcanoes: Insights from a detailed evaluation of the fluxes from volcanoes in Japan // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2013. V. 268. P. 46–63. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.10.007>.
14. Simon A.C., Ripley E.M. The role of magmatic sulfur in the formation of ore deposits // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2011. V. 73. P. 513–578. 10.2138/rmg.2011.73.16.
15. Zelenski M., Kamenetsky V.S., Mavrogenes J.A., Gurenko A.A., Danyushevsky L.V. Silicate-sulfide liquid immiscibility in modern arc basalt (Tolbachik volcano, Kamchatka): Part I. Occurrence and compositions of sulfide melts // *Chemical Geology*. 2018 a. V. 478. P. 102–111. 10.1016/j.chemgeo.2017.09.013.
16. Zelenski M., Kamenetsky V.S., Nekrylov N., Abersteiner A., Ehrig K., Khanin D. Textural, morphological and compositional varieties of modern arc sulfides: A case study of the Tolbachik volcano, Kamchatka // *Lithos*. 2018 b. V. 318–319. P. 14–29. 10.1016/j.lithos.2018.07.029.
17. Zelenski M., Kamenetsky V.S., Nekrylov N., Kontonikas-Charos A. High sulfur in primitive arc magmas, its origin and implications // *Minerals*. 2022. V. 12. P. 37. 10.3390/min12010037.