

**Сульфидные включения в оливиновых базальтах г. Медвежьей (Авачинско-Корякская группа вулканов, Камчатка)**

*Д.П. Савельев<sup>1</sup>, Н.В. Горбач<sup>1</sup>, М.В. Портнягин<sup>2,3</sup>, Т.М. Философова<sup>1</sup>, О.Л. Савельева<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006, e-mail: [savelyev@kscnet.ru](mailto:savelyev@kscnet.ru)*

<sup>2</sup>*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва*

<sup>3</sup>*GEOMAR Helmholtz Center for Ocean Research, Kiel, Germany*

Процессы силикатно-сульфидной ликвации в магмах ответственны за формирование сульфидных Cu-Ni месторождений. Появление сульфидной фазы на ранних этапах эволюции расплава фиксируется захватом сульфидных включений в оливинах. Этот процесс зависит от многих факторов и для островодужных условий детально описан на примере базальтов Толбачинского дола [6, 7]. Другой камчатский комплекс с сульфидными включениями в оливинах – меловые пикриты п-ова Камчатский Мыс [5]. Мы представляем результаты изучения сульфидных включений в оливинах еще одного камчатского объекта – г. Медвежьей, расположенной на подножии Авачинско-Корякской группы вулканов. Небольшой лавовый конус г. Медвежьей с относительной высотой около 80 м и абсолютной отметкой 613.7 м находится в 8 км на ЮЗ от Авачинского перевала, на правом борту долины р. Сухая Речка. Образование лавового конуса, наиболее вероятно, было связано с этапом формирования серии конусов по периферии вулкана Корякский в конце позднего плейстоцена – раннем голоцене [1].

Породы г. Медвежья были опробованы нами в коренных выходах вблизи вершины и на северо-восточном склоне. Они представляют собой одну из наиболее примитивных разновидностей базальтов, известных среди пород Восточного вулканического пояса Камчатки (например, [4]). Величина магнезиальности ( $Mg\# = Mg/(Mg+Fe^{2+})$ ) пород составляет ~0.66. Содержания петрогенных окислов (XRF, мас. %): SiO<sub>2</sub> – 48.7, TiO<sub>2</sub> – 1.16, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 15.5, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 10.7, MnO – 0.18, MgO – 10.5, CaO – 9.75, Na<sub>2</sub>O – 2.85, K<sub>2</sub>O – 0.82, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 0.22; примесных элементов (ICP-MS, г/т): Ni – 183, Cr – 394, Cu – 61, Sr – 512, Y – 23, Zr – 95, Nb – 4.15, Ba – 307, La – 9.75, Sm – 325, Gd – 3.72, Yb – 2.47, Th – 1.57 (среднее по двум анализам).

Вкрапленники оливина в базальтах составляют ~10-12 % объема породы и представлены идиоморфными кристаллами с преобладающим размером 0.5-1.5 мм. Реже встречаются более крупные (до 3 мм) фенокристаллы. Кроме оливина, среди вкрапленников отмечено небольшое количество (1-2 об. %) клинопироксена до 0.5 мм и единичные крупные выделения шпинели размером до 1 мм.

Определения состава оливинов и шпинелей были выполнены при помощи электронного зонда JEOL JXA-8200 в Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel (GEOMAR, г. Киль, ФРГ). Выделения сульфидов, вмещающие их оливины, и зерна шпинелей были изучены на сканирующем электронном микроскопе SEM Vega 3 Tescan, оборудованном энергетическим спектрометром Oxford X-max в Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.

Оливины варьируют по составу от Fo<sub>77</sub> до Fo<sub>88</sub>, с резким преобладанием составов Fo<sub>81-85</sub>. При одинаковой величине магнезиальности оливины гетерогенны по содержанию кальция: можно выделить две группы – с содержаниями CaO ~0.06-0.11 мас. % и ~0.12-0.18 мас. %. Содержания никеля в оливинах составляют 0.08-0.21 мас. % и в целом снижаются с падением его магнезиальности.

Состав шпинелей-включений в оливинах Fo<sub>82-86</sub> показывает очень широкий интервал значений. При достаточно узком интервале магнезиальности (Mg#=41-51) содержания Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и TiO<sub>2</sub> (соответственно 9.6-30.6 мас. % и 0.7-3.3 мас. %), а также

величина хромистости ( $Cr\# = 23-69$ ) значительно варьируют (из рассмотрения исключены шпинелиды с  $FeO > 50\%$ ) (рис. 1). Шпинели, заключенные в низкокальциевых оливинах (с  $CaO < 0.11$  мас. %), показывают обратную зависимость хромистости от содержания  $CaO$  в оливине, в отличие от шпинелей из оливинов с более высоким  $CaO$  (рис. 1, г). Такие особенности состава шпинелей можно объяснить в рамках модели смешения различных по составу расплавов. Другой особенностью шпинелей из базальтов г. Медвежьей является их высокая окисленность ( $Fe^{2+}/Fe^{3+} = 0.9-1.5$ ), что отличает их от большинства шпинелей из примитивных базальтов Камчатки [4]. Шпинели-вкрапленники зональные: их ядра отличаются от шпинелей, включенных в оливины, несколько меньшей окисленностью ( $Fe^{2+}/Fe^{3+} = 1-2.7$ ) (рис. 1, в). Внешняя зона шпинелей-вкрапленников отвечает по составу хромистому титаномagnetиту и сходна с некоторыми шпинелями-включениями в более железистых оливинах, что связано с эволюцией расплава.

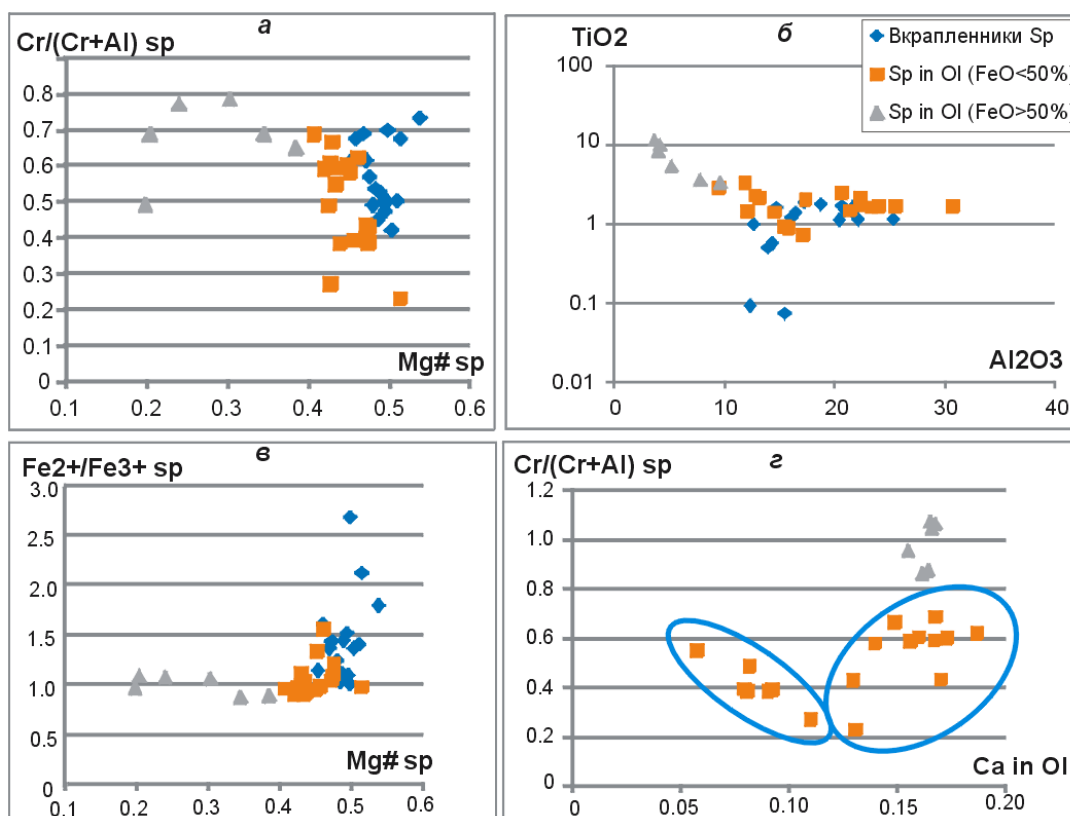


Рис. 1. Состав шпинелей в базальтах г. Медвежьей (а-в) и зависимость хромистости шпинели от содержания  $CaO$  во вмещающем оливине (г).

В зернах оливина, выделенных из базальтов г. Медвежьей, в размерной фракции 0.5-1 мм примерно 1/60 зерен содержит сульфидные включения. Размер сульфидных включений в оливинах – 5-50 мкм (рис. 2). Часть включений показали однородный состав (MSS с небольшим содержанием  $Ni$  – 1.6-4 ат. % или ISS с различным соотношением  $Cu/Fe$ ), другая часть включений содержала обе эти фазы при преобладании MSS (железо-никелистой фазы) (рис. 3).

Полученные результаты показывают сходство сульфидных включений в оливинах г. Медвежьей с сульфидами, изученными в оливинах из базальтов Толбачинского Дола [6, 7] и п-ова Камчатский Мыс [5], отличаясь от них меньшим содержанием  $Ni$  в MSS-фазе. Для толбачинских базальтов М.Е. Зеленским с соавторами локальное (на отдельных участках) пересыщение расплава сульфидом было объяснено достаточно высоким содержанием общей серы в расплаве при относительно высоком значении фугитивности кислорода ( $fO_2 = QFM + 1 - +1.5$ ) [7]. Для базальтов

г. Медвежьей фугитивность кислорода, рассчитанная согласно [2] по составу шпинелей в оливинах, еще выше ( $fO_2 = QFM + 2 - +3$  без шпинелидов с  $FeO > 50\%$ ), что должно препятствовать выделению сульфидной фазы. Однако сульфидные включения наблюдаются в оливинах базальтов г. Медвежьей примерно в 1 из 60; это чаще, чем в оливинах из лав Толбачинского дола (менее 1% [7]). Для понимания причин этого необходимо дальнейшее исследование пород.

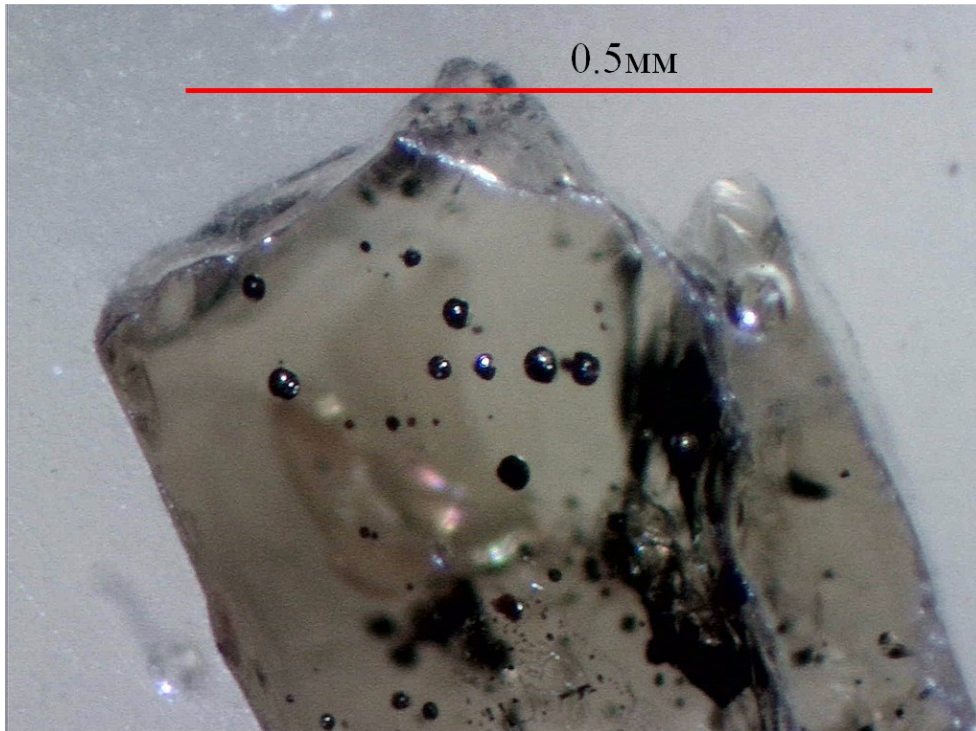


Рис. 2. Оливин с сульфидными включениями.

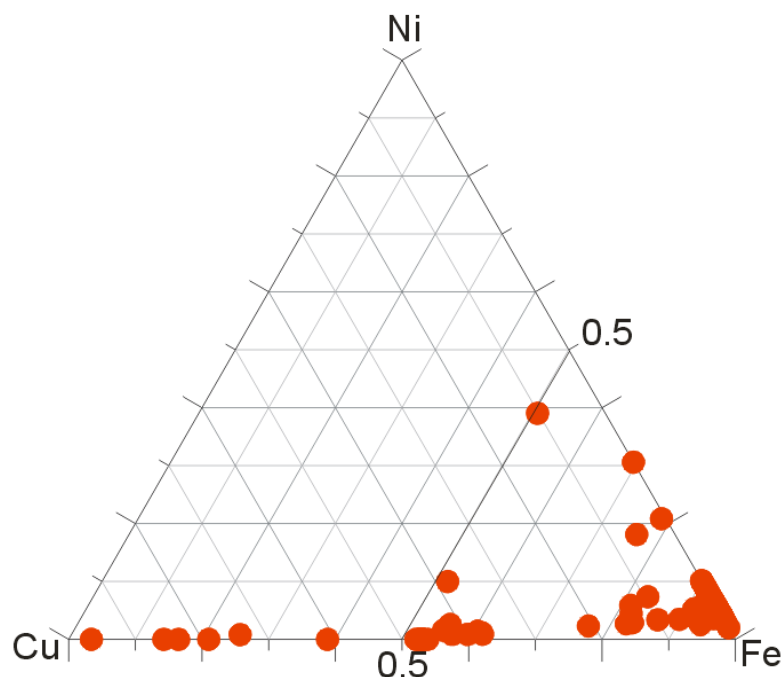


Рис. 3. Индивидуальные анализы сульфидных фаз во включениях в оливинах.

Предварительно, на основании полученных данных о гетерогенности составов оливинов и шпинелей, можно предложить следующую модель. На начальном этапе было два расплава близкой магнезиальности, различающиеся степенью окисленности:

(I) – более окисленный с высоким содержанием серы (близким к насыщению) и (II) – менее окисленный, в котором начали кристаллизоваться вкрапленники шпинели; в обоих расплавах начали кристаллизоваться оливины. При смешении этих расплавов в гипотетическом очаге произошло выравнивание фугитивности кислорода во всем объеме, но по сере сохранились участки с различной насыщенностью. В каплях расплава (I) с высоким содержанием серы был преодолен барьер насыщения сульфидом (за счет понижения  $fO_2$  для этого расплава), и растущие кристаллы оливина стали захватывать капли выделившегося сульфида. При этом оливин, кристаллизовавшийся вне этих участков, не захватывал сульфид. После полной гомогенизации расплава его состав опять оказался ниже барьера насыщения сульфидом.

По данным изучения ксенолитов Авачинского вулкана, отдельные участки мантии могут быть обогащены расплавами с высоким содержанием серы [3]. Такая гетерогенность мантии под Авачинским вулканом допускает возможность генерации расплавов с различными характеристиками. Согласно предложенной нами модели, их смешение может привести к выделению сульфидной фазы в локальных участках в не полностью гомогенизированном расплаве.

### Список литературы

1. Пузанков М.Ю. Геохимическая зональность в островной дуге (на примере Авачинского ряда вулканов). В кн. Геохимическая типизация магматических и метаморфических пород Камчатки / Научн. ред. А.П. Кривенко. Новосибирск, 1990. С. 114-128.
2. Ballhaus C., Berry R., Green D. High-pressure experimental calibration of the olivine-orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer: Implications for the oxidation state of the upper mantle // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1991. V. 107. P. 27-40.
3. Ishimaru S., Arai S. Nickel enrichment in mantle olivine beneath a volcanic front // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2008. V. 156. № 1. P. 119-131.
4. Nekrylov N., Portnyagin M.V., Kamenetsky V.S. et al. Chromium spinel in Late Quaternary volcanic rocks from Kamchatka: Implications for spatial compositional variability of subarc mantle and its oxidation state // Lithos. 2018. V. 322. P. 212-224.
5. Savelyev D.P., Kamenetsky V.S., Danyushevsky L.V et al. Immiscible sulfide melts in primitive oceanic magmas: evidence and implications from picrite lavas (Eastern Kamchatka, Russia) // American Mineralogist. 2018. V. 103. № 6. P. 886-898.
6. Zelenski M., Kamenetsky V.S., Mavrogenes J.A. et al. Silicate-sulfide liquid immiscibility in modern arc basalt (Tolbachik volcano, Kamchatka): Part I. Occurrence and compositions of sulfide melts // Chemical Geology. 2018. V. 478. P. 102-111.
7. Zelenski M., Kamenetsky V.S., Nekrylov N. et al. Textural, morphological and compositional varieties of modern arc sulfides: A case study of the Tolbachik volcano, Kamchatka // Lithos. 2018. V. 318-319. P. 14-29.