

Богатые сульфидами кумуляты вулкана Шивелуч как «недостающее звено» в геохимическом цикле меди в островодужных системах

Давыдова В.О.^{1,2}, Зеленский М.Е.², Кузьмин И.А.³

Sulfide-rich cumulates of Shiveluch Volcano: a missing link in the copper geochemical cycle of island-arc magmatic systems

Davydova V.O., Zelenski M.E., Kuzmin I.A.

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;
e-mail: vestadav@gmail.com*

² *Институт экспериментальной минералогии РАН, г. Черноголовка*

³ *Институт геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск*

В сообщении приведены первые петролого-геохимические данные, полученные при изучении богатых медью ксенолитов с кумулятивными структурами, вынесенными на поверхность в ходе извержения вулкана Шивелуч в апреле 2023 года.

Введение

Поведение меди в надсубдукционных магматических системах остается одной из дискуссионных проблем магматической и рудной геологии. В последние годы активно обсуждается возможность формирования богатых медью сульфидных кумулятов в нижнекоровых резервуарах как важный механизм концентрации меди для дальнейшего формирования медно-порфировых месторождений, с одной стороны, и обеднения медью надсубдукционных лав, ассоциирующих с порфировыми месторождениями, с другой [5, 9, 10]. Несмотря на активное обсуждение нижнекоровых сульфидных кумулятов и их роли в геохимическом цикле меди, на сегодняшний момент нет опубликованных данных о реальных образцах из современных вулканических дуг, подтверждающих их существование. В качестве наиболее близкого аналога рассматриваются образцы из древних зон субдукции, в эксгумированных породах которых обнаружено небольшое количество медьсодержащих ультраосновных кумулятов, которые считаются «хранилищами утраченной меди» в магмах (Сьерра-Невада, плато Колорадо [4]).

В представленной работе мы приводим первые данные о богатых медью ксенолитах вулкана Шивелуч с кумулятивными структурами, которые, возможно, являются первым вещественным доказательством формирования богатых медью сульфидных кумулятов в нижних частях магматических систем в современных зонах субдукции.

Образцы

Исследуемые образцы отобраны из пирокластического потока, сформировавшегося в результате извержения вулкана Шивелуч 10-13 апреля 2023 года. Всего было изучено шесть образцов – два были отобраны летом и осенью 2023 года, еще четыре – летом 2025 года.

Геологическая позиция

Вулкан Шивелуч расположен в северной части Центральной Камчатской депрессии, мощность коры под ним достигает ~35 км [1]. По данным изучения мафических включений ранее были приведены свидетельства фракционирования амфибола в нижнекоровых резервуарах под вулканом Шивелуч [8], что является одним из предлагаемых триггеров формирования нижнекоровых сульфидных кумулятов [2]. Вмещающие ксенолиты продукты извержения апреля 2023 года представляют собой низко-Cu андезиты (~27 ppm Cu). Наличие лав, обедненных медью относительно состава MORB и примитивных надсубдукционных магм, характерно для обстановок, в которых формируются медно-порфировые месторождения [3, 7]. Таким образом,

вулкан Шивелуч идеально отвечает теоретически предсказанным условиям формирования богатых медью нижнекоровых сульфидных кумулятов.

Петролого-геохимическая характеристика ксенолитов

Мафит-ультрамафитовые кумуляты сложены орто- и клинопироксеном, амфиболом, флогопитом, плагиоклазом, титаномagnetитом и небольшим количеством интерстициального кислого стекла, обладают характерными кумулятивными структурами.

Все исследованные образцы содержат многочисленные магматические сульфиды меди (халькопирит, борнит, кубанит, дигенит и др.; до 2-3 об. % сульфидов в породе) и ангидрит (CaSO_4) – как в качестве интерстициальных фаз, так и в виде включений в силикатах (в том числе, встречаются срастания сульфида и ангидрита в расплавленных включениях). Для одного из образцов получены валовые содержания серы (6.42 мас. %) и меди (2.1 мас. %). По данным LA-ICP-MS, помимо меди, сульфиды содержат заметные концентрации серебра (в среднем 174 ppm) и селена (80 ppm), меньшие – Te (13 ppm), Zn и As (по 2.5 ppm), Pb и Cd (17-40 ppb), а также следовые концентрации золота и рутения (5 и 10 ppb, соответственно). Отношение Cu/Ag в сульфидах в среднем составляет ~4500.

Два из шести изученных образцов демонстрируют следы окисления интерстициальных сульфидов – формируется ассоциация из граната андрадитового состава, волластонита, куприта и самородной меди. Подобная ассоциация может возникать при взаимодействии кумулятов с флюидом, богатым CO_2 . В зависимости от исходного состава сульфида и фугитивности кислорода (в пределах от 0 до 2 лог. единиц выше буфера NNO, характерных для магм Шивелуча), при взаимодействии с CO_2 будет формироваться самородная медь/куприт в ассоциации с магнетитом, CO и SO_2 . Реакция CO-содержащего флюида с ангидритом и кислым расплавом будет приводить к формированию волластонита, который, в свою очередь, при магматических температурах будет реагировать с магнетитом с образованием ангидрита. Таким образом, «скарновая» гранат-волластонит-ангидрит-куприт-медная ассоциация может формироваться в ходе окисления сульфидных кумулятов на поздних магматических стадиях их эволюции. Подобный механизм самоокисления сульфидных кумулятов за счет постепенного накопления трехвалентного железа в ходе кристаллизационной дифференциации и постепенного достижения уровня флюидонасыщения на поздних стадиях формирования нижнекоровых кумулятов был теоретически рассмотрен в ряде недавних работ [2, 5, 6] и может являться важным этапом в формировании богатых медью флюидов, ответственных за формирование порфировых месторождений.

Формирование данной ассоциации на магматической стадии подтверждается изотопной термометрией – изотопный состав сульфидной (+2.16 ‰) и сульфатной (+6.81 ‰) серы в данной ассоциации соответствует равновесному фракционированию изотопов серы при 950 °C.

Предварительные выводы

Сульфидные кумуляты вулкана Шивелуч иллюстрируют две стадии эволюции меди в субдукционном цикле: формирование сульфидных кумулятов (богатые сульфидами кумуляты без самородной меди) и их последующее самоокисление (кумуляты с окисленными интерстициальными сульфидами, преобразованными в медь-куприт-ангидритовые ассоциации).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (25-27-00215).

Список литературы

1. *Avdeiko G., Palueva A., Khleborodova O.* Geodynamic conditions of volcanism and magma formation in the Kurile-Kamchatka island-arc system // *Petrology*. 2006. V. 14. P. 230-246. <https://doi.org/10.1134/S0869591106030027>
2. *Barber N.D., Edmonds M., Jenner F. et al.* Amphibole control on copper systematics in arcs: insights from the analysis of global datasets // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2021. V. 307. P. 192-211. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2021.05.034>
3. *Chelle-Michou C., Rottier B., Caricchi L. et al.* Tempo of magma degassing and the genesis of porphyry copper deposits // *Scientific reports*. 2017. V. 7. Art. 40566. <https://doi.org/10.1038/srep40566>
4. *Chen K., Tang M., Lee C.T.A. et al.* Sulfide-bearing cumulates in deep continental arcs: the missing copper reservoir // *Earth and Planetary Science Letters*. 2020. V. 531. Art. 115971. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.115971>
5. *Chiaradia M., Caricchi L.* Stochastic modelling of deep magmatic controls on porphyry copper deposit endowment // *Scientific reports*. 2017. V. 7. Art. 44523. <https://doi.org/10.1038/srep44523>
6. *Cox D., Watt S.F., Jenner F.E. et al.* Elevated magma fluxes deliver high-Cu magmas to the upper crust // *Geology*. 2020. V. 48. P. 957-960. <https://doi.org/10.1130/G47562.1>
7. *Du J., Audétat A.* Early sulfide saturation is not detrimental to porphyry Cu-Au formation // *Geology*. 2020. V. 48. P. 519-524. <https://doi.org/10.1130/G47169.1>
8. *Goltz A.E., Krawczynski M.J., Gavrilenko M. et al.* Evidence for superhydrous primitive arc magmas from mafic enclaves at Shiveluch volcano, Kamchatka // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2020. V. 175. Art. 115. <https://doi.org/10.1007/s00410-020-01746-5>
9. *Lee C.-T.A., Tang M.* How to make porphyry copper deposits // *Earth and Planetary Science Letters*. 2020. V. 529. Art. 115868. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.115868>
10. *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. <https://doi.org/10.2138/rmg.2011.73.16>