

за предоставленные образцы, постановку задачи исследования и консультации в ходе работы.

Литература

Бабаева С. Ф. и др. Отчет по объекту «Оценка особенностей геологического строения рудных скоплений ГПС и состояние среды российского разведочного района САХ в соответствии с требованиями МОМД». СПб: ФГУП «ВНИИОкеангеология им. И. С. Грамберга», 2012ф.

Бельтнев В. Е. и др. Отчет по объекту «Поисковые работы на площади Российского разведочного района в Атлантическом океане с оценкой прогнозных ресурсов ГПС категории Р₂ и Р₃ в блоках 31–45». Ломоносов: ФГУНПП «ПМГРЭ», 2016ф.

Краснов С. Г., Черкашев Г. А., Айнемер Г. А. и др. Гидротермальные сульфидные руды и металлоносные осадки океана. СПб: Недра, 1992. 278 с.

Babaeva S., Sukhanova A., Andreev S., Beltenev V. Geochemical types of sulfide ore as indicators of mineral evolution at the hydrothermal vent field Jubileynoye (MAR) // UMI–2014: Harvesting Seabed mineral resources in Harmony with Nature. Lisbon, 2014. P. 45–54.

Gablina I. F., Dobretsova I. G., Beltenev V. E. et al. Features of the hydrothermal sulfide ores from cluster "Pobeda" (17°07'–17°08' N of Mid-Atlantic Ridge) // Minerals of the Ocean-8 and Deep-Sea Mining-5. St-Petersburg: VNIIOkeangeologiya, 2016. P. 78–82.

***И. Ю. Мелекестева¹, В. В. Масленников¹, Е. В. Белогуб¹,
С. П. Масленникова¹, Л. Данюшевский²***

*¹ – Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс
melekesteva-irina@yandex.ru*

² – Центр CODES, Университет Тасмании, г. Хобарт, Австралия

Элементы-примеси в сульфидах гидротермального поля Семенов-2 (13°31.13' с.ш., Срединно-Атлантический хребет): изоморфизм или микровключения?

Извлечение ценных элементов-примесей из колчеданных руд является важной задачей отработки континентальных месторождений и будущей разработки современных гидротермальных полей, поэтому форма нахождения элементов-примесей в сульфидах (изоморфное вхождение или микровключения) имеет не только генетическое, но и практическое значение. В настоящем сообщении рассмотрена форма нахождения элементов-примесей в сульфидах гидротермального поля Семенов-2 в Срединно-Атлантическом хребте, установленная посредством ЛА-ИСП-МС анализа.

Гидротермальное поле Семенов-2 (13°31.13' с.ш., 44°59.03' з.д.) входит в одноименный рудный узел, который находится в Срединно-Атлантическом хребте между трансформными разломами 15°20' с.ш. и Марафон [Beltenev et al., 2007]. Поле Семенов-2 ассоциирует с базальтами и расположено на склоне подводной горы на глубинах 2480–2750 м. В 2007 г. на станции драгирования 30Л287 в северо-западной части поля были подняты массивные медно-цинковые руды с большим количеством опала (до 40 %) и высокими содержаниями Cu (до 19.33 %), Zn (до 18.32 %), Au (до 188 г/т) и Ag (до 1787 г/т) [Иванов и др., 2008]. Главные минералы в рудах – халько-

пирит, изокубанит, вюртцит и опал, второстепенные – сфалерит, марказит, пирит, ковеллин и яроуит (?), редкие – галенит, пирротин, самородное золото, гессит (?), барит и арагонит [Мелекесцева и др., 2010]. Ранее было показано, что ковеллин поля Семенов-2 обогащен многими элементами-примесями относительно первичных сульфидов и является главным концентратором «невидимого» золота в рудах [Мелекесцева и др., 2016].

Согласно результатам ЛА-ИСП-МС анализа, халькопирит содержит высокие (>100 г/т) концентрации As, Se, Co и Ag, умеренные (>10 г/т) – Ni, Mo, Cd, Sn, Sb, Te и Tl и низкие (<10 г/т) – остальных элементов. Изокубанит характеризуется относительно высокими содержаниями Co, Se и Ag, умеренными концентрациями Mn, Cd, Sn и Te и низкими количествами Ni, Ga, As, Mo, In, Sb, Au, Tl, Pb и Bi. Относительно изокубанита, халькопирит содержит меньше Mn и Co, Ni, As, Se, Mo, Ag, Sb, Tl и Pb. Два анализа халькопирита показывают экстремально высокие содержания Zn, As и Mo. Сульфиды цинка (сфалерит и вюртцит) обладают наибольшими (>1000 г/т) содержаниями Cd, высокими – Mn, Co и Se, умеренными – Ga, Sn и Te и низкими содержаниями остальных примесей. Сульфиды цинка обеднены Ag и обогащены Mn и Ga относительно изокубанита и халькопирита и обеднены Co, Ni, As, Se, Mo, Sb, Te, Tl и Pb относительно халькопирита.

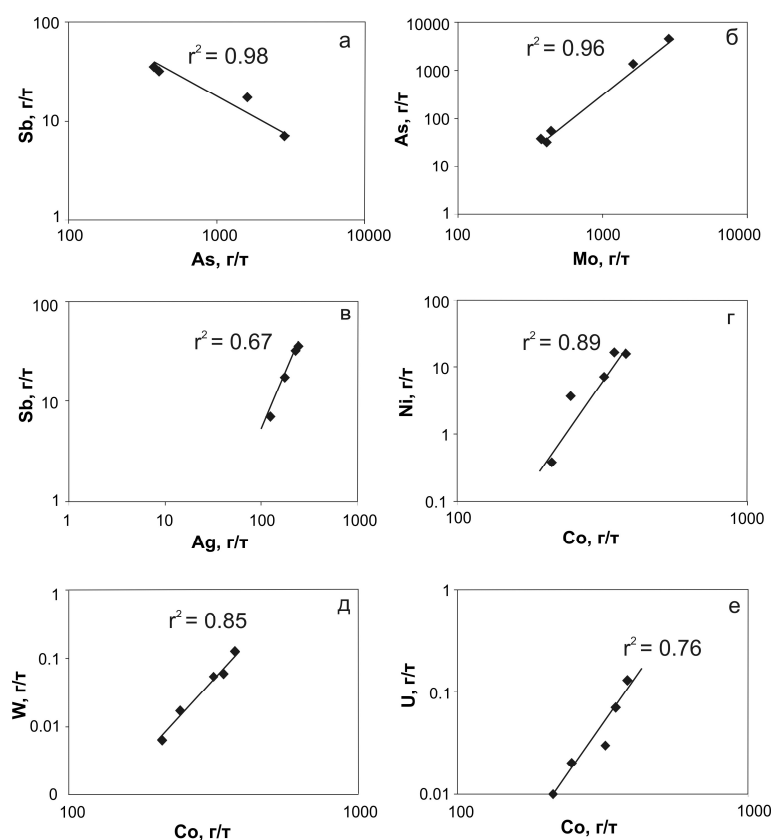


Рис. 1. Взаимоотношения между некоторыми элементами-примесями в халькопирите.

В халькопирите (и, вероятно, изокубаните), мышьяк может либо изоморфно входить в его состав, замещая Fe^{3+} , либо содержаться во включениях сульфосолей [Huston et al., 1995]. В нашем случае, за высокие содержания As, скорее всего, отвечают микровключения As-содержащих блеклых руд, поскольку As негативно коррелирует с Sb (рис. 1а). Хотя в наших образцах видимые включения сульфосолей не были найдены, мелкие включения теннантита в сфалерите были обнаружены в сфалерит-халькопиритовых рудах, собранных в 2009 г. в центральной части поля Семенов-2 [Firstova et al., 2014]. Судя по равномерным содержаниям, Se в халькопирите, скорее всего, находится в виде изоморфной примеси [Huston et al., 1995].

Два анализа халькопирита с высокими содержаниями As, Mo, а также Zn, могут отражать присутствие ассоциирующих сфалерита, блеклой руды и, возможно, молибденита. На возможное присутствие молибденита косвенно указывает его находка в сфалерите гидротермального поля Рейнбоу [Леин и др., 2003]. Положительный тренд между As и Mo (рис. 1б) свидетельствует о сходных условиях осаждения этих элементов.

Серебро может замещать Cu в кристаллической решетке халькопирита [Huston et al., 1995], однако положительная корреляция между Ag и Sb (рис. 1в) в изученном халькопирите свидетельствует о том, что Ag, скорее всего, связано с Sb-содержащими сульфосолями. Кобальт в халькопирите положительно коррелирует с Ni, W и U (рис. 1г–е). Эти взаимоотношения отражают микровключения дисульфидов железа, которые накапливают Co, Ni, W и U [Maslennikov et al., 2009].

Кадмий, Mn, Co, In и Sn в сульфидах цинка положительно коррелируют друг с другом (рис. 2а–г) и, наиболее вероятно, входят в кристаллическую решетку сульфидов цинка. Одновременные всплески содержаний Pb, Au, As, Ag и Sb указывают на то, что эти элементы, скорее всего, связаны с золото-теннантит-галенитовой ассоциацией.

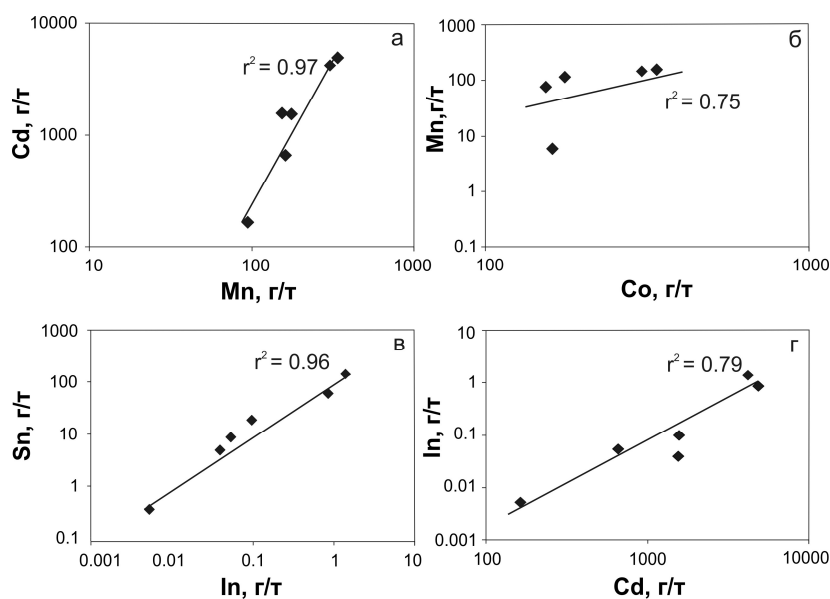


Рис. 2. Взаимоотношения между некоторыми элементами-примесями в сфалерите.

Таким образом, результаты настоящего и предыдущего [Мелекесцева и др., 2016] исследований показали, что Au, Ag и Cd являются основными элементами-примесями руд поля Семенов-2. Учитывая существующие технологии извлечения золота из колчеданных руд (например, [Labroo et al., 1994; Abdollahi et al., 2015]) и форму нахождения золота в изученных рудах (70 % видимого золота, ассоциирующего с опалом, и 30 % «невидимого» золота, заключенного в сульфидах), можно ожидать, что его большая часть (которая ассоциирует с несulfидными минералами) будет потеряна в результате флотации. Часть серебра, которая содержится в самородном золоте, будет также потеряна. Поскольку размер зерен золота составляет меньше 10 мкм, его гравитационное извлечение будет также неэффективно. Для экстракции такого тонкого золота руды должны быть сильно измельчены и подвергнуты гидрометаллургическому переделу или цианированию (или обжигу с последующим цианированием). «Невидимые» золото и серебро, заключенные в сульфидах (в основном, ковеллине), и небольшое количество видимого золота, ассоциирующего с сульфидами [Мелекесцева и др., 2010], будут поступать в сульфидный концентрат. Кадмий будет неотъемлемой частью цинкового концентрата, но частично, из-за высоких содержаний в ковеллине, будет попадать и в медный концентрат.

Авторы благодарны В. Н. Иванову и В. Е. Бельтеневу (ФГУП ПМГРЭ, г. Санкт-Петербург–Ломоносов) за возможность участия в 30-м рейсе НИС «Профессор Логачев» и отбор образцов для исследований, а также коллегам из лаборатории минералогии рудогенеза ИМин УрО РАН (г. Миасс) за обсуждение результатов исследований. Работа выполнена в рамках государственной темы «Минералогия и геохимия рудных и рудоносных фаций как отражение геологической истории палеогидротермальных систем» (№ АААА-А16-11-6021010244-0).

Литература

- Иванов В. Н., Бельтенева В. Е., Степанова Т. В., Лазарева Л. И., Самоваров М. Л.* Сульфидные руды нового рудного узла 13°31' с.ш. САХ // *Металлогения древних и современных океанов–2008. Рудоносные комплексы и рудные фации.* Миасс: ИМин УрО РАН, 2008. С. 19–22.
- Леш А. Ю., Черкашев Г. А., Ульянов А. А., Ульянова Н. В., Степанова Т. В., Сагалевиц А. М., Богданов Ю. А., Гурвич Е. Г., Торохов М. П.* Минералогия и геохимия сульфидных руд полей Логачев-2 и Рейнбоу: черты сходства и различия // *Геохимия.* 2003. № 3. С. 304–328.
- Мелекесцева И. Ю., Котляров В. А., Хворов П. В., Иванов В. Н., Бельтенева В. Е., Добрецова И. Г.* благороднометаллическая минерализация нового гидротермального сульфидного поля Семенов-2 (13°31' с.ш.), Срединно-Атлантический хребет // *Записки РМО.* 2010. № 2. С. 59–73.
- Мелекесцева И. Ю., Масленников В. В., Масленникова С. П., Данюшевский Л., Ларж Р.* Влияние субмаринного гипергенеза на обогащение элементами-примесями ковеллина гидротермального поля Семенов-2, Срединно-Атлантический хребет // *Металлогения древних и современных океанов–2016. От минералогенеза к месторождениям.* Миасс: ИМин УрО РАН, 2016. С. 138–142.
- Abdollahi H., Karimi P., Amini A., Akcil A.* Direct cyanidation and roasting combination of a semi-refractory massive sulfide ore // *Minerals & Metallurgical Processing.* 2015. Vol. 32. Spec. Is. 3. P. 161–169.
- Beltenev V., Ivanov V., Rozhdestvenskaya I., Cherkashov G., Stepanova T., Shilov V., Pertsev A., Davydov M., Egorov I., Melekestseva I., Narkevsky E., Ignatov V.* A new hydrothermal field at 13°30' N on the Mid-Atlantic Ridge // *InterRidge News.* 2007. Vol. 16. P. 9–10.
- Firstova A., Cherkashov G., Stepanova T., Babaeva S.* Rare elements in seafloor massive sulfides of the Semyenov hydrothermal cluster, Mid-Atlantic Ridge // in Hein, J.R., Barriga, F.J.A.S. and

Morgan, C.L., eds. UMI-2014. Harvesting Seabed Mineral Resources in Harmony with Nature. Lisbon, 2014. P. 131–139.

Huston D. L., Sie S. H., Suter G. F., Cooke D. R., Both R. A. Q. Trace elements in sulfide minerals from eastern Australian volcanic hosted massive sulfide deposits. Part I. Proton microprobe analyses of pyrite, chalcopyrite, and sphalerite. Part II. Selenium levels in pyrite comparison with $\delta^{34}\text{S}$ values and implication for the source of sulfur in volcanogenic hydrothermal systems // *Economic Geology*. 1995. Vol. 90. P. 1167–1196.

Labroo S. R., Linge H. G., Walker G. S. Review of gold extraction from ores // *Minerals Engineering*. 1994. Vol. 7. Is. 10. P. 1213–1241.

Maslennikov V. V., Maslennikova S. P., Large R. R., Danyushevsky L. V. Study of trace element zonation in vent chimneys from the Silurian Yaman-Kasy volcanic-hosted massive sulfide deposit (Southern Urals, Russia) using laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICPMS) // *Economic Geology*. 2009. Vol. 104. P. 1111–1141.