

Мурзин В. В., Сазонов В. Н., Ронкин Ю. Л. Модель формирования Воронцовского золоторудного месторождения на Урале (карлинский тип): новые данные и проблемы // Литосфера. 2010. № 6. С. 66–73.

Попова Ю. А., Бычков А. Ю., Матвеева С. С. Геохимические особенности лантаноидов при формировании месторождения Светлое (Чукотка) // Геохимия. 2016. № 8. С. 761–768.

Сорока Е. И., Притчин М. Е., Лютоев В. П., Галахова О. Л. Магнетитовая минерализация окорудных пород Сафьяновского медноколчеданного месторождения (Средний Урал) // Записки РМО. 2016. № 3. С. 23–35.

Язева Р. Г., Молошаг В. П., Бочкарев В. В. Геология Сафьяновского колчеданного месторождения (Средний Урал). Препринт. Екатеринбург: Наука, 1992. 70 с.

Ohmoto H., Goldhaber M. B. Sulfur and carbon isotopes. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. N.Y.: John Wiley and Sons. 1997. P. 517–611.

Н. П. Сафина, Н. Р. Аюпова, И. А. Блинов, Д. А. Артемьев
Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс
safina@ilmeny.ac.ru

Га-содержащие минералы в сульфидных брекчиях Шемурского колчеданного месторождения, Северный Урал

Введение. Галлий является одним из важных микроэлементов руд колчеданных месторождений. Это связано с его растущим использованием в высокотехнологичных областях промышленности и отнесением к категории критического сырья [Erdmann, Graedel, 2011]. Основным концентратором галлия в колчеданных рудах является сфалерит, средние содержания галлия в котором на различных месторождениях сильно варьируют. Наиболее богатый галлием сфалерит (от первых сотен до 3120 г/т) отмечается в рудах колчеданно-полиметаллических месторождений Африки (Цумб и Кипуши) [Cook et al., 2009]. В рудах этих месторождений установлены разнообразные Ga-содержащие минералы: германоколусит, германит, овамбоит и майкаинит, а также твердые растворы сфалерит-галлит и продукты их распада [Schluter et al., 2003; Спиридонов, Мурашко, 2010]. Содержания галлия в рудах колчеданных месторождений Урала сильно варьируют от 2.4 до 178 г/т [Молошаг и др., 2005]. Наиболее значимые содержания установлены в сфалерите сульфидных брекчий Султановского месторождения (среднее 741 г/т) и палеогидротермальных труб черных курильщиков Юбилейного месторождения (156 г/т) на Южном Урале [Масленников и др., 2014]. Собственные минералы галлия в колчеданных рудах Урала не установлены. Данная работа посвящена изучению минерального состава халькопирит-сфалерит-пиритовых обломочных руд Шемурского медно-колчеданного месторождения, где обнаружены Ga-содержащие сфалерит, халькопирит, хлорит и слюда, а также гидроксид или оксигидроксид галлия.

Методика работ. Минеральный состав руд изучен с использованием микроскопов Olympus-BX51 и Axiolab (CarlZeiss) с цифровыми приставками. Химический состав минералов определялся на сканирующем электронном микроскопе с рентгено-спектальным микроанализом VEGA3 Tescan (Институт минералогии УрО РАН, аналитик И. А. Блинов) и с помощью ЛА-ИСП-МС на приборе Agilent 7700X (Институт минералогии УрО РАН, аналитик Д. А. Артемьев).

Краткая характеристика месторождения. Шемурское медно-колчеданное месторождение расположено в Ивдельском рудном районе Северного Урала в северной части Тагило-Сакмарской металлогенической зоны. Месторождение связано с вулканитами контрастной базальт-риолитовой формации (O_3-S_1). Колчеданное оруденение локализуется в пределах верхней риолит-дацитовой толщи нижнешемурской подсветы, тяготея к ее обломочным фациям [Трякина, 1979]. Открытая разработка месторождения проводилась с 2010 по 2016 гг. Месторождение представлено двумя крупными рудными телами сложной формы и рядом мелких линз. Особенностью месторождения является наличие многочисленных крутопадающих даек основного состава мощностью от 1 до 20 м. В результате картирования залежи в карьере установлены сульфидные брекчии с фрагментами палеогидротермальных труб черных курильщиц, сульфидные песчаники и турбидиты преимущественно магнетит-пирит-сфалеритового состава и гематит-магнетитовые продукты субмаринного окисления колчеданных руд.

Результаты исследований. Ga-содержащие минералы установлены в сульфидных брекчиях, сложенных обломками пирита со сглаженными и конформными контурами в халькопирит-сфалеритовом цементе (рис. а). В обломках кристаллического пирита просматривается колломорфное ритмично-зональное и тонкозернистое строение, которое подчеркивается новообразованным сфалеритом и магнетитом. На микроуровне в пористых центральных частях почковидных агрегатов пирита установлены включения пирротина, галенита и Ga-содержащего хлорита.

Сфалерит в цементе брекчий образует сростки пластинчатых кристаллов с полисинтетическими двойниками с включениями халькопирита и новообразованными кристаллами пирита (рис. б). Для халькопирита характерны угловатые включения селенистого галенита (1.22–3.06 мас. % Se). Магнетит в цементе брекчий является редким минералом и наблюдается в сфалерите в виде единичных зерен или сростков с касситеритом. Кроме того, в ассоциации со сфалеритом установлены кобальтин, акантит и гринокит.

В химическом составе сфалерита (по данным рентгеноспектрального микроанализа) содержания Fe составляют 0.25–4.3 мас. %, Cd – до 0.43 мас. %. Концентрации Ga в сульфидных минералах (по данным ЛА-ИСП-МС) сильно варьируют: 67–363 г/т в сфалерите (среднее по 24 анализам 202 г/т, $\sigma = 87$), 33–364 г/т в халькопирите (среднее по 12 анализам 144 г/т, $\sigma = 100$) и 0.4–230 г/т в пирите (среднее по 20 анализам 22 г/т, $\sigma = 53$).

Среди нерудных Ga-содержащих минералов наиболее распространен хлорит в виде зерен размером 5–100 мкм, заполняющих интерстиции в агрегатах сфалерита (рис. в). В наиболее крупных зернах просматривается комковатое или пластинчатое строение с толщиной пластинок 3–10 мкм. Содержание примеси Ga_2O_3 в хлорите варьирует от 0.34 до 21 мас. %. Некоторые зерна обладают зональным строением: пластинки с высокими содержаниями MgO (11 мас. %) и Al_2O_3 (11 мас. %) окружены каймой до 2 мкм с их пониженными содержаниями (2.0 и 5.0 мас. %, соответственно), обогащенной FeO (38 мас. %). При этом содержание Ga_2O_3 в них сопоставимо и составляет 14 и 12 мас. %, соответственно. Минимальные содержания Ga_2O_3 (0.38–3 мас. %) характерны для хлорита, который ассоциирует с кварцем в сфалерите (рис. г). В единственном случае обнаружен сросток Ga-содержащего хлорита и касситерита-(Ta) на контакте зерен сфалерита и халькопирита.

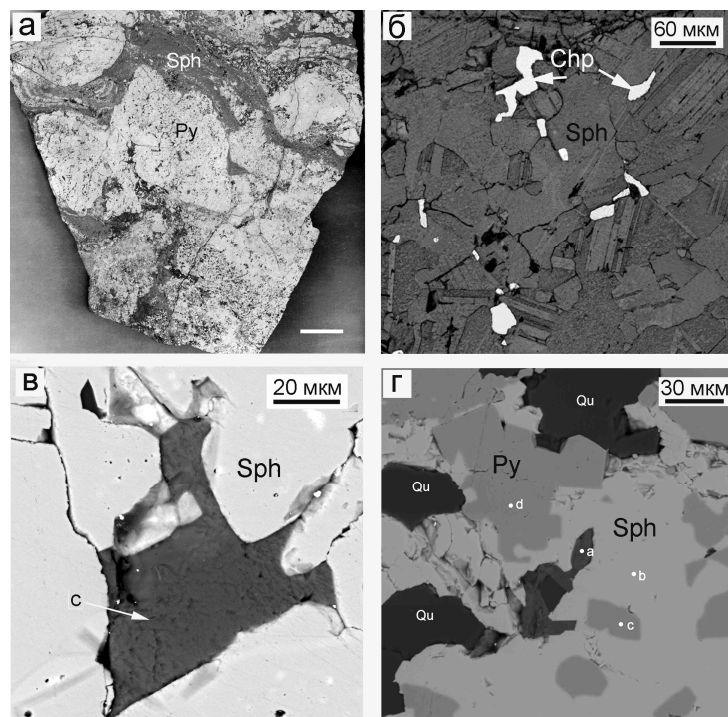


Рис. Позиция Ga-содержащего хлорита в сульфидных брекчиях Шемурского месторождения: а) обломки пирита (Py) в сфалерите (Sph); б) ксеноморфный халькопирит (Chp) в свдвойникованном сфалерите; в–г) Ga-содержащий хлорит в сфалерите (в) и в срстании с кварцем (Qu) в сфалерите (г).

Фото: а – полированный штупф, масштаб 1 см; б – отраженный свет (сфалерит протравлен в парах царской водки); в–г – СЭМ.

Значимые корреляционные зависимости между содержаниями Ga и Zn в хлорите не установлены, тогда как между Ga и Al отмечается обратная зависимость ($r^2 = -0.95$), указывающая на замещение алюминия галлием в структуре хлорита.

Реже в сфалерите удается обнаружить пластинчатые сростки Ga-содержащих хлорита и слюды длиной до 100 мкм и шириной 10 мкм. Основной объем сростков занимает слюда, лишь к периферии отмечается ритмичное чередование пластинок хлорита и слюды с мощностью пластинок менее 5 мкм. Параллельные пластинки хлорита характеризуются варьирующими содержаниями MgO (11 и 17 мас. %) и FeO (20 и 28 мас. %) при сопоставимых концентрациях Ga₂O₃ (7.7 и 8.5 мас. %). Самостоятельные зерна Ga-содержащей слюды в виде пластинчатых агрегатов длиной до 40 мкм и шириной 3–5 мкм обнаружены во всех сульфидных минералах цементирующей матрицы. Содержания Ga₂O₃ в слюде меняются от 5 до 20 мас. %.

На месторождении установлены редкие зерна гидроксида (или оксигидроксида) галлия округлой формы размером 2–3 мкм, равномерно рассеянные в сфалерите. При анализе этих фаз методом РЭМ всегда «захватывается» сфалеритовая матрица, что вносит погрешность в измерение и делает невозможным определение количества кислорода. В настоящее время в базах данных (mindat.org) известны два минерала –

зенгейт ($\text{Ga}(\text{OH})_3$) и цумгаллит (GaOOH). Оба минерала редки и описаны лишь на месторождении Цумеб (Намибия) [Schluter et al., 2003].

Обсуждение и заключение. Обнаружение сульфидных брекчий с фрагментами труб палеокурильщиков предполагает хорошую сохранность сульфидной залежи Шемурского месторождения. Их образование происходило в результате субмаринной эрозии массивных гидротермально-осадочных руд с формированием аутигенной минерализации, распространенной между обломками сульфидов. Такие руды, как правило, располагаются в кровле слабозрушенных сульфидных холмов (например, Яман-Касы, Сафьяновское) и представляют собой малоизмененные разности [Масленников, 2006]. В изученных образцах сульфидных брекчий автохтонные обломки кристаллического пирита сцементированы халькопиритом и сфалеритом с изоморфной примесью Ga и многочисленными включениями Ga-содержащих силикатных минералов и оксигидроксида (?) галлия. Эти минералы на колчеданных месторождениях Урала обнаружены впервые. В настоящее время в официальном перечне IMA из природных галлиевых силикатных фаз числится лишь эпидот-(Ga). Он обнаружен в сростании с аланитом-(Ga) и кварцем в сфалерите из руд золото-серебряного проявления Тыкатловское (Приполярный Урал) [Ковальская и др., 2015]. Нами установлено, что обогащение галлием колчеданных руд Урала может быть связано как с изоморфным вхождением галлия в структуру сульфидных минералов, так и с присутствием в сульфидной матрице многочисленных включений Ga-содержащих силикатов, гидроксидов (или оксигидроксилов) галлия.

Работа выполнена в рамках государственной бюджетной темы Института минералогии УрО РАН «Минералогия и геохимия рудных и рудоносных фаций как отражение геологической истории палеогидротермальных систем» (№ АААА-А16-11-6021010244-0) и проекта Президиума РАН № 15-11-523.

Литература

Ковальская Т. Н., Варламов Д. А., Котельников А. Р., Калинин Г. М. О возможности вхождения галлия в структуру силикатов и алюмосиликатов в системе Ga-Ca-Fe-Al-Si-O-H₂O // Тр. Всерос. ежегод. сем. эксперим. минерал., петрол., геохимии. М.: ГЕОХИ РАН, 2015. С. 171–174.

Масленников В. В. Литогенез и рудообразование. Миасс: ИМин УрО РАН, 2006. 384 с.

Масленников В. В., Аюпова Н. Р., Масленникова С. П., Третьяков Г. А., Мелекесцева И. Ю., Сафина Н. П., Белогуб Е. В., Ларж Р. Р., Данюшевский Л. В., Целуйко А. С., Гладков А. Г., Крайнев Ю. Д. Токсичные элементы в колчеданообразующих системах. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2014. 340 с.

Молошаг В. П., Викентьев И. В., Гуляева Т. Я., Тесалина С. Г. Борнитовые руды колчеданных месторождений Урала // Литосфера. 2005. № 3. С. 99–116.

Спиридонов Э. М., Мурашко М. Н. Генетическая минералогия Ge, Ga, W, Mo, V, Sn эндогенных руд колчеданно-полиметаллического месторождения Цумеб, Намибия // Мат. конф. «Современная минералогия: от теории к практике». СПб, 2010. С. 277–279.

Трякина Н. П. Некоторые особенности геологического строения и зональности руд Шемурского месторождения // В кн.: Вопросы генезиса эндогенной зональности колчеданных месторождений. Тр. ЦНИГРИ. Вып. 148. М., 1979. С. 62–65.

Cook N. J., Ciobanu C. L., Pring A., Skinner W., Shimizu M., Danyushevsky L., Saini-Eidukat B., Melcher F. Trace and minor elements in sphalerite: A LA-ICPMS study // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2009. Vol. 73. P. 4761–4791.

Erdmann L., Graedel T. E. Criticality of non-fuel minerals: a review of major approaches and analyses // Environmental Science and Technology. 2011. Vol. 45. P. 7620–7630.

Schluter J., Klaska K-H., Adiwidjaja G., Gebhard G. Tsumgallite, GaO(OH), a new mineral from the Tsumeb mine, Tsumeb, Namibia // *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Monatshefte.* 2003. Vol. 11. P. 521–527.

И. А. Блинов¹, А. В. Бутняков²

*1 – Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс
blinov@mineralogy.ru*

2 – Уральский филиал ПМУК, г. Екатеринбург

Минералы зоны окисления Кабанского колчеданного месторождения (Средний Урал)

Введение. Группа Кабанских колчеданных месторождений приурочена к западной полосе Тагило-Магнитогорской зоны Среднего Урала и связана с риолит-базальтовой формацией [Puchkov, 2016]. Главные рудные минералы – пирит и халькопирит, реже встречаются сфалерит, арсенопирит, теннантит и галенит. Среди редких минералов отмечаются гипогенный борнит, «оранж-борнит» и энаргит [Логоинов, 1950]. На месторождении Кабан-1 развита зона окисления с типичной для колчеданных месторождений зональностью [Смирнов, 1955]. Верхняя часть зоны окисления (железная шляпа, зона выщелачивания) была отработана летом 2013 г. с целью извлечения золота.

Методика работ. Пробы для исследований были отобраны из железной шляпы (бурые железняки) и зоны выщелачивания (кварцевые и пиритовые сыпучки). Изучение морфологии и химического состава минералов проводилось в полированных образцах, смонтированных в эпоксидную смолу, методом растровой электронной микроскопии на приборе Tescan Vega 3 с энерго-дисперсионным анализатором Oxford Instruments X-act (аналитик И. А. Блинов).

Результаты исследований. В бурых железняках установлены самородное золото, ковеллин, касситерит, коронадит, йодаргирит и минералы семейства алунита, в кварцевых сыпучках – самородный селен, касситерит, барит и минералы семейства алунита. Особенность минерального состава пиритовых сыпучек – присутствие многочисленных зерен самородного селена, а также редких зерен науманнита и касситерита.

Самородное золото в виде зерен изометричной, чаще овальной или округлой формы размером до 2–3 мкм найдено среди гидроксидов железа только в бурых железняках. Золото характеризуется вариациями содержаний Ag (0.44–3.36 мас. %).

Самородный селен – распространенный минерал кварцевых и пиритовых сыпучек. По визуальной оценке, его содержания достигают 0.5–1 об. %. Размеры зерен не превышают 3 мкм. На ЭД-спектрах в составе минерала присутствуют линии Sn, S, Ti, Cu, Fe, K и Si. В пиритовых сыпучках выявлено несколько зерен самородного селена, на спектрах которых присутствуют линии Te.

Касситерит в бурых железняках встречается в виде идиоморфных кристаллов (до 3 мкм) или скрытокристаллических масс, заполняющих пустоты (рис. а). Гипергенное происхождение касситерита доказывается его расположением в трещинах (см. рис. б). Минерал диагностирован по качественному ЭД-спектру, на котором, кроме Sn и O, фиксируются V, Ti и Fe. В кварцевых сыпучках касситерит образует как