

Часть 4. МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Н. Р. Аюпова^{1,2}, В. В. Масленников^{1,2}, И. А. Блинов¹, С. П. Масленникова¹
¹ – Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс
ayova@mineralogy.ru

² – Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе

Индий в рудах медно-цинково-колчеданных месторождений Урала

В настоящее время индий считается стратегическим металлом, который широко используется как в классических технических областях, так и в инновационных нанотехнологиях. Основным промышленным источником индия являются цинковые и олово-полиметаллические месторождения. Потребление индия с каждым годом увеличивается, и по современным оценкам запасы индия будут исчерпаны в ближайшие 20 лет. В связи с этим, особый интерес представляют колчеданные месторождения как перспективные для извлечения индия из руд при создании новых технологий обогащения.

Индий в колчеданных рудах присутствует как в виде изоморфной примеси в высокотемпературных гидротермальных разновидностях сфалерита и халькопирита, так и в виде включений собственного минерала – рокезита [Cabri et al., 1985; Schwarz-Schampera, Herzig, 2002; Hannington et al., 1999; Gaspar, 2002; Cook et al., 2011]. В целом, среднее содержание индия в колчеданных рудах низкое (от первых до 10 г/т), однако на некоторых месторождениях его содержания превышают средне-статистические значения. Примерами колчеданных месторождений с высоким содержанием In являются месторождения Кид Крик (<50 г/т, 3400 т In) и Сулливан (50 г/т, 8000 т In) в Канаде [Hannington et al., 1999], Невеш Корво (>18 г/т, 7000 т In) в Португалии [Gaspar, 2002], Косака-Учинотай (26 г/т, 8064 т In) в Японии [Ishihara, Endo, 2007].

Вопросы геохимии и минералогии индия на уральских колчеданных месторождениях изучены не достаточно. Среднее содержание индия в рудах колчеданных месторождений Южного Урала составляет 2–14.1 г/т с редкими аномальными значениями (23–30 г/т). Подобно извлечению многих ценных компонентов (Au, Ag, Se, Te, Cd и др.) из колчеданных руд Урала, извлечение In остается на одном уровне и составляет 20.6 %. Значительная часть индия при переработке колчеданных руд теряется с отходами добычи и хвостами флотации. Несмотря на то, что результаты выщелачивания из колчеданных руд показывают переход индия в продуктивный раствор при достаточно высоких концентрациях, однако процессы выщелачивания протекают нестабильно и имеют различные показатели для руд из различных месторождений, что связано с особенностями сложного минерального состава [Илимбетов и др., 2008]. В связи с этим, изучение минеральных ассоциаций с выявлением обогащенных индием минералов в различных рудных фациях позволит усовершенствовать методы извлечения индия.

Нами изучены колчеданные руды Молодежного медно-цинково-колчеданного месторождения, расположенного в зоне Восточно-Магнитогорской палеоостровной дуги на Южном Урале. Более 25 лет (до 2003 г.) месторождение обрабатывалось открытым способом; в настоящее время оставшиеся запасы руд добываются подземным способом. На месторождении выделены четыре рудных тела, имеющих общий рудоподводящий канал, который фиксируется зоной пиритовых прожилков и сплошными пиритовыми рудами. В сульфидных брекчиях месторождения обнаружены многочисленные фрагменты труб «черных курильщиков» [Maslennikov et al., 2013]. На флангах рудной залежи сульфидные брекчии сменяются сульфидными турбидитами с градационной слоистостью, а сульфидные турбидиты – тонкополосчатыми борнит-теннантит-пирит-халькопиритовыми рудами, являющимися продуктами субмаринного гипергенеза сульфидных отложений [Масленников, Зайков, 1991; Зайков, 2006]. В последних установлены необычные редкие минералы, такие как самородное золото, моусонит, маккинстрит, станноидит, арсеносульванит, энаргит, свидетельствующие о невысоких температурах минералообразования [Колотов, Гмыра, 1990; Зайков, 2006].

На западном фланге месторождения установлены короткие линзовидные тела колчеданных руд мощностью до 1 м, где наблюдается чередование слоев пирит-халькопиритового, кварц-баритового и гематитового состава, которые соответствуют подзонам (снизу вверх): 1) медного обогащения, 2) кварц-баритового выщелачивания и 3) продуктов полного окисления колчеданных руд зоны субмаринного гипергенеза мелкообломочных сульфидных отложений [Аюпова и др., 2015]. В рудных слоях наблюдается замещение пиритовых рудокластов халькопиритом, а халькопирита – борнитом, теннантитом или баритом, а в подзоне полного окисления – гематитом. Особенностью их минерального состава является присутствие многочисленных включений селенидов в ассоциации с самородным золотом [Аюпова и др., 2015].

С этими рудами, также как и сульфидными брекчиями, содержащими обломки пирит-сфалерит-халькопиритовых «черных курильщиков», связаны отдельные максимумы (до 101 г/т) и высокие концентрации (30–90 г/т) индия в пределах рудного тела. Выявлено, что содержание индия в гематитовой и баритовой подзонах субмаринного гипергенеза (5.7–23 г/т) значительно ниже, чем в подзоне медного обогащения (98 г/т). В массивных серноколчеданных рудах и грубообломочных продуктах их разрушения содержания индия обычно не превышают 5 г/т.

Методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией установлено, что в главных сульфидах труб «черных курильщиков» средние содержания индия составляют (г/т) 4 (колломорфный пирит оболочки труб), 127 (друзовой халькопирит внутренней стенки труб) и 234 (сфалерит, запечатавший осевые части каналов труб). Судя по равномерному распределению импульсов на трендах ЛА-ИСП-МС, индий изоморфно входит в состав халькопирита и сфалерита. В зоне субмаринного медного обогащения в реликтовом пирите, так же как и в колломорфном пирите труб «черных курильщиков», содержания In низкие (3 г/т). В аутигенном халькопирите, заместившем пиритовые рудокласты, In концентрируется в значительных количествах (75 г/т). Тренды ЛА-ИСП-МС халькопирита указывают на присутствие микровключений собственной минеральной формы индия.

С помощью электронной микроскопии (СЭМ VEGA3 Tescan с энергодисперсионным анализатором) в аутигенном халькопирите и теннантите впервые для колчеданных месторождений Урала установлен минерал индия – рокезит CuInS_2 [Аюпова и др., 2015]. Самые значительные по размерам (до 12 мкм) изометричные агрегаты

Таблица

Химический состав рокезита, мас. %

№ п/п	Cu	In	Fe	Pb	Se	S	Сумма	Кристаллохимическая формула
1	26.20	47.36	0.01	–	–	26.45	100.02	$Cu_{1.0}In_{1.07}S_{1.92}$
2	24.40	46.98	0.79	1.76	0.98	25.08	99.99	$Cu_{0.95}Fe_{0.03}Pb_{0.02}In_{1.01}Se_{0.03}S_{1.97}$
3	22.11	46.43	1.42	2.28	1.45	26.28	99.97	$Cu_{0.83}Fe_{0.06}Pb_{0.03}In_{0.97}Se_{0.04}S_{1.96}$
4	21.12	45.37	2.82	4.02	2.30	23.96	99.59	$Cu_{0.77}Fe_{0.12}Pb_{0.04}In_{0.96}Se_{0.10}S_{1.90}$
5	25.76	44.6	1.53	–	4.47	23.64	100.00	$Cu_{1.02}Fe_{0.07}In_{0.98}Se_{0.15}S_{1.93}$
6	26.6	41.88	3.54	–	2.91	25.07	100.00	$Cu_{1.02}Fe_{0.15}In_{0.89}Se_{0.09}S_{1.85}$
7	25.67	44.91	0.98	–	4.42	24.01	100.00	$Cu_{1.00}Fe_{0.04}In_{0.97}Se_{0.15}S_{1.95}$

Примечание. Анализы выполнены на СЭМ VEGA3 Tescan с энергодисперсионным анализатором в Институте минералогии УрО РАН. Аналитик И. А. Блинов.

рокезита, представленные пластинчатыми кристаллами, находятся, как правило, в тесной ассоциации с клаусталитом. В составе рокезита постоянно отмечаются примеси Fe, Se и Pb (табл.). Основное количество микровключений рокезита имеет размеры 2–3 мкм.

Таким образом, высокие концентрации индия в колчеданных рудах Урала связаны не только с его изоморфным вхождением в халькопирит и сфалерит, но и с присутствием собственной минеральной формы индия – рокезита. Рокезит обнаружен в аутигенных продуктах субмаринного гипергенеза, сформированных в результате разрушения труб «черных курильщиков» на флангах колчеданной залежи. Основное количество In, вероятно, поступило при растворении обломков гидротермального сфалерита, неустойчивого в зоне субмаринного гипергенеза в присутствии окисляющегося пирита. Известно, что образование In-содержащих фаз может происходить с растворением сульфидов как при низких, так и при высоких температурах [Schwarz-Schampera, Herzig, 2002]. Можно также предполагать, что значительное количество микровключений рокезита образовалось за счет локального перераспределения индия в халькопирите при его замещении теннантитом. Геохимическая ассоциация индия с селеном, свинцом, серебром, золотом и другими элементами имеет индикаторное значение для процессов субмаринного гипергенного минералообразования.

Учитывая, что необходимым условием любых технологических исследований являются всесторонние знания минералогии руд, результаты исследований основных принципов распределения индия в пределах колчеданных залежей, различных типов руд и минералах, а также выявление собственных минералов индия могут быть использованы для оценки уровня извлечения In из колчеданных руд.

Работы выполнены при поддержке проекта ОФИ № 13-05-012.

Литература

Аюпова Н. Р., Масленников В. В., Котляров В. А. и др. Минералы селена и индия в зоне субмаринного гипергенеза колчеданной залежи Молодежного медно-цинково-колчеданного месторождения, Южный Урал // Доклады Академии наук. 2015 (в печати).

Зайков В. В. Вулканизм и сульфидные холмы палеоокеанических окраин. М.: Наука, 2006. 429 с.

Илимбетов А. Ф., Радченко Д. Н., Абдрахманов И. А. К обоснованию процессов комплексного освоения медно-колчеданных месторождений физико-химической геотехнологией // Мат. симп. «Неделя горняка–2007». Учалы, 2008. С. 312–319.

Масленников В. В., Зайков В. В. О разрушении и окислении сульфидных холмов на дне Уральского палеоокеана // Доклады Академии наук СССР. 1991. Т. 319. № 6. С. 1434–1437.

Cabri L. J., Campbell J. L., Laflamme J. H. et al. Proton microprobe analyses of trace elements in sulfides from some massive sulfide deposits // Canadian Mineralogist. 1985. Vol. 23. P. 133–148.

Cook N. J., Ciobanu C. L., Williams T. The mineralogy and mineral chemistry of indium in sulphide deposits and implications for mineral processing // Hydrometallurgy. 2011. Vol. 108. P. 226–228.

Gaspar O. C. Mineralogy and sulfide mineral chemistry of the Neves-Corvo ores, Portugal: insight into their genesis // Canadian Mineralogist. 2002. Vol. 40. P. 611–636.

Hannington M. D., Bleeker W., Kjarsgaard I. Sulfide mineralogy, geochemistry, and ore genesis of the Kidd Greek deposit. II. The bornite zone // Economic Geology Monograph. 1999. Vol. 10. P. 225–266.

Ishihara Sh., Endo Yu. Indium and other trace elements in volcanogenic massive sulfide ores from the Kuroko, Besshi and other types in Japan // Bulletin of the Geological Survey of Japan. 2007. Vol. 58 (1/2). P. 7–22.

Maslennikov V. V., Maslennikova S. P., Large R. R. et al. Tellurium-bearing minerals in zoned sulfide chimneys from Cu-Zn massive sulfide deposits of the Urals, Russia // Mineralogy and Petrology. 2013. Vol. 107 (1). P. 67–99.

Schwarz-Schampera U., Herzig P.M. Indium. Geology, mineralogy and economics. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2002. 257 p.