

ПРИМЕНЕНИЕ Ga-Ge ГЕОТЕРМОМЕТРА ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИЙ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ ТРУБЫ ЮБИЛЕЙНОГО МЕДНО-КОЛЧЕДАННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

Целуйко А.С., Артемьев Д.А.

Южно-Уральский научный центр минералогии и геоэкологии, г. Миасс, celyukoa@rambler.ru

Примеси Ga, Ge, а также Fe, Cd, Cu, Pb, Ag, Sn, Sb, Mn, Hg могут изоморфно входить в состав сфалерита [Cook et al., 2009; Frenzel et al., 2016; Wei et al., 2018]. Установлено, что содержание микропримесей зависит от температуры рудообразования [Moller et al., 1987; Frenzel et al., 2016; Wei et al., 2018]. В последнее время для расчета температуры формирования сфалерита активно используется геотермометр GGIMFis, в основе которого лежит предположение что примеси Fe, Mn, Ga, Ge и In входят в структуру сфалерита [Frenzel et al., 2016]. В данной работе приведены основанные на данных ЛА-ИСП-МС анализов расчеты температур образования сфалерита гидротермальных труб Юбилейного медноколчеданного месторождения.

ЛА-ИСП-МС анализы сфалерита (69 точек) выполнены на масс-спектрометре Agilent 7700х, оборудованного приставкой для лазерной абляции New Wave Research UP-213 в Институте минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (аналитик Д.А. Артемьев). Диаметр лазерного пучка составлял 60 мкм, частота – 5 Гц, энергия на поверхности образца 4-5 Дж/см². Время анализа составляло 100 с, из которых 30 с занимало измерение фона. Для калибровки использовались стандарты MASS-1, NIST, GSD, STDGL и др., представляющие собой смесь литий-боратного стекла и сульфидов. Несущий газ – He 0.6 л/мин и Ar 0.95 л/мин. Расчет проводился в программе Iolite с использованием ⁵⁷Fe в качестве внутреннего стандарта.

Юбилейное медно-колчеданное месторождение расположено в Бурибайском рудном районе (республика Башкортостан) и приурочено к Западно-Магнитогорской палеовулканической зоне [Медно-колчеданные..., 1988]. Рудные тела месторождения локализованы в породах баймак-бурибайской свиты, соответствующей раннедевонскому начальному циклу островодужного вулканизма (Dle2b-br) [Косарев и др., 2014]. Юбилейное месторождение представлено шестью рудными залежами северо-западного простирания, исследованные сульфидные трубы обнаружены в рудах Второй залежи.

Изученная сульфидная труба (обр. юб-11-8-5) размером 4×2 см, имеет выраженное концентрически-зональное строение и вытянутую форму. Во всех зонах гидротермальной трубки содержится различное

количество сфалерита. Оболочка трубы сложена сноповидными агрегатами пирита, отделенных от внутренней халькопиритовой стенки мелкозернистым пирит-сфалеритовым слоем. Отмечается что от внешней к внутренней части халькопиритовой стенки трубы возрастает количество сфалерита, который развит в виде кайм вокруг кристаллов халькопирита и выполнения интерстиций халькопиритовых агрегатов. Осевого канал заполнен почковидными сфалеритовыми и халькопирит-сфалеритовыми агрегатами в кальцитовом цементе. В агрегатах сфалерита всех зон наблюдается тонкая вкрапленность халькопирита.

Сфалерит гидротермальной трубки отличается широкими вариациями содержаний элементов-примесей (г/т): Ga (0.2–1470), Ge (9.5–182), Mn (84–623), As (0.6–1790), Mo (0.02–133), In (13.7–98.2), Au (0.01–299), Ag (4.5–526), Sb (0.6–1760), Pb (13.1–51900) и Hg (72.4–419). По содержаниям микропримесей гидротермальный сфалерит Юбилейного месторождения сопоставим со сфалеритом сульфидных труб колчеданных месторождений уральского типа [Maslennikov et al., 2017]. Максимальные медианные концентрации Ga (602 г/т) отмечаются в агрегатах сфалерита осевого канала, а содержания Ge, наоборот, возрастают в сфалерите оболочки (106 г/т). Концентрации Ga коррелируют с Se ($r = +0.81$), Cd ($r = +0.36$), Sn ($r = +0.31$) и In ($r = +0.33$), а Ge с Tl ($r = +0.52$), As ($r = +0.43$) и Pb ($r = +0.32$).

Галлий-германиевый сфалеритовый геотермометр GGIMFis – эмпирический, полученные по нему данные коррелируют с температурами гомогенизации флюидных включений в сфалерите [Frenzel et al., 2016]. Температура рудообразования вычисляется по формуле:

$$T (^{\circ}\text{C}) = (54.4 \pm 7.3) \times PC1 + (208 \pm 10), \text{ где}$$

$$PC1 = \ln\left(\frac{C_{Ga}^{0.22} \times C_{Ge}^{0.22}}{C_{Fe}^{0.37} \times C_{Mn}^{0.20} \times C_{In}^{0.11}}\right)$$

В геотермометре используются содержания Ga, Ge, In и Mn в г/т, а концентрации Fe в масс. %. Расчетные температуры формирования агрегатов сфалерита сульфидной трубы Юбилейного месторождения составляют 147–291 °C и несколько отличается в различных зонах (табл.).

Таблица. Содержание элементов-примесей в сфалерите гидротермальной трубы (обр. юб-11-8-5) и расчетные температуры рудообразования, полученные по Ga-Ge геотермометру GGIMFis

Медианы концентраций элементов-примесей в сфалерите						Данные геотермометра	
Зоны	Ga, г/т	Ge, г/т	Fe, масс. %	Mn, г/т	In, г/т	T °C вариации	T °C медиана
Оболочка-1	44.2	56.3	1.5	152.9	28.8	147–252	201
Оболочка-2	9.3	105.6	1.5	166.2	27.2	178–273	215
Стенка трубы	170.6	77.7	1.91	261.1	46.1	168–214	190
Осевой канал-1	407.0	27.8	1.53	191.0	40.3	161–291	191
Осевой канал-2	602.6	41.3	1.41	192.8	52.8	149–243	182

Примечание: оболочка-1 – периферийная часть, оболочка-2 – внутренняя часть оболочки; осевой канал-1 – внешняя, ближайшая к стенке, часть заполнения осевого канала трубы, осевой канал-2 – центральная часть осевого канала.

Максимальная температура (178–273 °C) фиксируется в сфалерите внутренней, примыкающей к стенке, части оболочки трубы, а минимальная (149–243 °C) – в сфалеритовых агрегатах центральной части осевого канала трубы. Полученные с помощью Ga-Ge геотермометра температуры согласуются с данными гомогенизации флюидных включений в сосуществующем со сфалеритом кальците (200–220 °C) и кварце (200–230 °C) в осевых каналах палеогидротермальных труб Юбилейного месторождения [Целуйко, Анкушева, 2016]. Данные также не противоречат расчетам формирования сульфидов гидротермальных труб «палеокурильщиков» колчеданных месторождений Урала, полученных другими геотермометрами [Масленникова, Масленников, 2007].

Использование Ga-Ge геотермометра GGIMFis на примере сфалерита палеогидротермальных труб показало его высокую перспективность для определения параметров рудообразования колчеданных руд.

Исследование выполнено в рамках исполнения государственного задания № АААА-А19-119061790049-3 ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Косарев А.М., Серавкин И.Б., Холоднов В.В. Геодинамические и петролого-геохимические аспекты зональности Магнитогорской колчеданосной мегазоны на Южном Урале // Литосфера. 2014. № 2. С. 3–25.
2. Масленникова С.П., Масленников В.В. Сульфидные трубы палеозойских «чёрных курильщиков» на примере Урала. Екатеринбург-Миасс: УрО РАН, 2007. 312 с.
3. Медноколчеданные месторождения Урала: Геологическое строение / Прокин В.А., Буслаев Ф.П., Исмагилов М.И. и др. Свердловск: УрО РАН, 1988. 241 с.
4. Целуйко А.С., Анкушева Н.Н. Условия формирования труб «палеокурильщиков» Юбилейного медноколчеданного месторождения (Южный Урал) по данным термобарогеохимии и КР-спектроскопии // Металлогения древних и современных океанов-2016. Миасс: ИМин УрО РАН, 2016. С. 101–106.
5. Cook N.J., Ciobanu C.L., Pring A., Skinner W., Shimizu M., Danyushevsky L., SainiEidukat B., Melcher F. Trace and minor elements in sphalerite: A LA-ICPMS study // Geochim. Cosmochim. Acta. 2009. V. 73. P. 4761–4791.
6. Frenzel M., Hirsch T., Gutzmer J. Gallium, germanium, indium, and other trace and minor elements in sphalerite as a function of deposit type—A meta-analysis // Ore Geol. Rev. 2016. V. 76. P. 52–78.
7. Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R.R., et al. Chimneys in Paleozoic massive sulfide mounds of the Urals VMS deposits: mineral and trace element comparison with modern black, gray and clear smokers // Ore Geol. Rev. 2017. V. 85. P. 64–106.
8. Möller P. Correlation of homogenization temperatures of accessory minerals from sphalerite-bearing deposits and Ga/Ge model temperatures // Chem. Geol. 1987. V. 61. P. 153–159.
9. Wei C., Huang Z., Yan Z., Hu Y., Ye L. Trace element contents in sphalerite from the Nayongzhi Zn-Pb deposit, Northwestern Guizhou, China: insights into incorporation mechanisms, metallogenic temperature and ore genesis // Minerals. 2018. V. 8(11). P. 490.