

В. П. Молошаг
Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург
moloshag@igg.uran.ru

Использование состава минералов для оценки физико-химических условий образования колчеданных руд Урала

Основной переменной, используемой при анализе минеральных равновесий, является температура, значения которой находились с помощью методов минералогической термометрии. Для получения данных о температуре образования минеральных ассоциаций привлекались электрум-сфалеритовый, арсенопиритовый и пирит-пирротинный геотермометры, которые, кроме того, дают возможность оценить летучесть серы, как одного из ведущих параметров условий образования сульфидных руд.

Основу электрум-сфалеритового геотермометра составляют данные по железистости (X_{FeS}) сосуществующего с самородным золотом сфалерита и атомного количества серебра в самородном золоте $N_{\text{Ag}} = \text{Ag}/(\text{Ag} + \text{Au})$. Значение температуры T °К и летучести серы f_{S_2} (в атм.) вычисляются по формулам [Shikazono, 1985]:

$$T = \{28765 + 22600 (1 - N_{\text{Ag}})^2 - 6400 (1 - N_{\text{Ag}})^3\} / \{49.008 - 9.152 \log X_{\text{FeS}} + 18.2961 \log N_{\text{Ag}} + 5.5 (1 - N_{\text{Ag}})^2\};$$
$$\log f_{\text{S}_2} = 14.32 - 15.460/T - 2 \log X_{\text{FeS}}.$$

Арсенопиритовый геотермометр основан на экспериментальных исследованиях зависимости его состава от температуры и летучести серы [Kretschmar, Scott, 1976]. Исходя из парагенетических ассоциаций арсенопирита и его состава, можно получить данные о температуре и летучести серы в период их образования. На колчеданных месторождениях он встречается в рудах пирротиновой и частично халькопиритовой минеральных ассоциаций (фаций) [Молошаг и др., 2004]. Результаты термометрических исследований кварц-сульфидных золоторудных месторождений, полученные на основе состава арсенопирита и методом гомогенизации газовой-жидких включений, показали удовлетворительную сходимость данных методов. Состав и парагенетические ассоциации минералов сульфидной составляющей данных месторождений наиболее близко соответствуют колчеданным рудам. Температуру и летучесть серы находят по точкам пересечения изоплет состава пирротина с линией пирит-пирротинного сольвуса на диаграммах $\log f_{\text{S}_2} - 1/T$ °К [Тулмин, Бартон, 1968].

В пирротиновых рудах колчеданных месторождений, залегающих во вмещающих породах, метаморфизованных до уровня амфиболитовой фации наряду с преобразованиями сульфидов железа происходят глубокие изменения минеральных форм нахождения цинка, бария и других элементов. Процессы замещения сфалерита глиноземистой шпинелью и магнетитом, которые содержат примесь цинка, частично проявлялись и на Урале, в пользу чего свидетельствует их присутствие в рудах месторождений Гарньерского и им. 50-летия Октября.

В методическом отношении особый интерес представляют находки самородного висмута в сростках с висмутином Bi_2S_3 , которые подтверждают корректность методики определения температуры формирования пирротинсодержащих руд. Найденные по составу пирротина, находящегося в равновесии с пиритом, значения

температуры и летучести серы попадают на линию равновесия висмутитина с самородным висмутом, что свидетельствует о корректности использования пирит-пирротинового геотермометра. В пирротинсодержащих минеральных ассоциациях часто отмечается магнетит, что при наличии определений температуры и летучести серы позволяет перейти к оценкам летучести кислорода.

Недавно опубликованные данные по составу арсенопирита гидротермальных сульфидных труб Сафьяновского месторождения, который находится в равновесии с пиритом, показали, что он изменяется от 30.5 до 32.0 ат. % As [Масленникова, Масленников, 2007]. Это соответствует температурному диапазону образования данных образцов 380–420 °С, который не выходит за пределы ранее выделенной арсенопиритовой фации и укладывается в пределы уточненных значений температуры растворов современных активных гидротермальных построек [Von Damm et al., 2003]. Сульфидные руды современных гидротермальных построек трога Эскабана (хребет Горда, северо-восток Тихого океана) по набору минералов и их составу соответствуют выделяемой нами пирротиновой фации [Молошаг и др., 2004]. В этих постройках состав арсенопирита сосуществующего с леллингитом изменяется от 34 до 35 ат. % As, содержание Co и Ni соответственно составляет сотые и десятые весовые доли процента [Koski et al., 1988]. Как показывают упомянутые исследования состава арсенопирита, в системе Fe–As–S температура образования ассоциации арсенопирит-леллингит изменялась от 320 до 410 °С, значение летучести серы от $10^{-13.4}$ до $10^{-10.8}$ атм. [Kretschmar, Scott, 1976].

Находки леллингита в современных подводных гидротермальных постройках Северо-Восточной рифтовой зоны Тихого океана, а также на колчеданных месторождениях Урала (Ишкининское и Яман-Касы) и Северного Прибайкалья (Холоднинское), подтверждают целесообразность выделения леллингитовой субфации, как одного из этапов формирования парагенетических ассоциаций минералов колчеданных месторождений [Масленникова, Масленников, 2007; Мелекесцева, Зайков, 2003; Koski et al., 1988].

Наряду с этим подтверждением выбранного подхода для детализации условий изменения минеральных ассоциаций колчеданных руд с привлечением минералов мышьяка являются детально описанные находки энаргита в мелководных, практически приповерхностных гидротермальных постройках Тирренского моря, район Эоловых островов [Dekov, Savelli, 2004]. Несомненный интерес представляют находки энаргита в недавно открытых на глубинах порядка 1000 м подводных сульфидно-сульфатных постройках в Бренсфилдском проливе вблизи Южных Шетландских островов, северная окраина Антарктиды [Petersen et al., 2004]. Минерализация этих построек ассоциирует с частично литифицированными пелагическими и вулканокластическими осадками.

Полученные новые определения температуры и летучести серы с помощью электрум-сфалеритового и арсенопиритового геотермометров позволили уточнить условия формирования руд месторождений Молодежное, Дегтярское, им. III Интернационала. Находки арсенопирита и леллингита в сульфидных образованиях современных подводных гидротермальных построек и слабо метаморфизованных колчеданных месторождений Урала подтверждают правомочность ранее выделенных нами минеральных ассоциаций руд и дают возможность определения температуры и летучести серы в период их образования. Определения состава пирротина позволили уточнить температуру и летучесть серы в период формирования руд, что подтверждается наличием равновесной ассоциации самородного висмута с висмутином.

Исследования выполнялись при поддержке РФФИ (проекты 01-05-64510; 03-05-64206 и 07-05-00808).

Литература

Масленникова С. П., Масленников В. В. Сульфидные трубы палеозойских «черных курильщиков». Екатеринбург–Миасс: УрО РАН, 2007. 312 с.

Мелекесцева И. Ю., Зайков В. В. Руды Ишкининского кобальт-медноколчеданного месторождения (Южный Урал). Миасс: ИМин УрО РАН, 2003. 122 с.

Молошаг В. П., Грабежнев А. И., Викентьев И. В., Гуляева Т. Я. Фации рудообразования колчеданных месторождений и сульфидных руд медно-золото-порфировых месторождений Урала // Литосфера, 2004. № 2. С. 30–51.

Тулмин П., Бартон П. Б. Термодинамическое исследование пирита и пирротина // Термодинамика постмагматических процессов. М.: Мир, 1968. С. 182–229.

Dekov V. M., Savelli C. Hydrothermal activity in the SE Tyrrhenian Sea: an overview of 30 years of research // Marine Geology, 2004. Vol. 204. P. 161–185.

Koski R., Shanks W. C. III. et al. The composition of massive sulfide deposits from the sediment-covered floor of Escabana Trough, Gorda Ridge: Implications for depositional processes // Canadian Mineralogist, 1988. Vol. 26. № 3. P. 655–673.

Kretschmar U., Scott S. D. Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe–As–S and their application // Canadian Mineralogist, 1976. Vol. 14. № 3. P. 364–386.

Petersen S., Herzig P. M., Schwarz-Schampera U. et al. Hydrothermal precipitates associated with bimodal volcanism in the central Bransfield Strait, Antarctica // Mineralium Deposita, 2004. Vol. 39. №. P. 358–379.

Shikazono N. A comparison of temperatures estimated from the electrum – sphalerite – pyrite – argentite assemblage and filling temperatures of fluid inclusions from epithermal Au – Ag vein-type deposits in Japan // Economic Geology, 1985. Vol. 80. № 5. P. 1415–1424.

Von Damm K. L., Lilley M. D., Shanks W. C. III et al. Extraordinary phase separation and southern East Pacific Rise // Earth Planet. Sci. Lett., 2003. Vol. 206. № 3–4. P. 365–378.

А. И. Брусницын

Санкт-Петербургский государственный университет, г. С.-Петербург

brusspb@yandex.ru

Геологические модели формирования осадочных месторождений марганца

Стратиформные залежи марганцевых руд, приуроченные к вулканогенно-осадочным или лишенным вулканогенного материала «собственно» осадочным толщам, являются главными промышленными источниками марганца. Изучению условий их формирования посвящено огромное количество работ. Цель настоящей статьи дать краткий обзор существующих точек зрения.