

Часть 3. МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СОВРЕМЕННЫЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ ПОЛЯ

***В.В. Масленников¹, Г.А. Черкашев², А.В. Фирстова²,
Д.А. Артемьев¹, А.С. Целуйко¹, В.А. Котляров¹***

*¹ – Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии
и геоэкологии УрО РАН, Институт минералогии, г. Миасс
maslennikov@mineralogy.ru*

² – ВНИИОкеангеология, г. Санкт-Петербург

Поведение элементов-примесей в сульфидных микрофациях гидротермального поля Победа (17°08' с.ш., Срединно-Атлантический хребет)

В последние два десятилетия для определения концентраций микроэлементов в сульфидах современных колчеданообразующих систем активно используется масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой и лазерной абляцией (ЛА ИСП МС) [Butler, Nesbitt, 1999; Houghton et al., 2004; Bogdanov et al., 2008; Lein et al., 2010; Li et al., 2012; Melekestseva et al., 2014; 2017; Wohlgemuth-Ueberwasser et al., 2015; Keith et al., 2016; Wang et al., 2017; Dekov et al., 2018; Yuan et al., 2018; Meng et al., 2019]. Наиболее интересными представляются работы, в которых данные ЛА ИСП МС анализа привязаны к конкретным микрофациям гидротермальных труб черных курильщиков. Микрофация в данном случае понимается как часть генетически определенного минерального тела, которая имеет свои текстурно-структурные, минералогические и геохимические особенности, отражающие специфические условия минералообразования. Микрофации выделяются под микроскопом, а затем изучаются минералогические и геохимические особенности морфогенетических типов минеральных индивидов и их сростков.

Для реконструкции истории гидротермального минералообразования изучены микрофации гидротермального поля Победа, геологическая характеристика которого дана в работах [Amplieva et al., 2017; Габлина и др., 2018]. Гидротермальное поле Победа состоит из трех сульфидных залежей, одна из которых представляет собой активный черный курильщик. Рудные залежи залегают на породах габбро-перидотитового комплекса и базальтах в пределах западного склона рифтовой долины на глубинах 1950–3100 м. Рудные фации представлены, в основном, диффузерами и сульфидными брекчиями, а также сульфидоносными осадками и продуктами их субмаринного окисления.

Нами изучены последовательность минералообразования и типохимизм сульфидов различных минеральных микрофаций, среди которых выделены изокубанит-пиритовые, изокубанит-вюртцит-пиритовые, пиритовые и пирит-марказитовые.

Изокубанит-пиритовые микрофации представлены зернистыми агрегатами незональных субгедральных и эвгедральных кристаллов пирита. Атоловые сростки кристаллов пирита указывают на исчезновение менее устойчивых предшественников

– сульфидов железа. В интерстициях встречается изокубанит с решетчатыми структурами халькопирита, которые выявлены после травления в конц. HNO_3 в присутствии порошка CaF_2 . Высокие содержания Se (до 1500 г/т) в изокубаните свидетельствуют в пользу того, что эти руды формировались при высоких температурах, соответствующих температурам черных курильщиков. Пирит характеризуется самыми высокими содержаниями элементов высокотемпературной ассоциации (Co, Se, Bi) при низких содержаниях элементов низкотемпературной (Mn, Tl, Pb) и гидрогенной (Mo, V, U) ассоциаций.

Изокубанит-вюртцит-пиритовые разновидности гидротермальных корок состоят из агрегатов ангедральных и субгедральных кристаллов пирита, в которых лишь иногда угадывается две-три зоны, характеризующие реликтовую осцилляторную зональность. Субгедральные кристаллы пирротина замещены кристаллически-зернистым пиритом или халькопиритом. Нередко встречаются псевдоскелетные кристаллы пирита, в которых после выщелачивания пористого ядра сохранилась лишь внешняя зона. Судя по умеренным содержаниям Se (до 417 г/т) в изокубаните, эта разновидность корок изначально формировалась при менее высоких температурах, соответствующих, скорее всего, температурам формирования серых курильщиков. Об этом же свидетельствуют умеренные максимальные содержания Se и Co в субгедральном пирите. Процесс формирования корок завершился отложением микрозернистого пирита, характеризующегося на порядок более низкими содержаниями элементов высокотемпературной ассоциации (Se, Bi) (за исключением Co), а также повышенными содержаниями элементов низкотемпературной ассоциации (Tl, Mn, Pb). Однако невысокие содержания элементов гидрогенной ассоциации (U, Mo, V), такие же, как и в кристаллически-зернистом пирите, свидетельствуют о минимальном участии морской воды на всех стадиях минералообразования.

Пиритовые корки и их брекчии характеризуются разнообразными морфогенетическими типами пирита, среди которых выделяются губчатые, фрамбоидальные, ангедральные и субгедральные грубозональные, эвгедральные незональные и секториальные кристаллы, а также более редкие футляровидные кристаллически-зернистые псевдоморфозы по кристаллам пирротина. В целом, гидротермальные корки эволюционируют с нарастанием кристалличности пирита, хотя иногда могут быть и обратные взаимоотношения. Агрегаты тонкозернистого пирита обрастают кристаллами грубозонального пирита. Конечные продукты кристаллизации – секториальные и незональные кристаллы пирита. Особенность почти всех разновидностей пирита – низкие содержания Co (2–14 г/т) и Se (0–4.5 г/т), при высоких содержаниях Mn (4450 г/т). Фрамбоидальный пирит является главным концентратором Mn, Tl, Au, Mo и U. Следует отметить, что содержания большинства элементов, за исключением As, в пиритовых продуктах почти всегда выше, чем в исходных минералах, таких как грейгит и пирротин. Очевидно, что пиритовые корки и их брекчии – смесь генетически различных разновидностей пирита.

Пирит-марказитовые корки в некоторых случаях имеют ритмичное строение. Нижняя часть ритма сложена сажистыми или губчатыми псевдоморфозами пирита по кристаллам пирротина, окруженными ажурными инкрустациями друзовых марказит-пиритовых агрегатов. Тонкодисперсные псевдоморфозы пирита по кристаллам пирротина по сравнению с типичным пирротинном характеризуются более высокими содержаниями элементов низкотемпературной (Tl, Ag, Pb, As) и гидрогенной (Mo, U) ассоциаций при меньших содержаниях Cu. Верхняя часть каждого ритма сложена кристал-

лически-зернистыми агрегатами пирита и марказита с включениями почковидного и радиально-лучистого пирита или марказита. Стенки пор инкрустированы субгидральными кристаллами марказита и пирита или параморфозами пирита по марказиту с тонкой осцилляторной зональностью. Содержания всех изученных элементов-примесей крайне низкие во всех разновидностях пирит-марказитовых агрегатов. Исключение представляют секториальные кристаллы пирита, содержания Co в которых достигают 324 г/т. В отличие от субгидрального и эвгидрального пирита медно-колчеданных и медно-цинково-колчеданных корок, марказит характеризуется отношениями $Co/Ni < 1$, более характерными для пирротина, диагенетических конкреций и фрамбоидального пирита.

Результаты стадийного анализа показывают, что формирование каждой микрофазии начинается с тонкодисперсных сульфидов железа, среди которых установлены грейгит, пирротин, макинавит, фаза Fe_2S_3 и их смеси. Процесс завершается субгидральными грубозональными и незональными кристаллами пирита. Однако в высокотемпературных микрофазах первичные сульфиды железа не сохраняются.

В целом, изученные микрофазии образуют ряд, в котором уменьшается кристалличность пирита и количество высокотемпературных минералов, таких как изокубанит и Co-Se-содержащий эвгидральный пирит, и, соответственно, возрастает сохранность тонкодисперсных губчатых дисульфидов железа. Предполагается, что в этом же ряду снижаются температуры минералообразования, а также роль элементов высокотемпературной ассоциации (Cu, Se, Bi, Co, Ni) при относительном возрастании роли элементов низкотемпературной (Mn, Tl, Pb) и водородной (U, Mo, V) ассоциаций.

Литература

- Габлина И.Ф., Добрецова И.Г., Лайба А.А., Наркевский Е.В., Максимов Ф.Е., Кузнецов В.Ю. Особенности сульфидных руд гидротермального узла Победа ($17^{\circ}07' - 17^{\circ}08'$ с.ш. Срединно-Атлантического хребта) // Литология и полезные ископаемые. 2018. № 6. С. 475–500.
- Amplieva E.E., Bortnikov N.S., Kovalchuk E.V. The Pobeda modern submarine hydrothermal cluster ($17^{\circ}08' N$, Mid-Atlantic Ridge): mineralogy and chemical composition // Mineral Resources to Discover. 14th SGA Biennial Meeting. Glasgow, 2017. Vol. 2. P. 649–652.
- Bogdanov Y.A., Lein A.Y., Maslennikov V.V., Li S., Ulyanov A.A. Mineralogical-geochemical features of sulfide ores from the Broken Spur hydrothermal field // Oceanology. 2008. Vol. 48. P. 679–700.
- Butler I.B., Nesbitt R.W. Trace element distributions in the chalcopyrite wall of a black smoker chimney: insights from laser ablation inductively-coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) // Earth and Planetary Science Letters. 1999. Vol. 167. P. 335–345.
- Dekov V.W., Garbe-Schonberg D., Kamenov G.D., Gueguen B., Bayon G., Bindi L., Asael D., Fouquet Y. Redox changes in a seafloor hydrothermal system recorded in hematite-chalcopyrite chimneys // Chemical Geology. 2018. Vol. 483. P. 351–371.
- Houghton J.L., Shanks III W.C., Seyfried W.E. Jr. Massive sulfide deposition and trace element remobilization in the Middle Valley sediment-hosted hydrothermal system, northern Juan de Fuca Ridge // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2004. Vol. 68. P. 2863–2873.
- Keith M., Hackel F., Haase K.M., Schwarz-Schampera U., Klemm R. Trace element systematics of pyrite from submarine hydrothermal vents // Ore Geology Reviews. 2016. Vol. 72. P. 728–745.
- Lein A.Y., Bogdanov Y.A., Maslennikov V.V., Li S., Ulyanova N.V., Maslennikova S.P., Ulyanov A.A. Sulfide minerals in the Menez Gwen nonmetallic hydrothermal field (Mid-Atlantic Ridge) // Lithology and Mineral Resources. 2010. Vol. 45. P. 305–323.
- Li X., Maslennikov V.V., Lein A.Y., Ulyanov A.A. Associations of trace elements in the sulfides of black smokers from the Broken Spur, Menez Gwen, and Snake Pit hydrothermal fields // Moscow University Geology Bulletin. 2012. Vol. 67. P. 8–17.

Melekestseva I.Yu., Maslennikov V.V., Tret'yakov G.A., Nimis P., Beltenev V.E., Rozhdestvenskaya I.I., Maslennikova S.P., Belogub E.V., Danyushevsky L., Large R., Yuminov A.M., Sadykov S.A. Gold- and silver-rich massive sulfides from the Semenov-2 hydrothermal field, 13°31.13' N, Mid-Atlantic Ridge: A case of magmatic contribution? // *Economic Geology*. 2017. Vol. 112. № 4. P. 741–773.

Melekestseva I.Yu., Tret'yakov G.A., Nimis P., Yuminov A.M., Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Kotlyarov V.A., Beltenev V.E., Danyushevsky L.V., Large R. Barite-rich massive sulfides from the Semenov-1 hydrothermal field (13°30.87' N, Mid-Atlantic Ridge): Evidence for phase separation and magmatic input // *Marine Geology*. 2014. Vol. 349. P. 37–54.

Meng X., Li X., Lei J., Li Z. Trace element and sulfur isotope composition for pyrite across the mineralization zone of a sulfide chimney from the East Pacific Rise (1–2° S) // *Ore Geology Reviews*. 2019. Vol. 116. P. 1–15.

Wang Y., Han X., Petersen S., Frische M., Qiu Z., Li H., Wu Z., Cui R. Mineralogy and trace element geochemistry of sulfide minerals from the Wocan Hydrothermal Field on the slow-spreading Carlsberg Ridge, Indian Ocean // *Ore Geology Reviews*. 2017. Vol. 84. P. 1–19.

Wohlgemuth-Ueberwasser C.C., Viljonen F., Petersen S., Vorster C. Distribution and solubility limits of trace elements in hydrothermal black smoker sulfides: an in-situ LA-ICP-MS study // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2015. Vol. 159. P. 16–41.

Yuan B., Hongjun Y., Yang Y., Zhao Y., Yang J., Xu Y., Lin Z., Tang X. Zone refinement related to the mineralization process as evidenced by mineralogy and element geochemistry in a chimney fragment from the Southwest Indian Ridge at 49.6° E // *Chemical Geology*. 2018. Vol. 482. P. 46–60.

**И.Ю. Мелекесцева¹, В.В. Масленников¹, Н.Р. Аюпова¹, Е.В. Белогуб¹,
С.П. Масленникова¹, В.Е. Бельтнев²**

¹ – Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии
и геоэкологии УрО РАН, Институт минералогии, г. Миасс
telekestseva-irina@yandex.ru

² – ВНИИОкеангеология, г. Санкт-Петербург

Перераспределение элементов-примесей при окислении сфалерита Ириновского гидротермального поля (13°20' с.ш., Срединно-Атлантический хребет)

Сульфидные залежи на морском дне постоянно окисляются и замещаются оксигидроксидами Fe. В настоящей работе оценено перераспределение элементов-примесей при окислении сфалерита Ириновского гидротермального сульфидного поля, Срединно-Атлантический хребет (САХ).

Неактивное Ириновское гидротермальное поле (13°20' с.ш., 44°56' в.д., САХ) открыто в 34-м рейсе НИС «Профессор Логачев» в 2011 г. [Бельтнев и др., 2012]. Поле размером 350×380 м находится на глубине 2700–2850 м в привершинной части юго-восточного склона подводной горы 13°20' с.ш. Поле состоит из двух рудных тел высотой 3–5 м. В районе поля были драгированы гидротермально-измененные основные и ультраосновные породы. Рудные тела представлены сульфидными постройками с трубами курильщиков, окруженными сульфидными развалами. Рудный материал представлен пирит-сфалерит-халькопиритовыми, халькопирит-пирит-сфалеритовыми, халькопиритовыми и сфалеритовыми трубами курильщиков, массивными марказит-