

Часть 2. МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ СУЛЬФИДНЫЕ ПОЛЯ

*В. В. Масленников, Н. Р. Аюпова, С. П. Масленникова,
И. Ю. Мелекесцева, А. С. Целуйко, Н. С. Архиреева
Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс
mas@mineralogy.ru*

Сульфидные конкреции колчеданных месторождений: условия нахождения, типохимизм и факторы формирования

Сульфидные конкреции встречаются в рудных турбидитах, вулканогенно-осадочных и осадочных породах многих колчеданных месторождений Урала, Рудного Алтая, Понтид, Иберийского пояса и других колчеданосных регионов. Несмотря на то, что эти конкреции могут быть индикаторами колчеданного оруденения при прогнозно-поисковых работах, они до сих пор остаются малоизученными. В литературе отсутствуют сведения об их условиях нахождения, причинах формирования и типохимизме. Эти данные получены нами при изучении сульфидных конкреций колчеданных месторождений Урала (Дергамышское, Ишкининское, Сибайское, Октябрьское, Сафьяновское, Учалинское, Блявинское, Талганское), Рудного Алтая (Артемьевское), Понтид (Лаханос, Кюре) и Иберийского пояса (Тарсис). Условия нахождения и облик сульфидных конкреций разнообразны. Донные конкреции колломорфного и фрамбоидального пирита обнаружены в кластогенных рудах Ново-Сибайской залежи [Жабин, 1979]. Аналогичные конкреции колломорфного пирита встречены в кремнистых пелитолитах Октябрьского месторождения [Масленников, 1999]. В данной публикации речь пойдет о придонных диагенетических конкрециях.

Сульфидно-серпентинитовая ассоциация. Конкреции, встречающиеся в рудоносных серпентинитовых песчаниках, известны на Ишкининском и Дергамышском месторождениях. В большинстве случаев, они представлены мелкозернистым пиритом с реликтами серпентина и хромитов. Эти конкреции иногда окружены радиальными агрегатами крупнозернистого пирита и замещаются пирротином с появлением кобальт-никелевой сульфоарсенидной минерализации. На этих месторождениях пиритовые конкреции широко представлены в сульфидных турбидитах, обогащенных обломками серпентинитов. В строении конкреций выделяются три разновидности пирита-4: 4а, 4и и 4с. Пирит-4а – ангедральный конкреционный – находится в ядре пиритовых конкреций. Эта разновидность пирита, вероятно, сформировалась на месте пиритового обломка в результате интенсивной раннедиагенетической перекристаллизации. Очень часто этот пирит замещен субгедральным пирротином. Содержания элементов в нем еще ниже, чем в ранних разновидностях пирита-1–3. Пирит-4и – инкрустационный с пористой структурой – обрастает ядра конкреций, сложенных пиритом-4а. Эта разновидность появляется только в рудокластитах, обо-

гащенных обломками серпентинита. Пирит-4и обростал конкреции ангедрального пирита, гораздо более интенсивно замещенного пирротинном. Очень часто встречаются радиально-перистые агрегаты. По сравнению с обломочной разновидностью в конкреционном пирите гораздо ниже содержания большинства элементов примесей. Пирит-4с – субгедральный, тонкозональный непористый инкрустационный – обростает кристаллы пирита-4. Вероятно, он образовывался несколько позже пирротинизации, хотя пойкилиты пирротина в нем не обнаружены. Содержания элементов-примесей в нем такие же низкие, как и в пирите-4, за исключением As. Все разновидности пирита характеризуются низкими содержаниями Mn (1–2 г/т) и других элементов-примесей, за исключением Ni (348–951 г/т) [Масленников и др., 2014].

Сульфидно-черносланцевая ассоциация. Сульфидные конкреции в углеродистых алевропелитолитах установлены на месторождениях Кюре (Понтиды), Тарсис (Иберийский пояс) и Кызыл-Таштыг (Тува). Наиболее представительными оказались сульфидные конкреции Сафьяновского и Артемьевского месторождений.

В дистальных сульфидных турбидитах, черных сланцах и вулканомиктовых песчаниках Сафьяновского месторождения широко распространены конкреции, сложенные несколькими разновидностями пирита при незначительных количествах халькопирита, кварца, сфалерита, галенита, блеклых руд и энаргита. Наиболее ранние конкреции фрамбоидального и тонкозернистого пирита обросли радиальными крупнозернистыми пиритовыми агрегатами, содержащими реликтовые микровключения фрамбоидов. Иногда встречаются крупные (до 2 см) конкреции крупнозернистого пирита с полыми кварцевыми ядрами, содержащими реликты фрамбоидального пирита. Содержания элементов-примесей в конкрециях варьируют в зависимости от разновидности пирита.

В конкрециях фрамбоидального пирита, входящих в состав рудных турбидитов, отмечаются широкие вариации содержания большинства элементов-примесей (г/т): Ti (3–143), V (3–138), Mn (21–1471), Co (0.16–150), Ni (12–206), Se (1.4–659), Mo (22–344), Ag (12–375), Sn (0.3–15), Sb (36–1441), Te (0.1–12), Ba (0.7–3416), W (0.08–4), Au (0.7–23), Pb (343–17106), Bi (3–965) и U (0.05–8.8). Содержания большинства этих элементов-примесей, за исключением Ni и Ag, снижаются в конкрециях фрамбоидального пирита, заключенных в вулканомиктовых песчаниках. Конкреции тонкозернистого пирита характеризуются аномальными концентрациями Ti (5–17 г/т) и V (7–153 г/т) и повышенными содержаниями (г/т) Au (2–14), Ag (127–508), Pb (0.1–2 мас. %), Bi (15–159), U (0.1–0.6), Co (17–426), Ni (34–23), Mo (1.7–7) при умеренных содержаниях Mn (97–103). В субгедральных кристаллах пирита этих конкреций содержания элементов-примесей гораздо ниже.

В сульфидных турбидитах конкреции, сложенные радиальным, ангедральным и субгедральным крупнозернистым пиритом, содержат в 5–10 раз меньше (г/т) Ti (1.4–3.1), V (0.4–3.1), Co (0.3–81), Ni (0.1–81), Mo (0.7–16), Au (0.4–0.9), Ag (2–117), Te (0.03–0.4), Pb (31–380), U (0.001–0.013) и Ba (0.07–0.79) по сравнению с конкрециями фрамбоидального и тонкозернистого пирита. Содержания As (0.1–0.4 мас. %), Se (2–51 г/т), Tl (4–106 г/т), W (0.1–1.1 г/т) во всех разновидностях конкреций близки. Концентрации элементов-примесей в конкрециях зернистого пирита (как и во фрамбоидальном) зависят от состава вмещающей цементирующей массы. В осадочных породах, по сравнению с конкрециями из сульфидных турбидитов, отношение $Co/Ni < 1$. Пиритовые конкреции, находящиеся в вулканомиктовых песчаниках,

обеднены (г/т) Mn (1–6), Co (1.5–14), Se (2–10) и Au (0.4–0.8) по сравнению с аналогичными пиритовыми конкрециями, встречающимися в сульфидных песчаниках. В этих конкрециях отмечаются повышенные содержания Ni (23–128 г/т), Ag (166–264 г/т) и аномальные Ti (33–148 г/т). Напротив, в аналогичных зернистых конкрециях пирита, присутствующих в черных сланцах, появляются аномальные концентрации (г/т) Au (2–132), Ag (40–5675), Mo (22–389), Sb (242–1796), Mn (73–4831) и Ni (40–1439). Максимальные содержания отмечаются в реликтовых тонкозернистых участках конкреционного пирита. Безусловно, органические илы обеспечивали благоприятные условия для концентрации этих элементов-примесей.

На Артемьевском месторождении конкреции фрамбоидального пирита встречаются в сульфидных песчаниках. В углеродистых пелитолитах обнаружены псевдоморфозы пирротина по конкрециям фрамбоидального пирита и марказита с образованием аутигенного арсенопирита и стибнидов никеля. Субгедральный крупнозернистый пирит, сопровождающийся арсенопиритовой и кобальтиновой минерализацией, появился позже пирротина. Также как и на Сафьяновском месторождении, фрамбоидальный пирит содержит значительные количества элементов-примесей (г/т): Mn (179–503), Co (81–1041), Ni (37–182), Ti (143–1528), Ag (533–5255), Au (66–199) и Pb (0.7–7 мас. %). Содержания этих элементов-примесей на один-два порядка ниже в среднезернистых растрескавшихся марказитовых конкрециях, содержащих реликтовые структуры фрамбоидального пирита. Зернистый конкреционный пирит, в отличие от сходных гидротермальных разновидностей, характеризуется более высокими содержаниями Mn, Ti, U при низких содержаниях Sn, Bi и Se. Исключение по содержаниям Se составляют конкреции, связанные с углеродистыми пелитовыми и псаммитовыми отложениями. В целом, содержания элементов-примесей в конкрециях пирита значительно варьируют в зависимости от состава вмещающей цементирующей массы. Конкреции, присутствующие в сульфидно-баритовых песчаниках, отличаются всегда более высокими содержаниями рудных элементов, включая Au, Ag, Ba, Ti, Pb, Mo, V. В конкрециях из вулканогенно-осадочных пород всегда больше Ti, V, Co, Ni. Низкое отношение $Co/Ni < 1$ – характерный генетический признак зернистого конкреционного пирита, отличающий его от сходных гидротермальных разновидностей и раннедиагенетического фрамбоидального пирита.

Предполагается, что органические илы как на Сафьяновском, так и на Артемьевском месторождениях, обеспечивали благоприятные условия для концентрации большинства элементов-примесей в диагенетическом пирите, а растворившиеся сульфидные рудокластиты служили дополнительным источником вещества для конкреций. Процессы растворения сульфидов или их пирротинизации приводили к ремобилизации химических элементов, входящих в состав конкреций. Эти процессы обеспечили последующее метаморфогенно-гидротермальное образование самородного золота, арсенопирита и стибнидов никеля на Артемьевском месторождении. Подобный процесс описан ранее как основной механизм формирования золоторудных месторождений в черных сланцах [Large et al., 2011].

Сульфидно-яшмовая и сульфидно-известково-силицитовая ассоциации. Своеобразными условиями локализации отличаются сульфидные конкреции Талганского месторождения, содержащиеся в околорудных карбонатно-кремнистых и яшмовых (госсанитах) отложениях. Конкреции образованы тонкодисперсным растрескавшимся пиритом, частично замещенным халькопиритом, сфалеритом и кварцем.

Вокруг конкреций всегда присутствует кайма зернистого пирита. В конкрециях имеются трещины синерезиса, заполненные кварцем или сфалеритом. Наиболее замещенной частью оказывается ядро конкреций. Содержания большинства элементов-примесей в тонкозернистых пиритовых ядрах конкреций выше, чем в кристаллически-зернистых каймах пирита. Элементы-примеси снижаются по мере нарастания кристалличности пирита. Свообразными, обнаруженными пока только на Талганском месторождении, являются гематитовые конкреции с ядром, сложенным вкрапленными халькопиритом и пиритом [Аюпова и др., 2014].

На Юбилейном месторождении эвгедральный и субгедральный диагенетический пирит-4, в отличие от гидротермальных разновидностей пирита, встречается в хлоритолитах и госсанитах. Обычно он представлен порфиroidными эвгедральными монокристаллами тонкозонального пирита или конкрециями. В конкрециях выделяются мелкозернистое ядро и крупнозернистая кайма субгедрального пирита-4. Он характеризуется многочисленными включениями нерудных минералов, что обеспечивает высокие вариации содержаний Ti (0.25–236 г/т), V (до 11 г/т) и других литогенных элементов. В отличие от ранних разновидностей пирита-1–3, пирит-4 характеризуется высокими содержаниями как Co, так и Ni при соотношении Co/Ni < 1, что характерно для позднедиагенетических разновидностей [Масленников и др., 2014].

Находки конкреций и диагенетических кристаллов пирита на Яман-Касинском месторождении единичны. Они представляют собой хорошо оформленные кубические кристаллы без признаков растворения. Анализ одного кристалла пирита-4 показал аномально высокое содержание Ni (272 г/т) при более низких содержаниях Mn (31 г/т), Se (0.1 г/т) и Co (0.9 г/т) по сравнению с гидротермальными разновидностями пирита. Обогащение Ni связано с заимствованием этого элемента из вулканокластических осадков. В конкреционном пирите единичные определения Ni и Co составляют 98 и 90 г/т, соответственно, при содержаниях Se 1 г/т [Сафина, Масленников, 2009].

На Валенторском месторождении эвгедральный и конкреционный пирит-4 встречаются исключительно в борнитсодержащих сульфидных диагенитах. Источником железа для диагенетического пирита, вероятно, являлась реакция окисления халькопирита и превращения его в борнит. Эта аутигенная разновидность пирита, представленная метакристаллами и конкрециями, является наиболее поздней. Отличительные химические особенности пирита-4 – повышенные содержания Co (14–244 г/т) и Se (273–1123 г/т) при пониженных концентрациях всех остальных элементов, включая Mn, Ni и Bi, характерных для гидротермальных разновидностей пирита, более распространенных на месторождении. Содержания Te примерно такие же, как и в предыдущих разновидностях пирита. Однако, отношение Co/Ni варьирует от 10 до 100 [Масленников и др., 2014].

На Александринском месторождении особая разновидность эвгедрального диагенетического пирита-4 представлена в гематитсодержащих пелитолитах – госсанитах, образованных в результате гальмиролиза сульфидных частичек и пелитоморфного гиалокластического материала [Масленников, 1999]. Вероятно, порфиroidные выделения пирита формировались в процессе постседиментационных преобразований осадка, скорее всего, в стадию позднего диагенеза. В отличие от эвгедрального и субгедрального пирита гидротермальных руд, такой пирит заимствует элементы-примеси из гиалокластогенного материала (г/т): Ti (13–211), V (0.2–85),

Co (2–167), W (0.2–54) и U (2–12). От исходного рудокластического материала в пирите наследуются такие элементы, как (г/т) Au (0.2–24), Ag (3–385), Cu (10–1220), Te (7–472), Pb (до 2000) и Bi (4–359) [Масленников и др., 2014].

Оригинальные марказит-пиритовые конкреции обнаружены в гематит-кремнистых госсанитах на месторождении Лаханос (Понтиды). Содержания Au, Ag, Te, Bi в них достигают 23, 175, 1692 и 1062 г/т, соответственно.

Появление конкреций в яшмах мы связываем с окислением незначительной примеси органического вещества и силикатного Fe(II), которые могли быть донорами электронов. Следы исходного органического вещества отражаются в присутствии карбонатного материала, характеризующегося легким изотопным составом углерода [Масленников, 1999]. Еще один источник восстановительных сред диагенеза – мелкие рудокласты, окислявшиеся на поверхности сульфидных турбидитов. На некоторой глубине в слое могли возникать восстановительные условия, благоприятные для формирования сульфидных конкреций.

Таким образом, пиритовые конкреции установлены в различных породах: серпентинитовых, реже вулканокластических песчаниках, углеродистых алевропелитах, известковистых силицитах и даже в яшмах. Доноры электронов, необходимые для формирования пиритовых конкреций, различны. Главные из них – окисление силикатного железа, окисление сульфидов и органического вещества. В охарактеризованных сульфидных конкрециях пирита содержания элементов-примесей убывают в ряду: фрамбоидальный → тонкозернистый → радиальный мелко- и крупнозернистый → субгедральный → эвгедральный. Для разработки новых критериев прогнозирования дальнейшие исследования должны быть направлены на сравнение конкреций колчеданных и золоторудных месторождений с конкрециями фоновых отложений.

Авторы благодарят В. В. Зайкова, Р. Ларжа и Л. В. Данюшевского за содействие в выполнении работ. Исследования проводились при поддержке проекта РФФИ (№ 17-05-00854).

Литература

Аюпова Н. Р., Масленников В. В., Масленникова С. П. Диагенетическая сульфидная минерализация в окисдно-железистых отложениях колчеданных месторождений Урала // Металлогения древних и современных океанов–2014. Двадцать лет на передовых рубежах геологии месторождений полезных ископаемых. Миасс: ИМин УрО РАН, 2014. С. 47–51.

Жабин А. Г. Онтогенез минералов. Агрегаты. М.: Наука, 1979. 261 с.

Масленников В. В. Седиментогенез, гальмиролиз и экогенез колчеданоносных палеогидротермальных полей (на примере Южного Урала). Миасс: ИМин УрО РАН, 1999. 348 с.

Масленников В. В., Аюпова Н. Р., Масленникова С. П., Третьяков Г. А., Белогуб Е. В., Сафина Н. П., Мелекесцева И. Ю., 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.

Сафина Н. П., Масленников В. В. Рудокластиты колчеданных месторождений Яман-Касы и Сафьяновское (Урал). Миасс: ИМин УрО РАН, 2009. 260 с.

Large R. R., Bull S. W., Maslennikov V. V. A carbonaceous sedimentary source-rock model for Carlin-type and orogenic gold deposits // Economic Geology. 2011. Vol. 106. С. 331–358.