МИКРОВКЛЮЧЕНИЯ И ПРИМЕСИ В СУЛЬФИДНЫХ МИНЕРАЛАХ ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НАТАЛКИНСКОЕ (СЕВЕРО-ВОСТОК РОССИИ) ПО ДАННЫМ РСМА

Р.Г. Кравцова, А.С. Макшаков, О.Ю. Белозерова, В.В. Татаринов

Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия, artem_m@mail.ru

Изучение состава микровключений и примесей в рудных минералах месторождений имеет большое значение для понимания последовательности процессов и условий формирования рудной минерализации. На большинстве месторождений Au основными рудными минералами являются сульфиды. На золоторудном месторождении Наталкинское (Северо-Восток России) они представлены арсенопиритом и пиритом (до 90-95%). Значительно реже встречаются галенит, сфалерит и халькопирит. Основная часть ранее полученных данных по составу микровключений и примесей в этих сульфидах обобщена в монографии коллектива авторов, возглавляемых В.И. Гончаровым [1], в которой диагностика включений и примесей в сульфидах базировалась на данных оптической микроскопии, химическом и спектральном анализе. Позднее нами при детальном изучении сульфидов были использованы такие методы, как РСМА, СЭМ и ЛА-ИСП-МС. Полученные данные по распределению, уровням концентрирования и формам нахождения Au и ЭПГ в кристаллах арсенопирита и пирита даны в работах [2, 5]. В настоящее время круг изученных сульфидных минералов был расширен. Увеличилось количество определяемых элементов. Изучение проводилось с помощью метода РСМА по методикам [3, 4]. Сульфиды монтировались в брикетированные аншлифы и изучались на микроанализаторе JXA-8200 SuperProbe (JEOL Ltd., Япония), оснащенный волновыми и ЭДС-спектрометрами. Основной состав микровключений определялся на ЭДС-спектрометрах, примесный – на волновых.

На месторождении можно выделить четыре типа руд. Бедными по содержанию Au являются вкрапленные и прожилково-вкрапленные руды. Они образовались на начальных стадиях метаморфогенного и магматогенно-гидротермального этапов и относятся главным образом к ранней кварц-пирит-арсенопиритовой ассоциации. К наиболее богатым относятся прожилково-жильные и жильные руды кварц-сульфидно-сульфосольной минеральной ассоциации, которые образовались на продуктивных стадиях магматогенно-гидротермального этапа [1].

Сульфиды, отобранные из вкрапленных и прожилково-вкрапленных руд, представлены пиритом, реже арсенопиритом. Микровключения в этих сульфидах встречаются редко. В их составе преобладают нерудные минералы. В арсенопирите это зерна и агрегаты кварца, плагиоклаза (альбит), карбоната (анкерит), в пирите – плагиоклазов. Из других минералов в обоих сульфидах в единичных случаях отмечались тонкодисперсные включения (Ce, La, Nd)-монацита, в пирите – апатита. Включения рудных минералов найдены только в арсенопирите. Представлены они оксидами Ti и тонкодисперсными включениями золота пробностью 708–792 ‰ (в среднем 748 ‰). Золото развивается в кавернах и трещинах арсенопирита (рис. 1). Из примесей в арсенопиритах из прожилково-вкрапленных руд в единичных случаях отмечено только Au (0.12 мас. %), в пиритах из вкрапленных руд – As (0.62 мас. %).

Рис. 1. Самородное золото (Au), выполняющее каверны и трещины в арсенопирите (Apy). Прожилково-вкрапленные руды Наталкинского месторождения. Здесь и на рис. 2 и 3 изображения даны в обратно-рассеянных электронах

В прожилково-жильных и жильных рудах, наряду с арсенопиритом и пиритом, на долю которых приходится до 99% от всех рудных минералов, появляются и другие сульфиды. Главным образом они представлены галенитом, сфалеритом и халькопиритом. Крупные выделения этих минералов (до первых миллиметров) в рудах крайне редки. В основном они встречаются в виде включений в арсенопирите и пирите, выполняют трещины внутри этих сульфидов либо находятся в сростании с ними, размер их колеблется от первых микрон до десятых долей миллиметра. Все сульфиды прожилково-жильного и жильного типов руд характеризуются большим количеством микронных и субмикронных включений нерудных и собственно рудных минералов и разнообразной примесной составляющей. Наибольшее количество включений и элементов-примесей установлено в арсенопирите и пирите.

В арсенопирите среди нерудных включений присутствуют кварц, КПШ (анортотлаз, адуляр), плагиоклаз (альбит), карбонаты (анкерит, кальцит, брейнерит), серицит, хлорит, F-апатит, углеродистое вещество (микрографит). Отмечен поздний каолинит, который развивается по трещинам арсенопирита. Рудные включения представлены преимущественно пиритом, самородным золотом пробностью 639–804 ‰ (в среднем 769 ‰), галенитом, сфалеритом, халькопиритом и пирротинном (рис. 2а,б). Золото в арсенопирите достаточно часто встречается в виде крупных выделений (рис. 2в). Нередко наблюдаются оксиды Ti – рутил, ильменит, лейкоксен. В единичных случаях отмечались тонкодисперсные включения (Ce, La, Nd)-монацита, бурноита и шеелита. Размер большинства включений рудных минералов колеблется от нескольких микрон до 0.5 мм. Они приурочены к микродефектам (каверны, трещины) арсенопирита. Из примесей наиболее часто встречается (в мас. %) Ni (0.10–0.57), реже W (0.11–0.26), Cu (0.10–0.94), еще реже Co (0.10–0.25), Ti (0.30–0.74), крайне редко Pt (0.15–0.29). В единичных случаях установлены (в мас. %) P (0.64), Ca (0.34), Au (0.16), Ce (0.15) и La (0.11).

Рис. 2. Включения в арсенопирите (Apy): а – зерно арсенопирита в сростании с пиритом (Py) и включениями халькопирита (Chp), сфалерита (Sp), галенита (Gn), пирита, пирротина (Pyr), альбита (Ab) и углеродистого вещества (микрографита) (Gr); б – агрегат арсенопирита с включениями халькопирита, самородного золота (Au), галенита, сфалерита с эмульсионной вкрапленностью халькопирита, кварца (Qtz) и альбита; в – тонкодисперсные, мелкие и крупные выделения самородного золота в арсенопирите. Здесь и на рис. 3 – прожилково-жильные и жильные руды Наталкинского месторождения

В пирите нерудные включения представлены серицитом, плагиоклазом (альбит), КПШ (анортотлаз), карбонатами (анкерит, сидерит), F-апатитом. В единичных случаях отмечены включения каолинита и углеродистого вещества (микрографит) с обильной тонкодисперсной вкрапленностью сфалерита. Среди рудных минералов чаще всего отмечались включения арсенопирита, халькопирита, пирротина, сфалерита, галенита, тетраэдрита, фрейбергита, оксидов Ti (рутил, ильменит) и самородного золота пробностью 701–773 ‰ (в среднем 733 ‰) (рис. 3а–в). В нескольких зернах пирита были обнаружены мелкие (~10–12 мкм) включения сфена и кобальтина, содержащего примеси (в мас. %) Fe (5.23), Ni (1.84) и Mo (0.25), а также тонкодисперсные (~3–4 мкм) включения (Ce, La, Nd)-монацита. В одном случае в пирите обнаружены фазы размером около 10–20 мкм, которые по составу близки к рутилу, но при этом постоянно содержат W (4.96–5.58 мас. %). Кроме того, найдено включение халькопирита размером <10 мкм в ассоциации с акантитом. Все найденные включения развиваются в кавернах и трещинах пирита. Размер золота в пирите крайне редко превышает 10 мкм (см. рис. 3б). Почти постоянно отмечается примесь As (0.10–3.51 мас. %), реже Cu (0.10–0.94 мас. %). Из других примесей установлены Ni (0.10–0.48 мас. %) и, на пределе обнаружения, Co (0.10 мас. %). В единичных случаях отмечены (в мас. %) W (0.15–0.16), Pt (0.15–0.17), Zn (0.13), La (0.16) и Ce (0.11). As распределяется внутри зерен зонально. В ядрах зерен содержания As находятся ниже предела

обнаружения РСМА, присутствует Ni (0.11–0.48 мас. %). К краям зерен концентрации As резко возрастают (до 0.14–2.95 мас. %, в среднем 2.33 мас. %), а примесь Ni не обнаруживается. Прослеживается закономерная приуроченность микровключений рудных минералов к участкам зерен пирита, обогащенным примесью As.

Рис. 3. Включения в пирите (Py): а – корродированное зерно пирита с включениями арсенопирита (Apy), сфалерита (Sp), халькопирита (Chp), пирротина (Pyr), рутила (Rt), КПШ (Fsp), анкерита (Ank) и сидерита (Sd); б – пирит с включениями тонкодисперсного золота (Au), галенита (Gn), сфалерита, халькопирита и сидерита; в – пирит с включением халькопирита в ассоциации со сфалеритом и фрейбергитом (Frb)

В галените включений других минералов обнаружено не было. Чаще всего он находится в сростании с халькопиритом, пиритом, сфалеритом и золотом. Наиболее часто встречающейся примесью в галените является (в мас. %) Fe (0.69–4.78), реже Cu (0.15–0.45), еще реже Ag (0.10–0.14). В единичных случаях отмечены Ce (0.16), La (0.14), Se (0.12) и Te (0.10).

В сфалерите основным включением является халькопирит, образующий тонкодисперсную эмульсионную вкрапленность, реже галенит. Отмечены случаи включений самородного золота пробностью 720–756 ‰ и размером менее 5 мкм в ассоциации с халькопиритом внутри сфалерита. Основными минералами, с которыми сростается сфалерит, являются халькопирит, галенит, пирит, редко золото. Наиболее часто встречающейся примесью в сфалерите является (в мас. %) Fe (1.77–10.44), реже Cu (0.18–1.88). В единичных случаях отмечаются As (0.11–3.23), Au (0.13–0.24) и W (0.14–0.18).

Халькопирит крайне редко содержит в себе включения других минералов. В основном это тонкодисперсные выделения сфалерита и фрейбергита. Чаще всего халькопирит находится в сростании с пирротинном, арсенопиритом, пиритом, сфалеритом, галенитом, золотом и фрейбергитом. Примеси содержит редко. Чаще всего это As (0.10–1.44 мас. %), в единичных случаях (в мас. %) – W (0.10–0.26), Ti (0.12), Ce (0.11–0.19), Zn (0.10), Co (0.10) и Au (0.12).

Таким образом, изучение сульфидных минералов Наталкинского золоторудного месторождения с помощью РСМА показало, что состав микровключений и примесей на разных этапах формирования рудной минерализации различен. Сульфиды из вкрапленных и прожилково-вкрапленных руд метаморфогенного этапа минералообразования представлены пиритом, реже арсенопиритом, которые содержат включения, в основном, нерудных минералов и практически не имеют примесей. Для сульфидов (арсенопирит, пирит, галенит, сфалерит, халькопирит) прожилково-жилых и жилых руд продуктивных стадий гидротермального этапа минерализации характерно большое количество включений рудных минералов и примесей. Выявленный качественный и количественный состав микровключений и примесей в сульфидных минералах месторождения тесно связан с последовательностью и условиями формирования рудной минерализации и может служить эффективным критерием оценки ее продуктивности.

Исследование проведено в рамках выполнения государственного задания по Проекту № 0284-2021-0002 и при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-05-00142) с использованием научного оборудования ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН (г. Иркутск).

Литература

1. Гончаров В.И., Ворошин С.В., Сидоров В.А. Наталкинское золоторудное месторождение. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2002. 250 с.
2. Кравцова Р.Г., Таусон В.Л., Никитенко Е.М. Формы нахождения золота, платины и палладия в арсенопиритах золоторудного месторождения Наталкинское (Северо-Восток России) // Геохимия. 2015. № 11. С. 991-999.

3. Павлова Л.А., Белозерова О.Ю., Парадина Л.Ф., Суворова Л.Ф. Рентгеноспектральный электронно-зондовый микроанализ природных объектов. Новосибирск: Наука. 2000. 224 с.
4. Finkelshtein A.L., Tatarinov V.V., Finkelstein E.A., Pavlova L.A., Kravtsova R.G. About the assessment of gold concentrations in tiny inclusions within sulfide mineral matrix: An electron microprobe study // X-Ray Spectrometry. 2018. Vol. 47. P. 423-431.
5. Kravtsova R.G., Tauson V.L., Makshakov A.S., Bryansky N.V., Smagunov N.V. Platinum group elements in arsenopyrites and pyrites of the Natalkinskoe gold deposit (Northeastern Russia) // Minerals. 2020. Vol. 10. N 4. Art. 318.