

## Часть 6. АКТУАЛЬНЫЕ ГЕОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

*Е. В. Белозуб<sup>1</sup>, М. В. Лукашова<sup>2</sup>, И. А. Блинов<sup>1</sup>,  
К. А. Новоселов<sup>1</sup>, П. В. Хворов<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup> – Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс  
bel@mineralogy.ru*

*<sup>2</sup> – Представительство фирмы TESCAN, г. Санкт-Петербург*

### **Применение автоматизированного минералогического анализа на базе электронной микроскопии и традиционного комплекса оптико-микроскопического и рентгеноструктурного метода для оценки состава золото-сульфидных руд**

Золото-сульфидные руды зачастую плохо обогащаются даже при высоких содержаниях золота. Это связано с тем, что золото в них может образовывать как легко диагностируемые свободные зерна, так и тонкие включения и сростки с сульфидами, а также находиться в химически связанном с сульфидами состоянии. Определение формы нахождения и локальной ассоциации золота является важным шагом для разработки эффективных схем обогащения руд, для чего необходимо совершенствование количественного минералогического анализа. Целью работы стало сопоставление возможностей традиционного комплекса оптико-микроскопического и рентгеноструктурного минералогического анализов и современного метода «автоматизированной минералогии», основанного на анализе изображения в отраженных электронах, применительно к упорным золото-сульфидным тонкозернистым рудам.

Оптико-микроскопические исследования (AxioScore A.1 CZ), оценка состава минералов при помощи электронного микроскопа с энергодисперсионным спектрометром (VEGA 3 TESCAN) и количественная оценка минералов методом полнопрофильного рентгеноструктурного анализа (дифрактометр Shimadzu XRD-6000, программный пакет Siroquant V.4, предел обнаружения кристаллических фаз ~ 0.3–0.5 мас. %) проведены в Институте минералогии УрО РАН. Автоматизированный минералогический анализ проведен в Санкт-Петербургском представительстве фирмы TESCAN с использованием приставки TMA на базе электронного микроскопа MIRA 3. Перечисленными методами был изучен тяжелый концентрат пробы прожилково-вкрапленных золото-сульфидных руд Самолазовского месторождения, измельченной до размера <1 мм и содержащей более 15 г/т золота. Руды в пробе представлены обломками кварцевых жил с незначительным содержанием карбонатов и метасоматически измененными сиенитами, подвергнутыми флюорит-сульфидно-кварцевым изменениям и незначительному окислению по трещинам. Содержания основных минералов в усредненной руде по данным рентгеноструктурного анализа (мас. %): кварц 59, микроклин 34, флюорит 2, Fe-содержащий доломит 3, слюда 3. Из пробы был получен тяжелый концентрат путем отмывки в лотке до серого шлиха и доводки

в бромформе. Из концентрата после просмотра под стереомикроскопом изготовлен полированный брикет на основе эпоксидной смолы.

По данным рентгеноструктурного анализа, состав тяжелого концентрата следующий (мас. %): пирит 43, флюорит 29, галенит 15, кварц 5, Fe-содержащий доломит 2, микроклин 2, слюда 2, сфалерит 1. Оптико-микроскопическое изучение показало, что концентрат состоит преимущественно из свободных зерен (обломков) флюорита, пирита и галенита, а также тонкозернистых агрегатов сульфидов (пирита и марказита) в нерудной матрице. В обломках пирита иногда наблюдаются включения халькопирита, в галените – сфалерита, блеклых руд. Подчиненное значение имеют сростки галенита и сфалерита, нерудных минералов с тонкозернистым пиритом и марказитом и оксидами титана, а также тонкозернистые агрегаты гетита, лимонита и продуктов окисления галенита с размерами выделений, не превышающими 1 мкм. Золото оптическими методами не обнаружено.

При помощи электронного микроскопа подтверждена диагностика основных минералов, установлено обогащение тонкозернистого пирита As и обнаружены единичные выделения золота, колорадоита, теллурида Bi, сульфосолей (тетраэдрита, люцитита и буланжерита), размеры которых не превышают 0.5 мкм (рис.). Среди продуктов окисления галенита диагностированы тонкие сростки оксида, арсената, сульфата и карбоната Pb. Установлено неоднородное строение гидроксидов железа, в которых обнаружены примеси Pb, Cu, Zn, Si, Al и V.

При автоматизированном минералогическом анализе выполнено валовое сканирование всех минералов с шагом 4 мкм и определением состава всех зерен и сканирование для поиска частиц золота с шагом 1 мкм, ориентированное на поиск минералов с большим атомным весом, которые дают наиболее яркое изображение во вторичных электронах.

При валовом сканировании (*liberation analysis*) ускоряющее напряжение пучка электронов составило 25 кВ, ток пучка электронов 5.9 нА и рабочее расстояние 15 мм; использовано 4 ЭД спектрометра с активной площадью полупроводникового кристалла каждого спектрометра 30 мм<sup>2</sup>. Размер единичного поля составлял 1500×1500 мкм. Всего отсканировано 113 полей. Длительность сканирования составила 4 ч 1 мин. Зарегистрировано 39 658 частиц, из них 22 824 частицы с размером,

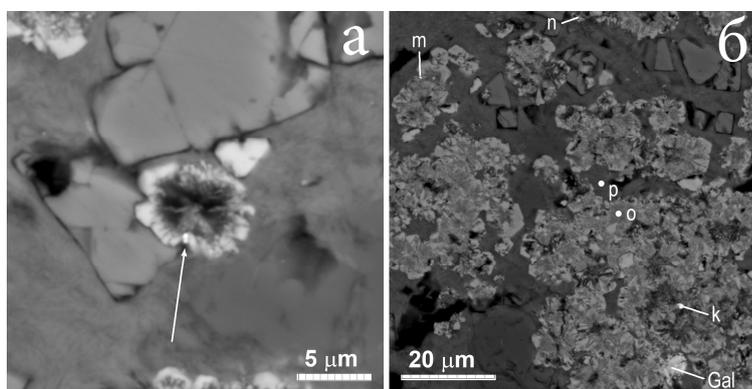


Рис. Субмикронные выделения золота в агрегатах пирита среди кварца и кристаллов флюорита: а – указано стрелкой, б – точки m, k.

превышающим три пикселя 4×4 мкм. С каждого пикселя собиралось 1000 рентгеновских фотонов. Присвоение определенному химическому составу пикселя названия (классификация) производилось в автоматическом режиме для рудообразующих минералов и в ручном – для редких минералов и смесей, состав которых не соответствует минеральным видам, внесенным в базу прибора. В результате анализа 93.17 % площади всех частиц было классифицировано в качестве определенных минералов или смесей. Остальная часть приходится на тонкодисперсные смеси и очень мелкие частицы. Результаты по классифицированным минералам и смесям, нормированные на 100 % с учетом плотности минералов, показали следующий состав (мас. %): пирит 38.6, флюорит 26.0, галенит 13.36, смесь оксидов, сульфатов и карбонатов свинца 6.9, кварц 5.1, Fe-доломит 1.8, окисленный пирит с примесью As 1.3, сфалерит 1.3, калиевый полевой шпат 1.2, гидроксиды железа с примесями 2.1, роскоэлит 0.6, апатит 0.3, арсенат свинца 0.3, кальцит 0.2, смесь кварца и роскоэлита 0.15, рутил 0.1. Среди минералов, содержания которых <0.1 мас. %, найдены барит, блеклая руда, уранинит, циркон, теллурид Bi, коффинит с примесью Th, тонкие сростания роскоэлита и пирита, кварца и оксида Ti, силиката Th и арсената Pb.

Для поиска золота применено сканирование в режиме Bright Phase Search, при котором сканируются только яркие и прилегающие к ним фазы. Шаг сканирования составил 3 мкм при стандартном поиске ярких фаз. Напряжение, ток и площадь сканирования аналогичны предыдущему. Длительность сканирования при шаге 3 мкм составила 33 мин. Стандартная процедура поиска ярких фаз с диапазоном яркости 91–100 % позволила выявить 15 169 ярких Pb- и U-содержащих частиц. Для того, чтобы ограничить задачу только наиболее «тяжелыми» частицами, диапазон яркости был ограничен до 95–100 %, а шаг сканирования уменьшен до 1 мкм. Однако даже при таком шаге сканирования, анализ позволил выделить только частицы с U и Th, что свидетельствует о том, что в изученном препарате размер частиц золота <1 мкм.

Таким образом, результаты количественной оценки состава тяжелого концентрата прожилково-вкрапленных золото-сульфидных руд рентгеноструктурным методом и при помощи автоматизированного анализа сопоставимы, но точность автоматизированного анализа выше и он позволяет учесть рентгеноаморфные минералы и минералы, содержание которых <0.3 %. В настоящее время в России имеется всего несколько приборов для дорогостоящего автоматизированного минералогического анализа. Кроме того, разделение тонких минеральных смесей в штатном режиме невозможно, а применение минимального шага сканирования значительно удлинит и удорожает анализ.

Преимущество рентгеноструктурного метода состоит в том, что он экспрессный, дешев и позволяет разделить тонкие смеси кристаллических минералов, однако он имеет низкую чувствительность. Применение оптико-микроскопических методов в данном случае позволило установить присутствие марказита, наряду с пиритом, и оценить соотношение сульфидов и окисленных минералов. Визуализировать золото удалось только при длительном и скрупулезном просмотре препарата при помощи электронного микроскопа. Учитывая все результаты, можно констатировать, что количественная оценка минерального состава тонкозернистых золото-сульфидных руд требует применения комплекса методов.

*Работа выполнена в рамках бюджетной темы Института минералогии УрО РАН № АААА-А16-116021010244-0. Автоматизированный минералогический анализ поддержан представительством TESCAN в Санкт-Петербурге. Авторы благодарны ПАО Селигдар за возможность работать с образцами руд месторождения.*