

# ВОЗМОЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ ПРИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКЕ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ РУД

*Ожогин Д.О., Ружицкий В.В., Дубинчук В.Т.*

ФГПУ «ВИМС», г. Москва

Перспективы извлечения ценных компонентов из комплексных руд черных, цветных, благородных, редких и редкоземельных металлов сегодня связаны с разработкой комбинированных технологий их переработки, которые позволяют создать законченный цикл обработки руды полиминерального состава и сложного строения с получением конечной товарной продукции. В связи с этим в настоящее время резко повышается роль прогнозной технологической оценки минерального сырья, которая позволяет оценить качество ожидаемых продуктов, рекомендовать наиболее эффективные методы рудоподготовки и обогащения руд, прогнозировать их поведение в последующих технологических процессах.

Специфические особенности современных руд (в первую очередь, цветных, благородных и редкоземельных металлов) нередко обусловлены высокой дисперсностью рудных фаз и их незначительным количеством. Поэтому традиционный комплекс минералогических методов, используемый при технологической оценке такого сырья, не всегда позволяет получить полную и всестороннюю информацию об изучаемом объекте. Следовательно, возникает объективная необходимость изучения их прецизионными методами, к числу которых относятся методы аналитической электронной микроскопии, которые сегодня уверенно переходят в разряд массовых аналитических и контрольно-измерительных методов при изучении тонкодисперсных объектов. Электронная микроскопия позволяет получить не только высококачественное изображение наблюдаемого объекта, но и информацию об особенностях его строения, минерального и элементного составов.

Основными методами современной аналитической электронной микроскопии (ЭМ) являются просвечивающая (ПЭМ), растровая (РЭМ) микроскопия и электронная микроскопия – рентгеновский микроанализ, взаимно дополняющие друг друга. При прогнозной технологической оценке минерального сырья обычно используется РЭМ, так как из всех методов электронной микроскопии это наиболее дешевый и малозатратный метод. Однако, при технологической оценке тонкодисперсных руд урана, золота, цветных металлов необходимо привлечение ПЭМ, поскольку именно просвечивающая электронная микроскопия позволяет выявлять, диагностировать и изучать минеральные фазы микро- и нанометровой размерности, представляющие в данном случае промышленный интерес.

Необходимо отметить, что в зависимости от вида сырья и конкретной задачи исследования (определения формы нахождения полезного компонента, характера сростания минералов, морфологии зерен и особенностей их поверхности и пр.) методы электронной микроскопии используются в различном сочетании и нередко в комплексе с рентгенографическим анализом. Также следует подчеркнуть, что электронно-микроскопические исследования требуют специальной пробоподготовки (изготовление реплик, суспензионных препаратов). Для получения более полной информации, как показал опыт, электронно-микроскопическому изучению руд должно предшествовать их изучение традиционными минералогическими методами.

Главными задачами, решаемыми сегодня при технологической оценке тонкодисперсных руд методами электронной микроскопии, являются выявление и идентификация фаз, слагающих тонкодисперсные руды или образующих микровключения в минералах, определение их размеров, морфологии (от  $n$  до  $0,1$  нм) и характера сростаний. Это имеет принципиальное значение при выборе оптимальной схемы переработки сырья для извлечения полезных минералов. В тоже время, электронно-микроскопические исследования позволяют получать информацию о тонкодисперсных фазах, необходимую для решения конкретных минералого-технологических и технологических задач. Например, при определении воздействия различных процессов на минерал и руду в целом имеет значение размер и характер структурных элементов на поверхности минеральных фаз (структуры выщелачивания, гидратации и регидратации, переотложение вещества по трещинам и межблочным границам), устанавливаемых с помощью фрактографии в электронных микроскопах. Соотношение структурных элементов дает возможность судить об устойчивости того или иного минерала к растворению, гидратации, сорбционной способности поверхности (по интенсивности накопления на поверхности минерала переотложенного вещества).

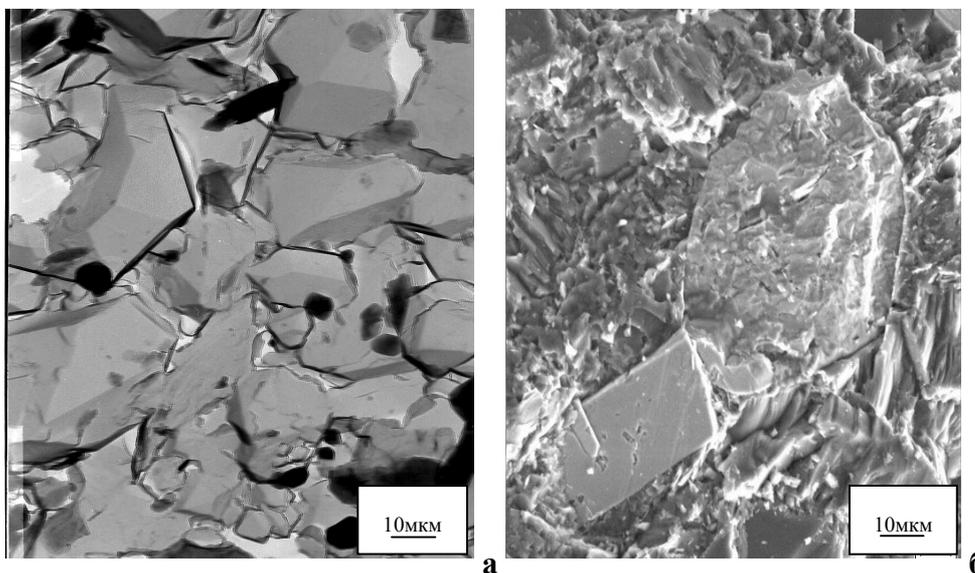
Известно, что особенности реального строения минералов в значительной степени влияют на технологические свойства руды в целом. Электронно-микроскопическим методом можно определить степень окисленности минерала, плотность и количество дислокаций, валентное состояние элементов, энергию связи элементов и распределение атомов по различным позициям в кристаллической структуре минерала, поведение и взаимодействие различных дефектов кристаллической решетки, механизм фазовых превращений, степень расслоения, особенности ориентационного взаимоотношения фаз, распад твердого раствора, характер псевдоморфных и вид смешаннослойных образований, политипные модификации минералов, элементный состав индивидов и закономерности распределения элементов в матрице минерала. Информация об особенностях реального строения минералов дает возможность не только определить физико-химические условия образования минералов и руд в целом, но и оценить их поведение в технологических процессах.

Кроме этого, методами электронной микроскопии можно выявлять особенности микроструктуры, микростроения и характера взаимоотношений породообразующих и рудных фаз в тонкодисперсных рудах, которые определяют возможность раскрытия рудных минералов и их селективного выделения в отдельный продукт.

Определенные успехи достигнуты при использовании методов ЭМ при проведении минералоготехнологической оценки золоторудных объектов. В связи с тем, что отечественная сырьевая база россыпного золота истощена, в последние годы наметилась тенденция увеличения добычи золота из коренных руд и нетрадиционных источников. Проблема разработки рационального и доступного для промышленности способа получения золота из такого сырья сегодня весьма актуальна. Золото в таких рудах нередко представлено микро-наноразмерными выделениями, присутствующими в сульфидах железа (пирите и арсенопирите). Поэтому для выявления и диагностики форм нахождения золота, характера его взаимоотношения с сульфидными минералами и их минералогических особенностей необходимо привлечение электронной микроскопии.

Исследование прожилковых кварцево-сульфидных золотосодержащих руд Дальнего Востока уже на ранних стадиях геологоразведочных работ показало, что в большинстве своем они относятся к категории упорных руд, в которых золото приурочено к арсенопириту и пириту. Выявление тонких особенностей золотосодержащих минералов, закономерностей распределения в них золота и форм его нахождения невозможно традиционными методами минералогического анализа. Поэтому при прогнозной минералоготехнологической оценке руд возникла необходимость использования методов ЭМ.

Электронно-микроскопическими методами в пирите и арсенопирите выявлено мелкое и тонкое золото в основном комковатой формы (рис. 1а), приуроченное большей частью к ослабленным участкам зерен минералов или интерстициям между ними. Установлено, что тонкодисперсное (ультра- ультра-микро-тонкое) самородное золото, представленное в основном выделениями изометричной (каплевидной) формы (рис.1 б), приурочено к микротрещинкам, микродислакационным нарушениям, интерстициям, интрарудным разрывам, к границам зерен, линиям спайности, краевым зонам ультразоноальности пиритоздрических плоскостей.



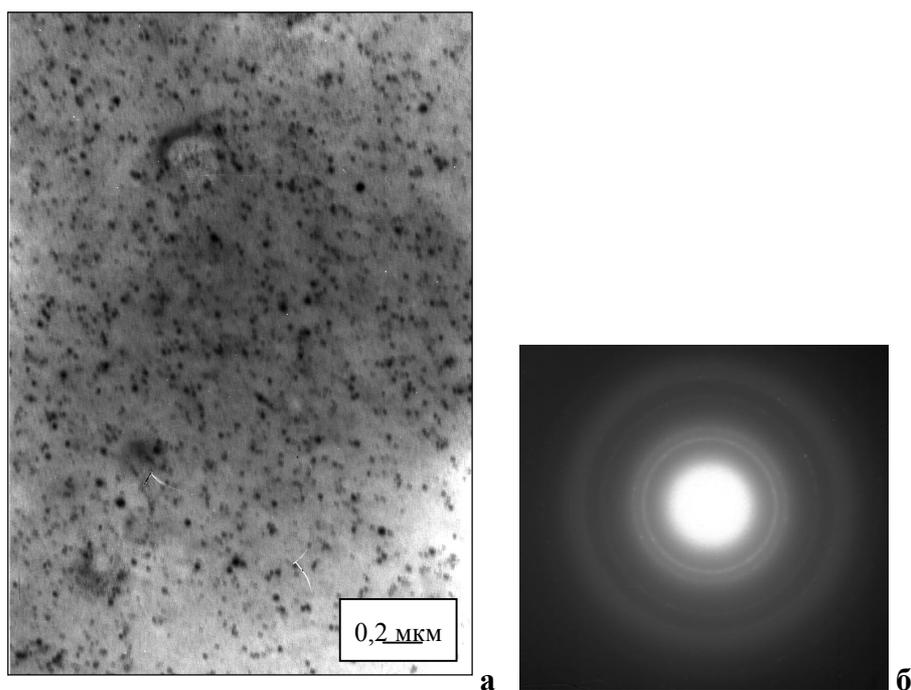
**Рис. 1. Фото с электронного микроскопа: а - самородное золото на границе зерен арсенопирита, РЭМ; б - каплевидное самородное золото в пирите, реплика со скола, ПЭМ**

Выявленные уже сегодня особенности золотосодержащих сульфидов железа, характера распределения в них золота морфологии и размера золотинок позволяют говорить о принципиальной возможности его извлечения из руд месторождения. Однако, совершенно очевидно, что выбор возможной технологии переработки упорных золотосульфидных руд потребует проведения более глубоких минералоготехнологических исследований.

При создании технологий переработки золотосодержащих руд электронная микроскопия может быть использована в качестве контролирующего метода, позволяющего определять полноту извлечения золота методами флотации, химико-металлургического передела и биовыщелачивания. Так, при извлечении тонкодисперсного золота из прожилково-вкрапленных золото-сульфидных руд в углеродисто-терригенных толщах (Дальний Восток) методами биотехнологии наиболее информативным контролирующим методом оказался

электронно-микроскопический. Растровая электронная микроскопия (увеличения от нескольких сот до десятков тысяч раз) позволила выявить особенности морфологии минеральных зерен, признаки коррозии сульфидов, установить их гетерогенность, в частности, обнаружить в зернах микровключения других фаз, в том числе золота. Использование микрозондовой приставки к растровому микроскопу позволило провести рентгеноспектральный анализ локальных участков зерен (минимальным диаметром до 5 мкм), определить элементный состав этих участков с точностью, достаточной для установления их фазовой принадлежности, выявления элементов-примесей.

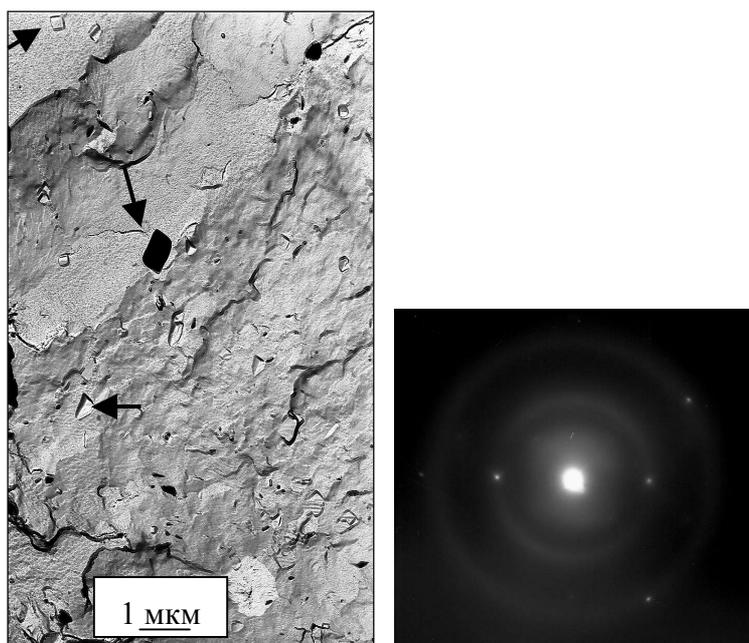
Применение просвечивающего электронного микроскопа расширяет диапазон увеличений до 1000–200000 раз и позволяет диагностировать минеральные фазы методом микродифракции электронов. В частности, этим методом во многих зернах арсенипирита из исходной руды и концентратов удалось выявить значительное количество ультрадисперсных выделений золота в виде контрастных структурно слабо упорядоченных сгустков размером в первые десятки нанометров (рис.2). Вероятно, именно это золото и составляет основную часть неизвлекаемого металла упорной руды исследуемого месторождения, поскольку для высвобождения из минералов-концентратов столь малых включений золотосодержащий концентрат должен быть измельчен до коллоидной крупности.



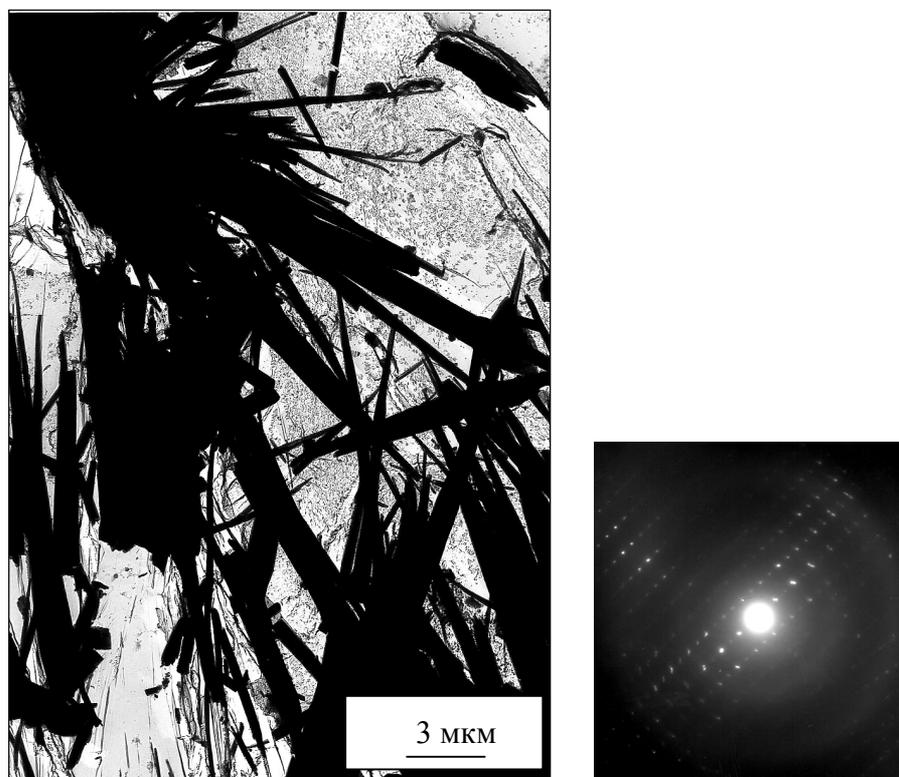
**Рис. 2. Арсенипирит с включениями золота ультрадисперсных размеров (а) и микродифракционная картина выделений золота (б)**

Методы аналитической электронной микроскопии на протяжении последних 40 лет с успехом применяются при исследовании минерального состава урановых руд разного генезиса. Углубленное изучение особенностей урановой и сопутствующей минерализаций во многом способствует решению вопросов технологии и генетических аспектов оруденения. Так проведенные электронно-микроскопические исследования дисперсных гидротермальных урановых руд одного из рудопроявлений (Южная Якутия) позволили установить, что основная урановая минерализация представлена уранинитом, содержащим высокодисперсные включения галенита (рис. 3). При наложении процессов окисления на эти рудные образования происходит формирование свинецсодержащего силиката уранила – казолита (рис. 4).

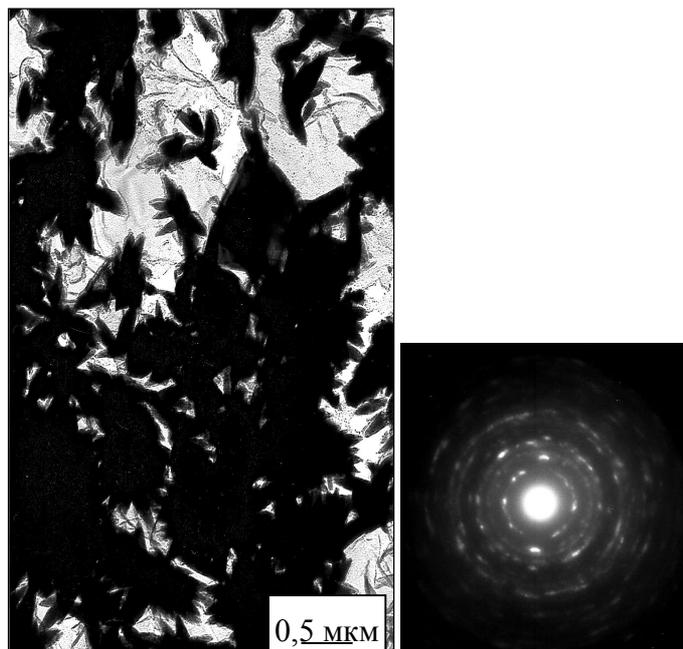
Большое практическое значение электронно-микроскопические методы получили при исследовании инфильтрационных месторождений, характеризующихся высокодисперсным бедным рассеянным оруденением, пригодным для отработки способом скважинного подземного выщелачивания (СПВ). В качестве примера продемонстрируем урановую минерализацию представленную дисперсными (десятые доли мкм) веретеновидными выделениями силиката  $U^{4+}$  – коффинита (рис. 5), слагающую одну из рудных залежей в палеорусловых отложениях. Опираясь на опыт отработки руд подобного минерального состава способом СПВ, можно уверенно говорить о высокой степени извлечения полезного компонента при отработке данной рудной залежи.



**Рис. 3.** Дисперсные кубические кристаллы галенита (показано стрелками) в уранините.  
Справа приведена точечная микродифракционная картина галенита,  
полученная с извлеченного на реплику кубического кристалла



**Рис. 4.** Лучистые и радиально-лучистые кристаллы казолита  
(черное – извлеченные на реплику кристаллы).  
Справа приведена точечная микродифракционная картина казолита,  
полученная с одного из извлеченных кристаллов



**Рис. 5. Скопления веретенновидных выделений коффинита, отлагающиеся на протравленной поверхности мелкообломочного материала. Справа приведена точечно-кольцевая текстурированная микродифракционная картина коффинита, характеризующая эти выделения**

Следует отметить, что высокое разрешение, достигаемое при использовании электронно-микроскопических методов, показывает целый ряд тонких особенностей состава и строения минеральных фаз тонкодисперсных руд в значительной степени определяющих поведение этих руд в технологических процессах. Информация по наноминералогии, в частности, упорного золотосодержащего и тонкодисперсного уранового сырья, в ближайшем будущем будет способствовать повышению эффективности переработки этих видов полезных ископаемых.

## **НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ СКАРНОВЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД ЮНЬЯГИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

*Азарнова Л.А.*

ФГУП «ВИМС», г. Москва

Юньягинское железорудное месторождение расположено на восточном склоне Полярного Урала (Ямало-Ненецкий АО). В тектоническом отношении оно находится в пределах Щучинского синклинория.

Месторождение приурочено к контакту эффузивно-осадочных пород с кислыми интрузиями и представлено довольно мощной и сложной зоной скарнированных пород и известковых скарнов, к которым приурочено магнетитовое оруденение. Предполагается, что месторождениями-аналогами для Юньягинского могут служить железорудные скарновые месторождения Тагильского прогиба (тагильский промышленный тип).

Характерными особенностями вещественного состава магнетитовых руд месторождений скарновой известковой формации, влияющими на эффективность процессов обогащения, являются разнообразие текстур руд, широкие вариации размеров магнетита и густоты его вкрапленности в пределах одного рудного тела, неоднородность магнетита, присутствие в ассоциации с магнетитом сульфидной минерализации, в том числе пирротиновой (до 5%), и соответственно повышенная сернистость руд.

При изучении керна рудных интервалов Юньягинского месторождения методами технологической минералогии предпринята попытка рассмотреть эти аспекты и дать прогноз обогатимости руды.

Магнетитовая руда представлена скарнами гранат-пироксен-магнетитового и гранат-пироксен-эпидот-магнетитового состава с хлоритом и амфиболом. Характерно непостоянство соотношения главных рудообразующих минералов. Визуально по содержанию магнетита выделяются относительно бедные и богатые магнетитом скарны, последние вплоть до сплошных руд. Более бедные руды имеют преимущественно