

Н.А. Королёв, М.К. Венгер, И.А. Королёв, А.А. Возная

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СХЕМ ОБОГАЩЕНИЯ РУД

В последнее время в России и мире стремительно сокращаются запасы богатых, легкообогатимых руд и нерудных полезных ископаемых. Вместе с тем резко возросли требования экологических нормативов к процессам добычи и обогащения, а также ужесточились ограничения по качеству сырья и продуктов обогащения. В этой связи перед инженерами и учеными возникают задачи по разработке и совершенствованию технологий разделения минералов и извлечения отдельных элементов из труднообогатимых, бедных и упорных руд, а также из техногенного сырья.

Выдающийся советский ученый-обогачитель И.Н. Плаксин высказывался о важности минералогических знаний о составе полезного ископаемого для совершенствования процессов обогащения и переработки руд и выделял *обогачительную минералогию* как особую отрасль геологической науки, позволяющую установить взаимосвязь между показателями сепарации и технологическими свойствами минералов [1]. На сегодняшний день эта область знаний более широко известна под названием «*технологическая минералогия*» (англ. *process mineralogy*).

Предмет исследования технологической минералогии – руда как совокупность минералов, углубленное изучение свойств которых позволяет совершенствовать процессы их разделения различными методами, комплексно использовать минеральное сырье и решать экологические проблемы при добыче и переработке.

Основные направления исследований в технологической минералогии включают [2]:

- изучение минерального и химического составов руд с целью установления минералов и отдельных элементов, подлежащих извлечению;
- изучение характера срастания и вкрапленности минералов для определения рациональных методов измельчения с целью наиболее полного раскрытия сростков;

- изучение форм вхождения ценных элементов в отдельные минералы и установление оптимальных методов их извлечения;
- минералого-технологическое картирование с выделением различных типов руд и минерального сырья;
- минералогическое и геохимическое изучение отвальных продуктов и создание ресурсосберегающей технологии их утилизации;
- определение опасных с экологической точки зрения минералов и элементов, разработка решений по предотвращению или снижению экологического риска.

Полная информация о составе руды может быть получена в результате вещественного анализа рудных и порообразующих минералов. Такая информация чрезвычайно важна для обоснования оптимальных схем извлечения полезных компонентов, а также для повышения комплексности использования руд. Технологическая минералогия использует методы геохимии, кристаллографии, петрографии, физики и химии твердого тела и других наук. Современные физические и химические методы анализа обеспечивают точную диагностику основных минеральных компонентов и элементов руд.

Минералогические исследования начинаются на стадии геологоразведочных работ с макроскопического описания осмотра невооруженным глазом образцов руды (рис. 1). При этом определяются порообразующие и рудные минералы, а также устанавливаются главные и второстепенные (подчиненные) минеральные компоненты.

Такой метод не позволяет выполнять достоверную количественную оценку минерального состава руды. Несмотря на это, он уже дает возможность специалистам-обогащителям предположить потенциальные способы переработки сырья, основываясь лишь на генетической классификации минералов.

Более подробное изучение минерального состава осуществляется с помощью методов оптической микроскопии в отраженном (для



Рис. 1. Образец медно-кобальтовой руды месторождения Луисвиши, Конго. Главные минералы: породообразующий – доломит (1); рудные – малахит (2), гетерогенит (3)

большинства рудных минералов) или проходящем свете (для породообразующих минералов). Микроскопические методы анализа прежде всего позволяют установить размеры вкрапленности рудных зерен и специфические черты контактирования рудных и породообразующих минералов (рис. 2).

Значительная часть ценных компонентов в руде представлена в виде сростков, поэтому изучение особенностей взаимного прорастания зерен в минеральных агрегатах и их текстуры особенно важно для выбора наиболее эффективного метода дезинтеграции и определения степени измельчения материала. Исследования минеральных агрегатов и раскрытых фаз во всех циклах переработки дают глубокую информацию о технологических свойствах руд и работе оборудования, позволяют планировать, направлять и усовершенствовать процесс рудоподготовки и переработки [3].

Количественный минералогический анализ с помощью традиционных микроскопических ме-

тодов рационально применять при диагностике минералов с содержанием выше 0,1 %, поскольку ниже этого порога его возможности резко снижаются. При диагностике минералов во многих случаях целесообразно сочетание оптико-минералогических методов с физическими методами электронной микроскопии, инфракрасной и радиоспектроскопии, рентгенофазового, электронно-зондового анализов и др.

Наименьший размер зерен, при котором возможно эффективное использование световой микроскопии, ограничен несколькими микронами. Также известно, что некоторые ценные компоненты, такие как золото и серебро, могут быть представлены в рудах включениями, размер которых не превышает долей микрон [4]. Для достоверной идентификации подобных включений используется метод сканирующей электронной микроскопии. В отличие от оптической микроскопии в этом методе для получения изображения используется не световой поток, а пучок электронов. Часть по-

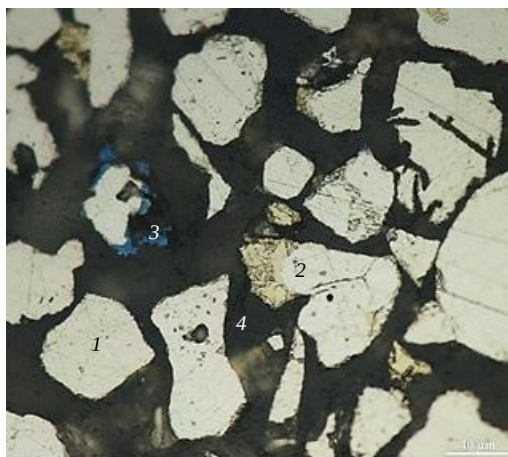


Рис. 2. Микрофотография пробы измельченной золотосодержащей медно-пиритной руды месторождения Асарел, Болгария (отраженный свет, николи параллельны): 1 – пирит, 2 – халькопирит, 3 – ковеллин, 4 – борнит

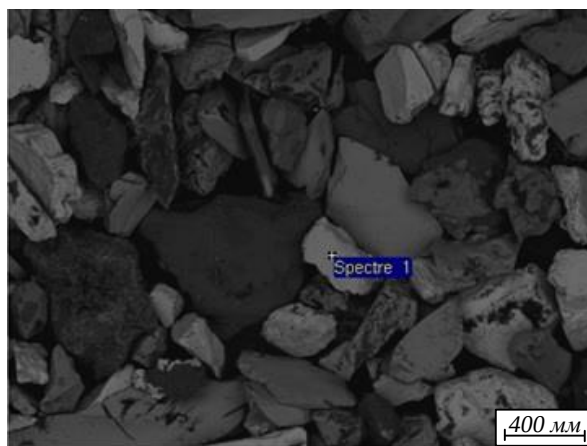


Рис. 3. Электронная микрофотография отходов обогащения пиритной руды месторождения Шизэй, Франция

тока электронов, отраженная поверхностью минерала, фиксируется датчиками, и затем на экране компьютера формируется черно-белое изображение (рис. 3).

Несмотря на возможность получения изображений с большим увеличением, практическое использование электронных микрофотографий для диагностики минеральных фаз весьма ограничено. Для решения этой проблемы современные электронные микроскопы дополнительно оснащаются сенсорами для рентгеноспектрального анализа. Принцип действия таких датчиков заключается в регистрации рентгеновского излучения, испускаемого поверхностью минерала при бомбардировке его электронами.

Отличием рентгеноспектрального анализа является возможность определения одновременно качественного и количественного элементного составов исследуемого образца. Эта особенность метода связана с тем фактом, что спектр рентгеновского излучения индивидуален для каждого химического элемента, а интенсивность спектральных линий характеризуется концентрацией элемента в образце.

Австралийскими учеными [5, 6] разработан аппаратно-программный комплекс QEMSCAN, представляющий собой сканирующий электронный микроскоп, оснащенный энергодисперсионными рентгеновскими спектрометрами и специальным программным обеспечением, что позволяет автоматизировать процесс анализа минерального состава руд. Комплекс QEMSCAN обеспечивает быстрое определение и количественный анализ минерального и химического составов, размера зерен и их морфологии для различных типов проб (рис. 4). Формат выводимых результатов предоставляет широчайшие возможности создания различных отчетов, например: по минеральному составу, по морфологии, минеральным ассоциациям, степени раскрытия полезных минералов [7].

Методы автоматизированного минералогического анализа (MLA, QEMSCAN, RoqScan и др.) могут служить инструментом диагностики проблем, связанных с низкими технологическими показателями обогатительного передела, а также выступать средством оптимизации процессов переработки руд изменчивого состава. Получаемая информация о минеральных

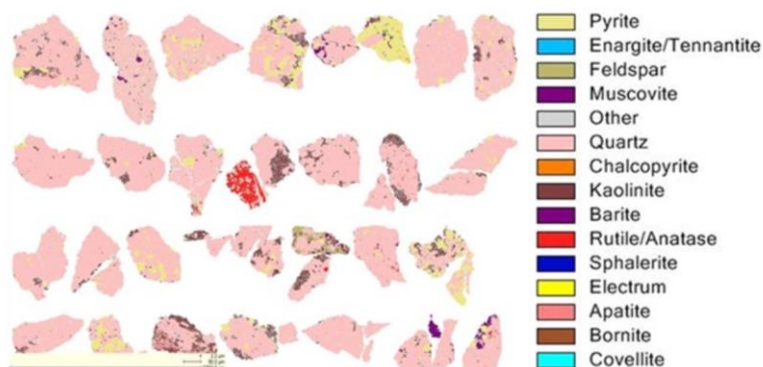


Рис. 4. Результат автоматического минералогического анализа отходов флотации медно-порфировой руды месторождения Челопеч, Болгария

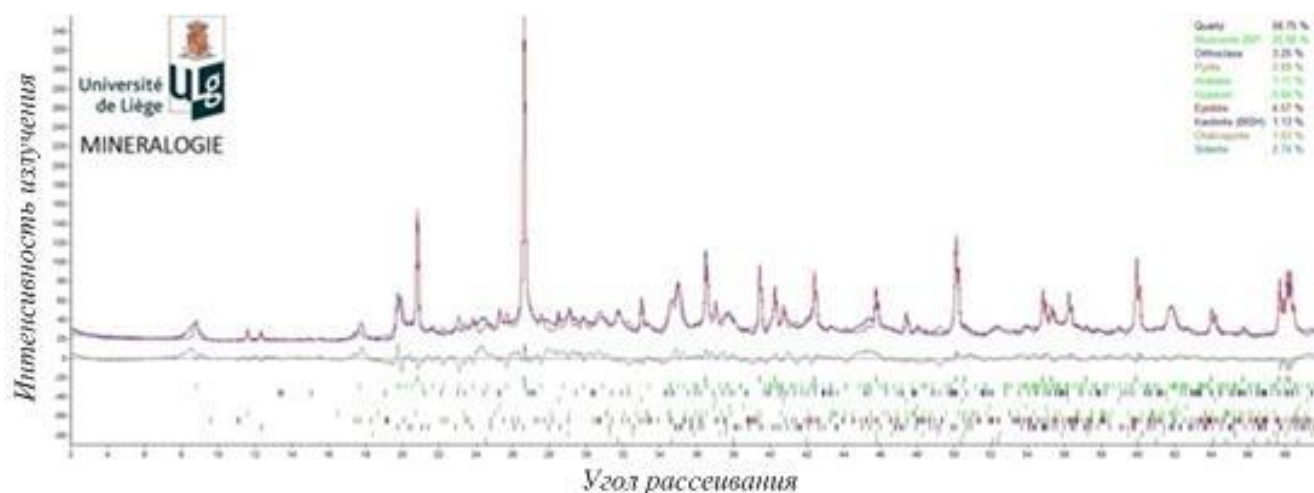


Рис. 5. Пример дифрактограммы, полученной при анализе образца медной руды месторождения Чертеж, Румыния

ассоциациях, степени раскрытия сростков и их текстурных особенностях позволяет инженерам-обогащителям адаптировать процесс переработки конкретного типа руды. Таким образом, достигается максимальная селективность измельчения и флотации, идентифицируются проблемные фракции руды и нежелательные минеральные компоненты, уменьшается нагрузка на окружающую среду за счет рационального использования воды в цикле, снижаются экономические риски путем управления качеством продукции [8].

Несмотря на значительные преимущества автоматизированных минералогических систем, весомым недостатком является невозможность различить химически сходные минералы, отличающиеся строением кристаллической решетки (например, теннантит и энаргит, диксит и каолинит, гипс и ангидрит). Вместе с тем расхождение в кристаллохимии минералов может влиять на их технологические свойства. Для качественного установления кристаллической структуры вещества существует метод рентгеноструктурного анализа, основанный на явлении дифракции рентгеновских лучей. Результат исследования представляется в виде дифрактограммы – графика зависимости интенсивности рассеянного излучения от угла рассеивания (рис. 5).

Для получения корректных количественных результатов методом рентгеноструктурного анализа содержание минерального компонента должно быть не менее 0,5 – 1,0 %, в противном случае оценка может быть недостоверной. Поэтому этот метод особенно полезен и информативен при описании породообразующих минералов [3].

Важность изучения рудных минералов для обогащателей несомненна. Однако вмещающие породы также должны подвергаться всесто-

ронному минералого-химическому анализу, поскольку они часто являются носителями сопутствующих элементов – как ценных, так и вредных примесей. Кроме установления форм вхождения элементов-спутников и их количественного участия, существует проблема установления корреляции между основными минералами и сопутствующими элементами и их распределения в продуктах обогащения.

Еще на стадии разведки месторождения очень важно установить закономерности распределения, формы вхождения вредных компонентов и дать обоснованный прогноз их перехода в воздушную и водную среды в процессах обогащения и переработки руд. Необходимо учитывать, что при обогащении имеет место многократное увеличение концентраций элементов в различных продуктах. Как следствие, элемент, не относящийся к разряду опасных, с повышением его содержания в продукте может переходить в эту категорию.

Микроанализ дает необходимую дополнительную информацию о микроструктуре и минеральном составе образцов. Вместе с тем нерешенной остается задача увязки этих результатов со стандартными технологиями для специфических условий российских месторождений. Для этого необходимо проводить исследования руд современными методами и сопоставлять их с уже существующими данными, полученными ранее.

Научно-технические достижения XX века существенно изменили содержание минералогии. Из дисциплины, информирующей обогащателей о минеральном и химическом составех руд, технологическая минералогия превратилась в инновационную отрасль науки, способствующую научно-техническому прогрессу в освоении месторождений труднообогатимых руд, комплексном использовании минерально-

го сырья, создании ресурсосберегающих технологий, разработке эффективных мер охраны окружающей среды. Технологическая минералогия прочно вошла в число основных разделов обогащения полезных ископаемых, а изучение состава, строения, физико-химических и технологических свойств минералов при обосновании процессов извлечения ценных компонентов из минерального сырья стало обязательным этапом изысканий. Одним из актуальных направлений исследований в области обогащения полезных ископаемых является технолого-минералогическая оценка техногенных месторождений на основе современных программно-аппаратных комплексов.

Выводы. Комплексная минералогическая информация в сочетании с кристаллохимическими особенностями, влияющими на технологические свойства руд, служит основой выбора оптимальной технологии обогащения и переработки. Технологам крайне важно знать все формы нахождения полезных и вредных компонентов в руде и их количественный состав. Изучение на этой основе делимости, обогатимости и извлекаемости минералов и элементов позволяет прийти к заключению о технологической и экономической целесообразности получения товарных продуктов определенного качества.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Плаксин И.Н. О некоторых задачах развития науки обогащения полезных ископаемых в области флотации // Цветные металлы. 1952. № 6. С. 17 – 25.
2. Пирогов Б.И. История становления и развития технологической минералогии // Прогнозная оценка технологических свойств полезных ископаемых методами прикладной минералогии: Сб. статей по материалам докладов VII Российского семинара по технологической минералогии. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2013. С. 7 – 37.
3. Korolev I. Increasing the recovery of valuable metals from the ores of Assarel mine, Bulgaria: MSc thesis. – Liège: ULg, 2016. – 66 p.
4. Викентьев И.В. Невидимое и микроскопическое золото в пирите: методы исследования и новые данные для колчеданных руд Урала // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57. № 4. С. 267 – 295.
5. Gu Y. Automated scanning electron microscope based mineral liberation analysis // J. Miner. Mater. Charact. Eng. 2003. Vol. 2. № 1. P. 33 – 41.
6. Fandrich R., Gu Y., Burrows D., Moeller K. Modern SEM-based mineral liberation analysis // Int. J. Miner. Process. 2007. Vol. 84. № 1-4. P. 310 – 320.
7. Соцкая О.Т., Горячева Е.М. Изучение возможностей прибора QEMSCAN для решения минералого-технологических задач // Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья: Сб. статей по материалам докладов VIII Российского семинара по технологической минералогии. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. С. 164 – 167.
8. Bradshaw D. The role of process mineralogy in improving the process performance of complex sulfide ores // XXVII International Mineral Processing Congress: Conference Proceedings; Ed.: Juan Yianatos / Santiago, Chile. 2014. P. 1 – 23.

© 2018 г. Н.А. Королёв, М.К. Венгер,
И.А. Королёв, А.А. Возная
Поступила 24 января 2018 г.