

## БУДУЩЕЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ

---

Будущее технологической минералогии (ТМ) — в развитии нанотехнологий различных видов тонкодисперсного минерального сырья (МС). Преобразование качеств минералов такого сырья реализуется в ряду: *минералогия* → *технологическая минералогия* → *технология* → *материаловедение*. Определяя тенденции развития минералогии на современном этапе, Н.П. Юшкин [15] подчеркивает значение интервенции минералогического познания во все области естествознания, в микромир, развитие таких направлений, как микро- и наноминералогия. Минералогия активно входит в понятия пограничья минерального мира — структурно-конституционные и пространственно-временные. Этому способствует мощный технический прогресс в развитии прямых методов структурных и морфологических исследований, особенно различных видов микроскопии (электронной, туннельной, атомно-силовой), позволяющих исследовать отдельные атомы и их мельчайшие закономерные группировки. “Расширяются и расплываются границы представлений о дисперсных объектах. К ним сегодня относятся не только фазово-индивидуализированные малые и сверхмалые частицы с отчетливыми поверхностными ограничениями, но и внутрифазные структурированные элементы (многоядерные соединения, молекулярные и надмолекулярные группировки, кластеры и т. п.), кратко живущие структурные ансамбли, биологические структуры соответствующих размеров и даже продукты нано- и микроинженерии...”

Современной тенденцией является распространение исследований на все более и более глубокие уровни дисперсности, переход от традиционных объектов околомикронной величины, т. е. микрообъектов, к ультрадисперсным объектам” [14]. Наиболее ярко состояние проблемы подчеркнул М. Хочелла [5]: “Нанонаука это сравнительно новая область исследования, которая в основном затрагивает проблемы обнаружения и изучения свойств вещества размером 1—100 нм, так называемой нанoshкалы. Механические, электрические, термодинамические и другие свойства сильно изменяются по мере того как физические размеры вещества входят в нанoshкалу, и исследователи в этой сфере только начинают систематизировать и понимать изменения свойств в этой

распывчатой области между классической (массивной) и квантовой областями". Микромир стал основным источником открытий новых минералов, особенно сульфидов, простых веществ и т. п. На основании работ Н.П. Юшкина, А.М. Асхабова, В.Л. Таусона, А.Х. Туресебекова, О.Б. Котовой, Р.И. Конеева, В.И. Ревнивцева, В.А. Чантурии и многих других сегодня сформулированы основные положения наноминералогии. В единой геолого-техногенной системе важен учет иерархической систематики дискретного состояния вещества [12] в ряду: *минерал* → *микроминерал* → *квазикристаллы* → *фуллерены* → *аморфное вещество* → *коллоиды* → *наночастицы* → *кластеры*. Это позволяет по-новому подойти к минералого-технологической оценке комплексности, экологичности полезных ископаемых (ПИ) и отходов, разработке нестандартных их оценки, технологии добычи и обогащения; обеспечить разработку экономико-экологических технологий получения новых нетрадиционных видов сырья (цеолиты, сапонит, полевые шпаты, дистен, гранаты и др.), постоянно расширяя области их применения. Здесь просматриваются следующие новые подходы.

1. С вовлечением в обогащение тонкодисперсных видов МС изменяется привычное представление о ПИ. *В технологических схемах все большую роль начинает играть размерный фактор сосуществующих минералов. Наноразмерные технологии предполагают изучение и внедрение механизмов извлечения ценных компонент на молекулярном, атомарном, электронном уровнях, когда появляется возможность управлять процессами на уровне формирования ПИ* [2, 3, 6, 11].

2. Исследования эволюции технологических свойств минералов (ТСМ) и поведения техногенных фаз позволяют говорить о двух основных механизмах изменений — полиморфном и изоморфном [1]. Наиболее четко оба механизма превращений противопоставляются в техногенезе. Полиморфный механизм превращений представляет собой симметричные реакции минералов. При этом энергия тратится на разупорядочение решетки и структура превращается в низкосимметричную фазу, как это было показано нами в морфотропном ряду оксидов для железных руд [8]: вюстит  $Fm\bar{3}m$  — магнетит  $Fd\bar{3}m$  — маггемит  $R4_22_12$  — гематит  $R\bar{3}c$ . С понижением симметрии возрастают примесная емкость структуры и реакционная активность полиморфных фаз. На примерах рядов сульфидов и оксидов [1] показано, что полиморфные модификации существенно различаются физическими свойствами: плотностью, твердостью, оптическими характеристиками. Это позволяет фиксировать при измельчении руд на горнообогатительных комбинатах (ГОКах) превращения: магнетит — гематит, сфалерит — вюртцит и др. Механизм нормального изоморфизма не связан с резким изменением в энергетике структур, предопределяя путь монотонного изменения физических свойств минералов. Нередко в макрокристаллах проявляется наноблочный изоморфизм [14]. Он образует новый мир структур и морфологически упорядоченных объектов, находящихся в дальнем порядке структурообразующих частиц (механически захваченные в процессе роста наноиндивиды; в виде структур распада твердых растворов; в межзеренных и границах субиндивидов; в агрегатах и надмолекулярной упорядоченности; в наноструктурах аморфных веществ и др.). Конституция и форма наноиндивидов определяются только внутренними факторами и практически не зависят от внешних воздействий. Это важно при решении проблем полного извлечения полезных компонентов из руд, получения новых видов МС, при оценке показателей обогащения руд различных генетических типов. Несомненно, выбор режимов обогащения руд различных генетических типов предопределяют оба явления. Практика работы ГОКов показывает, что на эффективность се-

парации многих руд может оказывать отрицательное влияние любой минерал (или группа минералов), даже в небольшом количестве, ухудшая показатели обогащения [2, 8]. Например, появление слоистых силикатов (талък, хлорит, слюды) от десятых долей до первых процентов отрицательно сказывается на флотационных свойствах рудных минералов из скарновых вольфрам-молибденовых руд. В железо-фосфорных рудах появление 0,5—1,5 % гипса подавляет флотацию апатита и т. д.

3. Существенно возрастает осознание роли поверхностей или приповерхностной области “S” наноминерального вещества [4]. Высокая степень поверхности (площади поверхности) обеспечивает весьма специфические характеристики сепарируемым минералам, которые и обуславливают непредсказуемый потенциал нанотехнологиям, в том числе при обогащении. Это связано с проявлением необычных физических, химических и механических свойств наноминералов, изменяющих кинетические и динамические характеристики. Нанообъектам свойственно другое время протекания процессов и явлений: в силу особых физико-химических и геометрических характеристик возрастает “быстродействие”. Прослеживается временная зависимость параметров системы частиц, и случайность их образования предполагает дуализм наносистем.

4. Разработаны новые технологии извлечения тонкого золота на основе нанотехнологий [3, 7]. В отличие от традиционного технологического подхода, Б.А. Остащенко [7] показана возможность создания поверхностного заряда у минералов, сопутствующих Au в концентрате, при термоэлектрической сепарации. Выяснилось, что равновесие на поверхности минерала, обусловленное адсорбцией  $\text{OH}^-$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{O}^-$ ,  $\text{CO}^-$ ,  $\text{C}^-$ , можно сдвинуть в ту или иную сторону самыми различными способами, в том числе нагреванием, облучением и др. Масс-спектроскопические и манометрические исследования выявили, что поверхность минералов шлиха (концентрата) в обычных условиях покрыта ионами  $\text{OH}^-$ . В результате нагревания они уходят с поверхности силикатов при 220 °С и оксидов при 400 °С. Поскольку  $\text{OH}^-$ -группы имеют отрицательный заряд, с их удалением поверхность минеральной частицы становится заряженной положительно. При этом на поверхности образуется нескомпенсированный заряд  $Q_s$ . У золота и алмаза при указанной температуре величина заряда близка к нулю. Извлечение частиц минерала размером 1—5 мкм мелких и тонких классов концентрата в экспериментах составило 99—100 %. Разработана также технологическая схема гравитационного обогащения Au класса —200+40 мкм. Использован при этом метод “изометризации” пластинчатого Au (с образованием валиков по краям золотин и формированием тороидальных частиц), что позволило повысить его извлекаемость на 25 %. Путем изменения магнитной восприимчивости минерала при ультразвуковом облучении Б.А. Остащенко удалось также повысить качество лейкоксенового концентрата с 50—52 % до 80,82 %  $\text{TiO}_2$  без изменения основных режимов и оборудования.

5. Разработанные методы получения наноминералов (плазменный; осаждение из газовой фазы, включая диссоциативную фотосорбцию; синтез из гелевых растворов; электроосаждение; ударное и электроимпульсное измельчение; природное образование) сегодня становятся составной частью технологии комплексной переработки природного и техногенного МС. Здесь особую роль играет энергетика. Огромные возможности энергии поверхностных процессов просматриваются в адсорбофизических методах сепарации, базирующихся на исследованиях кристаллохимических и кристаллофизических процессов в гетерогенных системах под влиянием различных воздействий [4].

6. Разнообразные *методы вибромеханической активации руд перед обогащением*, обеспечивающие селективность раскрытия руд преимущественно по границам сростаний минералов или отдельных кристаллических блоков (в частности 20 мкм); *гидрофобный метод выделения минералов (на стыке флотации и полиградиентной магнитной сепарации)*, позволяющий эффективно извлекать в магнитную фракцию магнитные и слабомагнитные минералы; *использование мощных электромагнитных импульсных воздействий* при переработке упорных золотосодержащих сульфидных руд и продуктов обогащения [6, 11]. На примере индустриальных минералов Карелии (гранат, амфибол, ставролит, кианит и др.) сотрудниками Института геологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск) разработана [13] серия методов направленного изменения их технологических свойств (магнитных, люминесцентных, свойств поверхности, ультразвуковых и др.), обеспечивших повышение эффективности технологий обогащения, прежде всего нанотехнологий. С позиций ТМ оценено влияние на процесс обогащения силикатов с удалением газово-жидких включений при термообработке, СВЧ-излучением, воздействием мощных электромагнитных импульсов и радиационным излучением.

7. Технологами предложены самые разнообразные направленные изменения физико-химических свойств минералов в процессах обогащения ПИ. *При направленном изменении свойств минералов на макро-, микро- и наноуровнях возможно воздействовать как на сам минерал, так и на среду. При различных видах энергетического воздействия возможно направленно преобразовать ТСМ, выбрать оптимальный способ модификации, изменив целенаправленно контрастность сепарируемых минералов и оптимизировав схему обогащения.*

В заключение необходимо подчеркнуть, что высокий научно-теоретический потенциал учения Д.П. Григорьева об онтогении минералов дает геологам, минералогам и технологам новый подход в решении проблем выявления и оценки ТСМ различных видов МС. Он позволяет проследить изменчивость эволюции системы *месторождение полезного ископаемого → обогатительная фабрика → хвостохранилище → отвалы*, обеспечивая ее комплексную оценку, управление и прогноз.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дементьева Г.И., Смирнов Ю.М. Изоморфные и полиморфные превращения минералов в техногенезе // Обогащение руд. — 1988. — № 3. — С. 34—37.
2. Изюмко В.М. Технологическая минералогия и оценка руд. — СПб.: Наука, 1997. — 582 с.
3. Конеев Р.И. Наноминералогия золота эпитермальных месторождений Чаткало-Кураминского региона (Узбекистан). — СПб.: DELTA, 2006. — 206 с.
4. Котова О.Б. Поверхностные процессы в тонкодисперсных минеральных системах. — Екатеринбург: УрО РАН, 2004. — 194 с.
5. Наноминералогия. Ультра- и микродисперсное состояние минерального вещества. — СПб.: Наука, 2005. — 581 с.
6. Направленное изменение физико-химических свойств минералов в процессах обогащения полезных ископаемых // Плаксинские чтения. — М.: Альтекс, 2003. — 145 с.
7. Остащенко Б. А. Направленное изменение технологических свойств минералов: Автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. — Сыктывкар: ИГ Коми науч. центра УрО РАН, 1998. — 43 с.
8. Пирогов Б.И., Порохов Г.С., Холошин И.В., Тарасенко В.Н. Технологическая минералогия железных руд. — Ленинград: Наука, 1988. — 304 с.
9. Ревнивец В.И. Роль технологической минералогии в обогащении полезных ископаемых // Зап. Всесоюз. минерал. об-ва. — 1982. — Вып. 4. — С. 4—20.

10. *Ревнивец В.И.* Рудоподготовка как новое направление горных наук // Основные направления развития техники и технологии обогащения полезных ископаемых. — Ленинград, 1983. — С. 3—22.
11. *Современные* методы оценки технологических свойств труднообогатимого и нетрадиционного минерального сырья благородных металлов и алмазов и прогрессивные технологии их переработки // Плаксинские чтения. — М.: Альтекс, 2004. — 232 с.
12. *Туресебеков А.Х. Конеев Р.И., Каширский С.А., Ахмедов А.М.* Дискретное состояние вещества в рудных и техногенных системах // Минералогическое общество и минералогическая наука на пороге XXI века. — СПб.: Мин. об-во при РАН, 1999. — С. 174—175.
13. *Щипцов В.В.* Технологическая минералогия индустриальных минералов Карелии // Минералогия, петрология и минерагения докембрийских комплексов Карелии. — Петрозаводск: Карел. НЦ РАН, 2007. — С. 119—123.
14. *Юшкин Н.П.* Наноминералогия: объекты, функции, перспективы // Минералогическое общество и минералогическая наука на пороге XXI века. — СПб.: Мин. об-во при РАН, 1999. — С. 20.
15. *Юшкин Н.П.* Современная минералогия и новые тенденции ее развития // Новые идеи и концепции в минералогии. — Сыктывкар, 2002. — С. 8—9.