

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ

Пирогов Б.И.

РГГРУ, г. Москва

Технологическая минералогия объединяет минералогические и технологические исследования, связанные с изучением вещественного состава, текстурно-структурных признаков полезных ископаемых, технологических свойств минералов в эволюции единой геолого-техногенной системы на макро-, микро-, наноуровне, направленные на комплексное использование минерального сырья при разработке рациональных, экологически чистых схем обогащения (Пирогов Б.И.).

Она позволяет с единых позиций проследить весь ход изменений минерального вещества литосферы через технологию обработки и переработки до накопления в литосфере отходов (Ревнищев В.И.).

Вводя понятие техногенеза, в 1933 г. А.Е. Ферсман писал: «Хозяйственная и промышленная деятельность человека по своему масштабу и значению сделалась сравнимой с самой природой... Человек геохимически переделывает мир». Это в значительной степени предопределило минералогическую эволюцию недр в горнорудном производстве.

Формирование эффективной системы недропользования при добыче и переработке минерального сырья (МС) на основе комплексного освоения и использования всей совокупности ресурсов недр относится к сложному многоэтапному и непрерывному процессу глубоких теоретических, методологических исследований, обобщений, моделирования и практических проработок, диагностики, координации, мониторинга и коррекции. Требуется пересмотр традиционных подходов и понимания многих экономических категорий, принципов, методов, оценок [1]. Горнодобывающая промышленность в мире, по данным ЮНЕСКО, развивается в среднем в 1,6 раза быстрее, чем все остальные виды индустрии. Сегодня горными работами во всем мире нарушено свыше 6 млн. га и ежегодно добывается свыше 100 млрд. т МС. В процессе горных, добычных и строительных работ за год перемещается около 1 км³ пород, а это равносильно денудационной работе рек [2]. В техносфере горнопромышленных комплексов миграция вещества происходит по схеме: **извлечение из недр → переработка в промышленных технологических цепочках → образование водоемов-хвостохранилищ → минералогическо-геохимические преобразования отвальных хвостов с осаждением илов и миграцией химических элементов → осаждение их на геохимических барьерах (в частности, перемычках и дамбах) → выход на ландшафт и участие в биологическом круговороте** [3]. Подсчитано, что **сквозные потери полезных ископаемых (ПИ) складываются из потерь: 10-30% – при добыче, 20-40% – при обогащении, 10-15% – при химико-металлургическом переделе**. При этом возникают локальные геотехногенные аномалии. Для рудных районов в геотехногенезе ландшафтов и водных экосистем важны проблемы миграции минеральных форм As, Bi, Se, Te, F, Cd, In, Tl, W, U, Th и других элементов руд. С отходами производства связаны разнообразные техногенные МПИ, которые являются важнейшими новыми видами сырья. Их вовлечение в практическое использование повысит рентабельность предприятий и улучшит экологическую обстановку в регионах. *Поэтому сейчас главное направление хозяйствования – это разработка безотходных и малоотходных технологий в использовании МС.*

Начало XXI столетия в мире связано с возникновением минерально-сырьевого бума, в том числе и на твердые ПИ. На фоне резкого увеличения мирового производства ряда металлов и соответственно спроса на большинство видов МС, в частности, для металлургии, Россия сегодня существенно отстает, особенно от темпов бурно развивающегося Китая, как это показано в кратком обзоре ВИМСа по развитию новых минерально-сырьевых металлургических комплексов страны [4]. Подчеркивается, что **«ключевым элементом в решении сырьевых проблем отечественных горнометаллургических проектов должно стать создание и применение современных прогрессивных технологий добычи, обогащения и передела руд, обеспечивающих эффективную эксплуатацию ныне нерентабельных месторождений, извлечение главных и основных сопутствующих полезных компонентов, замкнутый технологический цикл, минимизацию экологического ущерба и утилизацию отходов»**. В решении этих задач, несомненно, **весьма значимой становится роль технологической минералогии (ТМ)**, основные проблемы которой отражены в схеме (рис.1).

ПРОБЛЕМА 1. ТМ обеспечивает решение широкого комплекса задач по изучению и минералогическо-технологической оценке вещества, охватывая стратегический (формационный) и тактический (регионально-локальный) уровни. Ведь каждая руда (МС), с одной стороны, специфична по своим минералогическим характеристикам, которые должны быть отражены в конкретных тактических технологических решениях, с другой – руды одной и той же формации (например, железистые кварциты докембрия; окисные марганцевые; сульфидные руды месторождений меднопорфировой и других формаций) стратегически близки по основным геолого-минералогическим факторам обогатимости [1, 5, 6 и др.]. **Сегодня системный инновационный подход к минералогическо-технологической оценке различных видов МС, как природного, так и техногенного, является определяющим.** При этом важно обеспечить **«рациональное сочетание методов рудоподготовки, обогащения и передела с целью комплексного извлечения полезных компонентов с получением широкого спектра ликвидных товарных продуктов и новых нетрадиционных видов минерального сырья»** [4]. *Системность подхода определяют следующие позиции:*

- интеграция минералогических методов с обогащением на основе синтеза знаний минералогии (кристаллохимии, онтогении и др.) и развития эксперимента в технологии с целью повышения эффективности рудоподготовки и обогащения ПИ;
- выявление и оценка геолого-минералогических факторов, определяющих природу технологических свойств минералов (ТСМ) ПИ различных генетических типов, с учетом характера и глубины изменений их в гранулометрическом спектре на разных уровнях (макро-, микро-, наноуровне) минералогической «памяти»;
- выявление минералогических критериев оценки ПИ в единой геолого-техногенной системе (ЕГТС) на основе комплекса физических методов и прослеживание закономерностей эволюции ТСМ в различных узлах технологической схемы;
- разработка и внедрение технологических методов селективного выделения минералов с использованием новых систем рудоподготовки и обогащения ПИ;
- разработка и внедрение комплексных технологий получения новых нетрадиционных видов МС и, прежде всего, при переработке техногенного МС;
- совершенствование системы технологической оценки новых минеральных объектов на ранних стадиях ГРР.

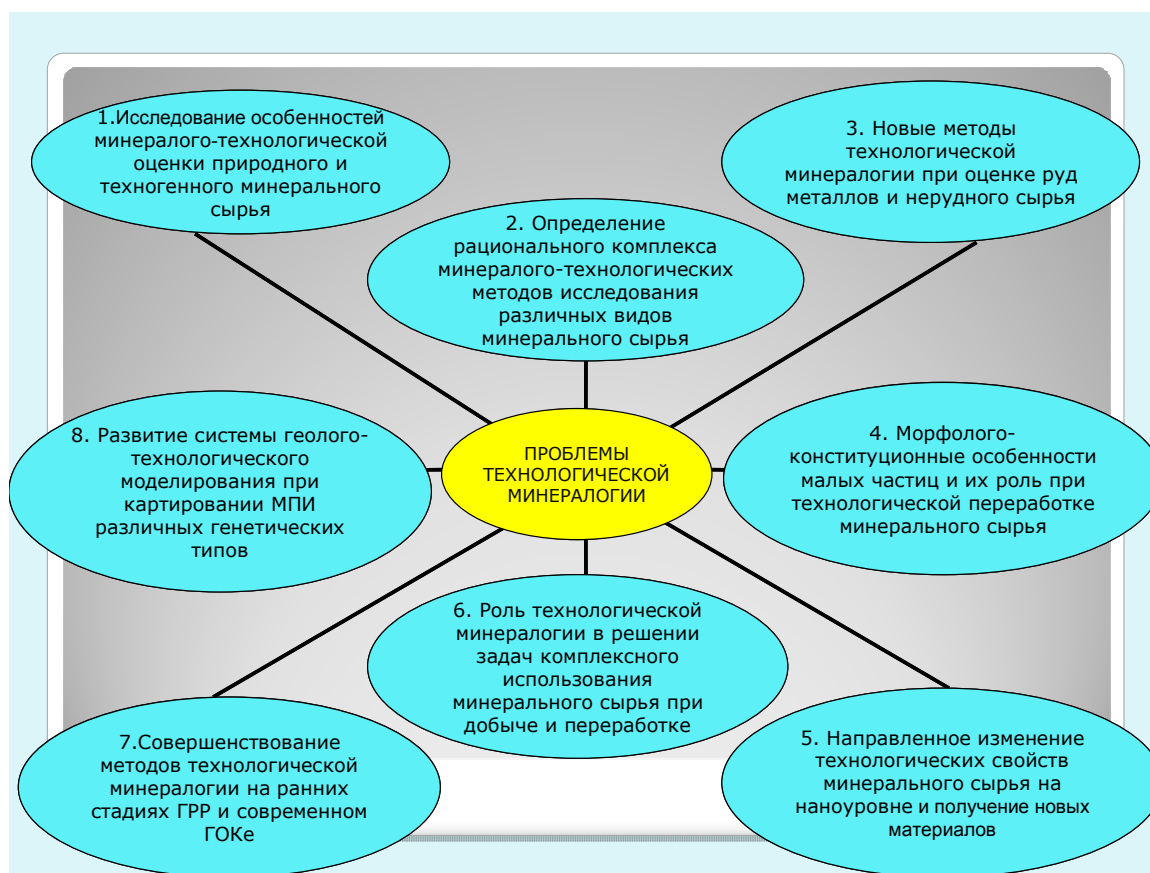


Рис. 1. Современные проблемы технологической минералогии

Так, в развитие новых минерально-сырьевых металлургических комплексов России ФГУГ «ВИМС» [4] среди передовых технологий добычи и переработки ПИ выделил следующие:

- в **добыче МС** – скважинные подземное выщелачивание и гидродобыча, сортировка радиометрическая крупнопорционная,
- в **рудоподготовке** – «сухие» методы дробления, измельчения (в том числе сверхтонкого), обеспечивающие при минимизации энергоемкости операций оптимальное раскрытие полезных минералов,
- в **крупнукосковом обогащении** – высокопроизводительные методы радиометрического, магнитного, гравитационного обогащения на материале классов крупности -200+10 мм,
- в **глубоком обогащении** – магнитное обогащение на аппаратах с постоянными магнитами, «сухие» методы гравитации, электрическая сепарация, селективная флотация,
- в **химико-технологическом переделе** – новые пиро-, химико- и биометаллургические процессы с использованием нетоксичных и малотоксичных реагентов, подготовка тонкодисперсных концентратов к металлургической плавке,
- в **минерало-аналитическом обеспечении** – высокоточные современные и экспрессные методы и технологии анализа вещественного состава, структуры и свойств пород, руд, минералов, технологических

продуктов, применяемые на всех стадиях работ по добыче и переработке ПИ, сертифицированные по единым стандартам.

Для труднообогатимых Mn, Cr, Fe-Ti-V и редкометалльных танталсодержащих руд ряда регионов за последнее десятилетие в ВИМСе в развитие предложенных направлений уже разработаны рациональные технологии комплексной их переработки. Аналогичные разработки выполнены и рядом других организаций как по рудному, нерудному, так и по техногенным видам МС.

ПРОБЛЕМА 2. Определение рационального комплекса минералого-технологических методов исследования различных видов МС, наряду с уже существующими комплексами минералого-аналитических и технологических методов, связано с внедрением новых методов изучения, оценки конституции и свойств минералов, позволяющих учесть специфику того или иного вида сырья. Особая роль при этом отводится глубоко минералогическим исследованиям с привлечением современных высокоточных, чувствительных и экспрессных методов, обеспечивающих выявление весьма тонких минеральных фаз на микро – и наноуровне. При этом используются прямые методы макро– и микроскопических исследований структурных, морфологических характеристик минералов, в том числе специальные виды микроскопии (электронной, туннельной, атомно-силовой), позволяющих изучать отдельные атомы и их мельчайшие закономерные группировки; тонких особенностей конституции, закономерностей изменчивости свойств минералов в практике поисково-оценочных и технологических работ [7]. В оценке минералов все более важной становится *гетерогенность их состава и структуры*, предопределяющая необходимость оценки в технологических процессах роли весьма тонких частиц (<10-20 мкм). С появлением их, наряду с объемными преобразованиями, более значимым выявляется вклад измененных свойств поверхности, влияющих на изменчивость технологических свойств минералов [8]. Стал определяющим [9] количественный фазовый анализ как химическими, так и физическими методами в оценке минерального сырья. С ним связана оценка содержания минеральных и синтетических, кристаллических и аморфных фаз (соединений) природных и техногенных объектов. Выбор метода определяется объектом и требованиями к точности анализа, т. к. даже в одном объекте формы проявления элементов могут существенно отличаться. Так, на рис. 2 отражены особенности микронеоднородности обломков марганцевой карбонатной руды, позволившие учесть их в связи с разработкой схемы обогащения.

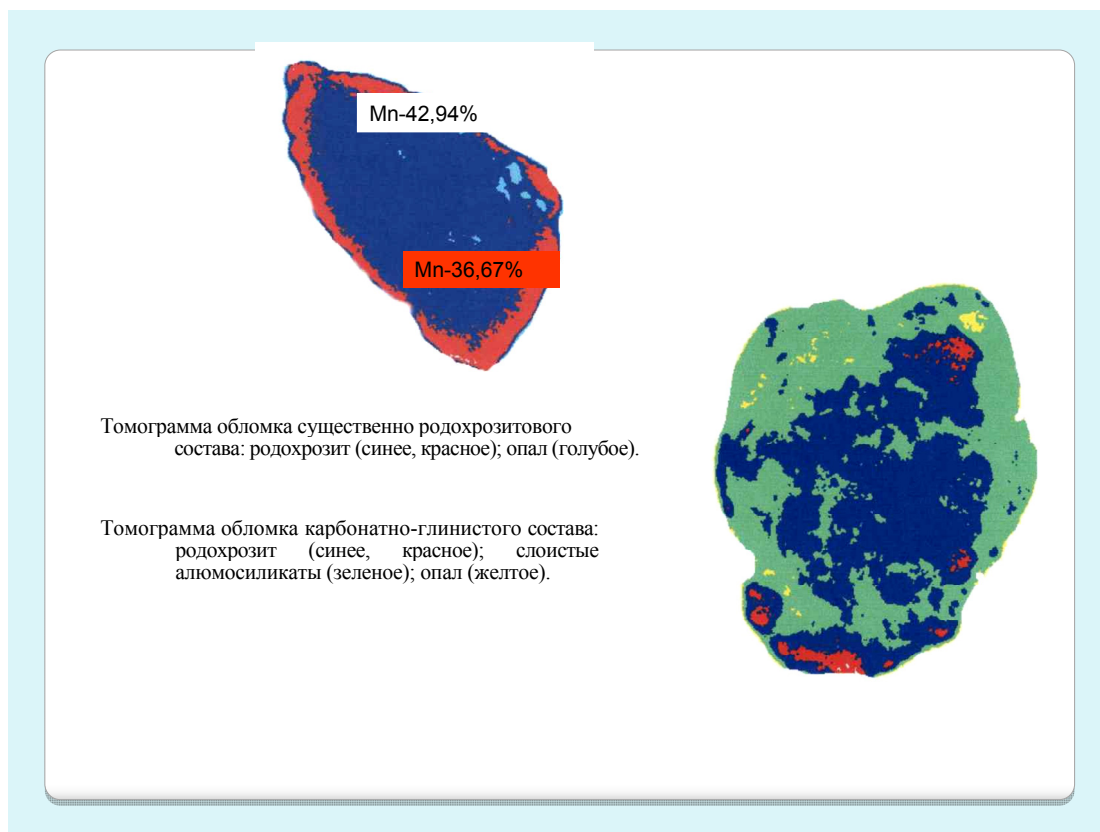


Рис. 2. Оценка неоднородности обломков карбонатной марганцевой руды Тыньиньского месторождения методом рентгеновской микротомографии (по Ожогойной Е.Г., 2002)

Весьма информативным методом фазово-структурной неоднородности магнетитов различных генетических типов железных руд является метод термомагнитного анализа (рис. 3), проведенный нами на аппаратуре и по методике, разработанной Колесниковым Л.В. (кафедра минералогии МГУ им. М.В. Ломоносова). Фазово-структурная гетерогенность фиксируется точкой Кюри минерала, проявлением пиков маггемита двух стадий выделения (*фазовая неоднородность*) и областью между кривыми нагревания и

охлаждения («структурная» неоднородность). Чем шире область между кривыми, тем грубее микроблочное строение индивидов, тем меньше среди них наночастиц. Аналогичную информацию, как показывают наши и другие исследования по различным видам МС, несомненно, могут нести данные ИКС, термического, магнитного и других анализов.

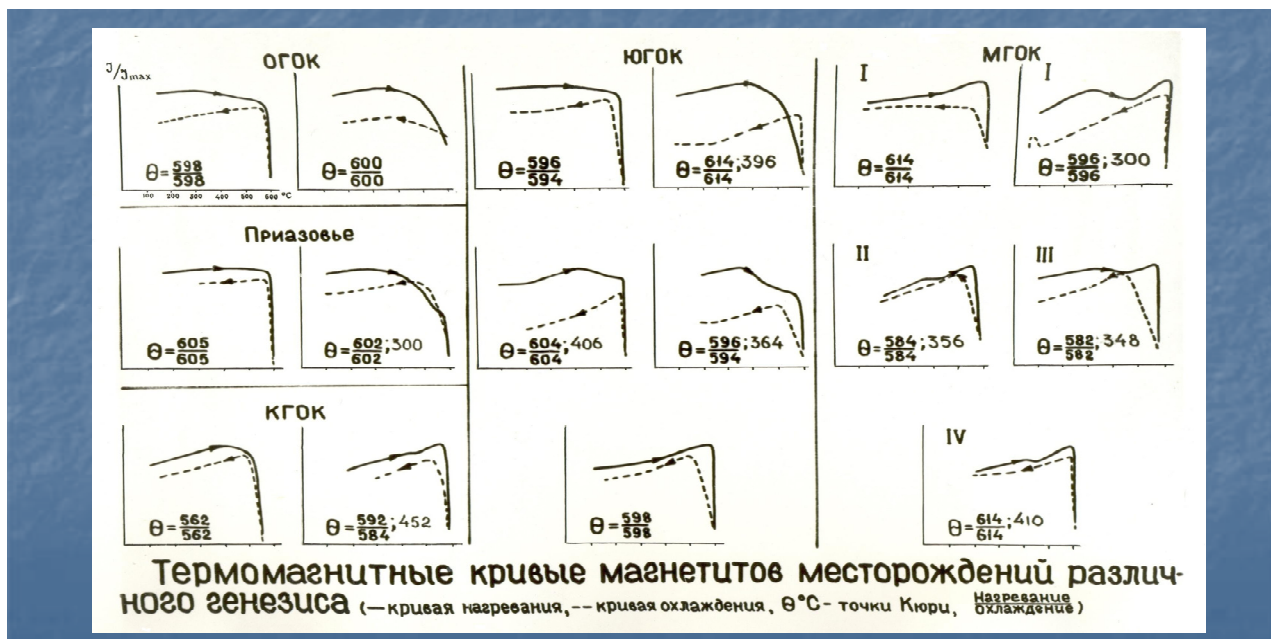


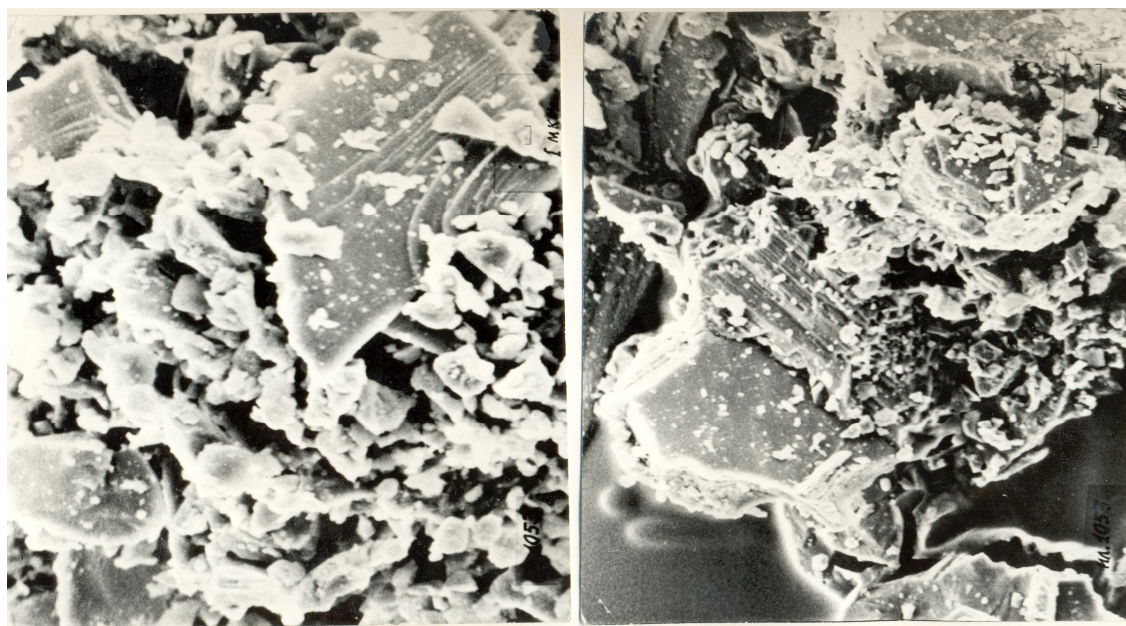
Рис. 3. Неоднородность фазового состава и магнитной структуры магнетитов различных месторождений: ОГОК – Оленегорское, ЮГОК – Скелеватское, МГОК – Михайловское, КГОК – Ковдорское месторождения

Сегодня используется высокий уровень комплексирования различных видов анализа. Достоверность оценки обогатимости МС зависит от полноты изучения вещественного состава и точности определения его технологически значимых параметров – текстурно-структурных, морфометрических, являющихся наиболее динамичными и важными, широко изменяющимися в технологическом процессе. ВИМСом [10 и др.] рекомендован комплексный подход к оценке рудных и нерудных ПИ с учетом их специфики. Одним из ведущих методов экспрессной минералоготехнологической оценки выступает оптико-геометрический анализ, позволяющий при послойном сканировании объекта выявлять особенности распределения минеральных фаз, получать из автоматизированных компьютерных систем анализа изображений – морфоструктурные данные (вкрапленность в связи с гранулометрией, формой и типом сростаний с другими минералами), а также такие характеристики, как минеральный (фазовый) состав в исходном, измельченном материалах и технологических продуктах; гранулометрический состав (массовый и количественный) в тех же продуктах; начало раскрытия сростков; модальность (стадиальность) раскрытия; неоднородность минералов и степень их окисления; степень контрастности технологических свойств. По этой информации определяются: оптимальные режимы рудоподготовки с полным раскрытием рудных минералов и глубина обогащения по сочетанию механического и химико-металлургического переделов; рациональная схема обогащения, основные технологические показатели, которые могут быть получены при переработке по рекомендуемой схеме; неизбежные технологические потери. Также комплексно используются методы: РВТВ – рентгеновской вычислительной микротомографии (при послойном сканировании объекта выявляются особенности распределения минеральных фаз – форма и размеры, характер сростаний и др.), ЭМ и РЭМ, ИКС, РКФА, ЯГРС, ЯМР, ЭПР, ИТЛ, ТЭДС, КФА, термохимический, термобарогеохимический, радиографический, рентгеноспектральный, микронзондовый (протонный), люминесцентный и др. Использование онтогенетического подхода в комплексе с традиционными минералогическими, а также современными физическими и физико-химическими методами анализа вещества при телесном исследовании индивидов, агрегатов минералов и ПИ в целом. Обработка полученной информации с помощью компьютера для выявления тонких особенностей конституции минералов, а также детальное изучение минеральных ассоциаций, выявление закономерностей изменчивости минералов в морфолого-структурном ряду с учетом технологических данных; получение информации о типоморфных признаках и свойствах минералов, определяющих обогатимость ПИ. **Для рудных, нерудных, техногенных ПИ определяется свой комплекс минералогических и других методов минералоготехнологической оценки с учетом их генетических особенностей и преобразований при обогащении.**

ПРОБЛЕМА 3 связана с внедрением новых методов минералого-технологических исследований в ТМ при оценке МС. Опираясь на исследования особенностей вещественного состава, текстурно-структурных признаков, физико-механических и физико-химических свойств ПИ различных генетических типов и законы минералогии, учитывая взаимосвязи и во многом подобие между процессами минералообразования (преобразования) в Природе и Технологии, данные технологических экспериментов, мы формируем наши представления о ТСМ. Внедрение в практику минералого-технологической оценки ПИ учения Д.П. Григорьева об онтогении минералов (ОМ) позволило глубже понять как природу становления, так и изменения ТСМ. Информация о свойствах локализуется на различных уровнях минералогической «памяти» – морфологическом, изотопном, молекулярном, структурном, магнитном и т.п. Минералоги и технологи должны понять характер и особенности проявления ТСМ, чтобы научиться управлять ими. Учение об ОМ вошло в основу совершенствования минералогического направления в ТМ, так как *генезис руд (МС в целом) проявляется в качествах минералов — минерогенетических признаках, «записанных в конституции, морфологии и свойствах минеральных индивидов и агрегатов»* [11]. При этом **учитываются эволюционные закономерности развития минерального мира во взаимосвязи с живым веществом: минералов и их ассоциаций; в целом состава, текстурно-структурных признаков и свойств (в т.ч., ТСМ) ПИ, формирующихся на макро-, микро – и наноуровне в различных энергетических полях (гравитационных, магнитных, электрических, полупроводниковых и др.) ЕГТС.** Они определяют основные геолого-минералогические факторы обогатимости ПИ с учетом их минералого-геохимической и экологической специализации, отражая круговорот МВ в Природе и Технологии на различных уровнях его организации: *индивид (кристалл, зерно, частица) → агрегат (агрегат техногенных малых частиц) → рудное тело → минералогическая аномалия (отвалы пустых пород и некондиционных ПИ, хвостохранилища – техногенные МПИ) → минералогическое поле.* Опыт показывает, что при разработке технологических схем для руд даже хорошо изученных однотипных месторождений, каждый раз приходится сталкиваться с большими трудностями, так как ТСМ при этом могут весьма существенно варьировать. Это обусловлено, прежде всего, широким спектром природной гранулометрии индивидов и агрегатов минералов, содержащих включения, примеси, нередко покрытых различными по составу пленками, подвергающимися в процессе раскрытия при дроблении и измельчении определенным механическим воздействиям. Поэтому при минералого-технологических исследованиях крайне важно использование приемов и методов ТМ на онтогенетической основе, что позволит выявить и оценить ТСМ. *Познавая генезис минералов, как в Природе, так и Технологии, мы можем подойти к возможному рациональному использованию МС.* Именно **онтогенетический подход с учетом данных технологического эксперимента обеспечивает: а) оценку гетерогенности особенностей конституции (состава и структуры) минералов, б) выбор оптимальных условий раскрытия зерен полезного компонента,** отражая природу сростаний – гранулометрию, форму зерен сростающихся минералов, особенности их границ и физико-механических свойств. Как показывают наши наблюдения [1988], Т.С. Юсупова и др. [2004], в конечном итоге – **особенности раскрытия минералов определяют пути повышения извлечения ценных компонентов руд на основе управления селективностью измельчения с сохранением геометрической целостности раскрываемых минералов и их структурно-химических характеристик; в) оптимизацию технологического процесса с учетом контрастности свойств разделения минералов – особенности неоднородности состава и свойств мономинеральных зерен (выявляются при комплексном минералогическом анализе анатомии индивидов и измельченных частиц), исследовании характера и направленности изменений тех или иных качеств минералов (ПИ в целом); г) определение последовательности технологических операций с целью достижения наиболее эффективных условий разделения минералов, с учетом размерного фактора и морфолого-структурных характеристик вновь формирующихся малых частиц; д) выделение при геолого-технологическом картировании типов и сортов ПИ с получением их всесторонней минералого-технологической характеристики, отражающей эволюцию типоморфных признаков, как минералов, так и в целом ПИ.** Следует также иметь в виду, что типоморфные признаки формируются и изменяются в природном и технологическом спектрах гранулометрии. В конечном итоге, это позволяет определять направленность тех или иных процессов минералообразования и их роль в формировании основных вещественно-технологических характеристик ПИ различного генезиса. *Исследуя морфологию, особенности конституции индивидов и агрегатов рудных минералов, сростаний с другими минералами важно выразить изменчивость и эволюцию их ТС и признаков с использованием комплекса современных методов анализа. Это позволит в конечном итоге глубже проникнуть в природу ТСМ, определить степень их контрастности при сепарации, возможности управления процессами обогащения, предложить методы селективного выделения минералов с использованием новых систем рудоподготовки и обогащения ПИ.* С вовлечением в обогащение тонкодисперсных видов МС изменяются привычные представления о ПИ. В технологических схемах все большую роль начинает играть размерный фактор сосуществующих минералов. С одной стороны, возрастают при этом требования к уровню минералогенетической информации по выявлению минеральных фаз, характера их взаимоотношений комплексом высокоразрешающих методов, с другой, – к выбору систем рудоподготовки и рациональных способов сепарации тонких (прежде всего наночастиц). *Объектом изучения становятся все более бедные руды, разнообразные отходы обогащения и металлургии со сложным вещественным составом, требующие и более тонких методов исследований, и принципиально новых технологических решений.* В связи с этим Ю.С. Кушпаренко предлагает проводить более глубокое изучение руд

в рамках *минералогической технологии* [12]: обеспечивать определение количественных значений параметров вещественного состава технологическими методами (химическими, основными и вспомогательными в различных сочетаниях обогатительными). Дополняя прямые минералогические наблюдения, предлагаемая методика позволяет получить полную информацию по раскрываемости тонкодисперсных минералов. С использованием гидравлической классификации минеральной смеси одной крупности (при равенстве и постоянстве плотностей) доказано, что разделение будет происходить только по плотности зерен, и количество осевшего в крупную фракцию каждого минерала при полном раскрытии их взаимных срастаний будет зависеть лишь от его плотности, а при неполном – от плотности и полноты раскрытия. На примере технологической оценки обогатимости Sn и Ta-Nb руд теоретически обоснованы условия гравитационного разделения минеральных смесей и предложены границы разделения руд разной крупности на гравитационных аппаратах, способы прогнозирования возможности разделения минеральных частиц, сростков тяжелых и легких минералов. Доказана эффективность тонкого грохочения в схемах обогащения руд с тяжелыми ценными тонковкрапленными минералами, позволяющего снизить их переизмельчение, нагрузки на мельницы, улучшить процесс обогащения шламового материала и флотацию мелких частиц (<40 мкм), выделенных гидравлической классификацией. Определены условия реализации тонкого грохочения (0,5-0,07 мм) на основе отсадки: достигнуто увеличение удельной производительности в 1,5-2 раза в сравнении с вибрационными грохотами, на порядок уменьшились износ сетки, расход электроэнергии в 3-4 раза, воды на 25-30%, уровень шума и вибрации. **В конечном итоге, контроль за изменением количественных значений минералогических параметров обогащения, в связи с использованием метода минералогической технологии, отражая особенности ОМ руд, позволяет более глубоко оценивать эволюцию ТСМ.**

ПРОБЛЕМА 4. К концу XX столетия ТМ вступила в период переработки тонковкрапленных видов ПИ. Продукты измельчения при этом достигают крупности 10 мкм и менее. Возникла необходимость совершенствования методов сепарации, а как следствие, исследования морфолого-конституционных особенностей обломочных малых частиц (ОМЧ) и выявления их роли при технологической переработке МС. При этом используются достижения кристаллофизики и кристаллохимии, как это убедительно показано в монографии В.И. Ревнивцева и др. [13], посвященной ТМ ОМЧ. Опираясь на новый этап в развитии энергетической кристаллохимии и геометрической кристаллографии (открытие высокопериодичных упорядоченных структур с запрещенной осью L_5 ; выявление нестабильности физико-химических свойств твердых веществ в тонких пленках – двумерных кристаллах – и малых объемах – малых частицах), подобно термодинамике, авторы рассматривают достижения неклассической кристаллографии на новой ступени более широких выводов и обобщений по вопросу неравновесного состояния твердых тел. Важно, что **ОМЧ, как разновидность фазового состояния вещества, родственного МЧ металлов и двумерным кристаллическим пленкам, относятся к неклассическим объектам минералогических исследований. За счет аномальности и нестабильности свойств, резко отличающихся от свойств минералов в массивном состоянии, ОМЧ являются особой фазой.** Авторы предлагают новый подход к изучению *технологической онтогенеза минералов (ТОМ)* и в массивных образцах: реакция минералов на внешние воздействия, прогнозирование изменчивости их физико-химических свойств, объяснение активности поверхности скола, аномальности свойств ОМЧ, взаимодействия минералов разного состава. Здесь важен кристаллофизический подход к оценке изменчивости свойств минералов с позиций кристаллографии – учения о симметрии, позволяющий устанавливать корреляционные связи между структурными и размерными параметрами минерала, с одной стороны, и границами изменчивости вторичных технологических свойств – с другой. Именно в этом и проявляется двойственная природа ТСМ, так как в технологическом процессе продолжается эволюция их генезиса, но с другими временными показателями [14]. **Симметрия творит явление – основной вывод классической кристаллографии, убедительно проявляющийся в морфолого-структурных преобразованиях системы малых объектов.** При этом искусственно наведенный за счет различных воздействий беспорядок, являющийся мощным аккумулятором избыточной энергии, создает ряд новых явлений – цепь событий на пути установления порядка. **1-й период – насыщенность структуры дефектами, совместно с ее аморфизацией** в диспергированных минералах, создающих существенные искажения симметрии → **2-й период – релаксация структуры** с повышением симметрии. Релаксация отличается дискретным характером: каждая ступень на пути к порядку выполняет роль точки бифуркации в процессе упорядочения и самоорганизации (*идет цепная реакция взаимодействия структурных единиц разной масштабности – от микроуровня стероэдров до макроуровня технологического процесса*). В частности, нами [22] показано, что при тонком измельчении железных руд заметно изменяются физические характеристики магнетитов различного генезиса: точки Кюри смещаются на 10-20⁰С, появляются новые фазы в матрице первичного минерала, маггемит, оксимангнетит), искажаются рентгенодифракционные спектры. Разрушение первичной доменной структуры кристаллов магнетита приводит к возрастанию величины коэрцитивной силы (H_C), что в свою очередь способствует возникновению магнитных флокул и засорению концентратов нерудными минералами (рис. 4). Удельная магнитная восприимчивость ОМЧ магнетита размером менее 20 мкм оказывается резко заниженной (E. Deen, J. Davis, 1941), что приводит к потере рудных компонентов при магнитной сепарации.



А

Б

Рис. 4. Флокулы ОМЧ ОФ МГОКа: А – крупные частицы кварца в концентрате размером 30-50 мкм, окруженные мелкими и тонкими частицами (20-3 мкм) магнетита; Б – частицы гематита и мартитизированного магнетита 20-30 мкм во флокулах хвостов, окруженные короной тонких частиц 3-5 мкм и менее ОМЧ кварца, эгирина и рудных сильно переизмельченных частиц. Увеличение 700

В нашей работе [15] также показано, что ИКС спектры магнетита не изменяются в зависимости от времени истирания пробы, а вид спектров, снятых от минералов сложного химического состава, особенно с добавочными анионными комплексами, заметно зависит от методики приготовления пробы. Это позволяет сделать вывод о влиянии концентрации свободных радикалов, возникающих при механическом истирании пробы, на изменчивость ИК-спектра [15].

В конечном итоге, ТМ ОМЧ дополняет и обогащает известные разделы общей минералогии, так как, в частности, например, в тектонических зонах рудообразования весьма значима роль измельченных активных фаз. В результате таких исследований во многом проясняется ряд вопросов природного генезиса: влияние тонкодисперсных фракций на процессы сегрегации руд, взаимосвязь изоморфизма и деформаций структуры, полиморфные превращения и двойникование как релаксация предельного уровня насыщения дефектоемкости, роль свободных радикалов в метасоматических процессах и др. Например, при исследовании уникальности поведения веществ малых объемов внутри микропор в структуре цеолитов. Здесь можно проследить аналогию со свойствами диспергированных минералов: в структуре обломочных индивидов, когда при механическом воздействии возникают предельные искажения структуры. При «мокро» измельчении возникают поры, каверны, каналы, внутри которых создаются условия для нестандартных химических превращений, обусловленных малыми объемами.

«Таким образом, аномальность свойств ОМЧ определяется целым рядом факторов, поддающихся выявлению, исследованию и измерению, а значит и управлению с помощью задаваемого набора факторов, позволяющих направленно влиять на ТС перерабатываемых минералов... Новые технологии для своего создания новых идей, новых взглядов, новой интерпретации экспериментальных данных» [13].

Дальнейшее развитие ТМ, несомненно, связано с физикой твердого тела и многими разделами металлургии и обогащения (различного вида сепарация, биотехнология, гидрометаллургия и флотация, химическое обогащение, фильтрация и др.). В то же время, технологические науки дают минералогии огромный материал по изменчивости и превращениям минералов, техногенным явлениям метасоматоза и онтогении, являясь аналогами природных реакций минералообразования.

ПРОБЛЕМА 5 тесно связана с предыдущей, ибо «...*минералогия, раскрывая тайны мельчайших минеральных индивидов и минеральных структур, не только далеко раздвинет границы минерального мира, но и внесет весомый вклад в познание ультрадисперсного состояния вещества*» [7]. Определяя тенденции развития минералогии на современном этапе, Н.П. Юшкин (1999) 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. «Расширяются и расплываются границы представлений о дисперсных объектах. К ним сегодня относятся не только фазовоиндивидуализированные 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» [16]. Наиболее ярко состояние проблемы подчеркнул М. Хочелла [17] – «нанонаука это сравнительно новая область исследования, которая в основном затрагивает проблемы обнаружения и изучения свойств вещества размером 1-100 нанометров, так называемой наношкалы. Механические, электрические, термодинамические и другие свойства сильно изменяются, по мере того как физические размеры вещества входят в наношкалу, и исследователи в этой сфере только начинают систематизировать и понимать изменения свойств в этой расплывчатой области между классической (массивной) и квантовой областями». Чтобы понять особое значение мельчайших минеральных индивидов субмикронной величины и ввести понятие микроминералогии как автономного направления, связанного с особым микроиндивидным составляющим минерального вещества, потребовалось значительное время. 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, Р.И. Конева, В.И. Ревнивцева, В.А. Чантурии и многих др. сформулированы основные положения микроминералогии, свидетельствующие о необходимости учитывать и отражать их при характеристике минералогенетических особенностей различных геологических объектов. Об этом уже появилось достаточно много интересной информации в литературе.

Совершенно очевидно, что при изучении и оценке тонкодисперсного МС новые возможности открываются перед ТМ. В развитии ЕГТС важен учет иерархической систематики дискретного состояния вещества [18] в ряду образований: *минерал* → *микроминерал* → *квазикристаллы* → *фуллерены* → *аморфное вещество* → *коллоиды* → *наночастицы* → *кластеры*. Это позволяет по-новому подойти к минералоготехнологической оценке комплексности, экологичности ПИ и отходов, разработке нестандартных методик их оценки, технологии добычи и обогащения; обеспечить разработку экономо-экологических технологий получения новых нетрадиционных видов сырья (цеолиты, сапонит, полевые шпаты, дистен, гранаты, шунгит и др.), постоянно расширяя области их применения. Здесь просматриваются новые подходы:

– с вовлечением в обогащение тонкодисперсных видов МС (труднообогащаемые руды, нерудные ПИ, индустриальные минералы, разнообразные отходы) изменяется привычное представление о ПИ. В технологических схемах все большую роль начинает играть размерный фактор сосуществующих минералов. С одной стороны, возрастают при этом требования к уровню минералогенетической информации по выявлению минеральных фаз, характера их взаимоотношений комплексом высокоразрешающих методов, с другой, – к выбору систем рудоподготовки и рациональных способов сепарации тонких, прежде всего, наночастиц. ***Наноразмерные технологии предполагают изучение и внедрение механизмов извлечения ценных компонент на молекулярном, атомарном, электронном уровнях, когда появляется возможность управлять процессами на уровне формирования ПИ*** [8, 17, 19, 20 и др];

– выявление причин аномального поведения и дискретной изменчивости свойств ОМЧ;

– инверсии их активной фазы в пассивную при достижении критических значений размерных, структурных и временных параметров, позволяющих создавать новые технологические операции, вызывающих как активацию, так и необходимую в ряде случаев пассивацию минеральной шихты: например, при транспортировке или сушке сыпучих материалов [13];

– исследования эволюции ТСМ и поведения техногенных фаз свидетельствуют о двух основных механизмах изменений – полиморфном и изоморфном [21]. Наиболее четко оба механизма превращений противопоставляются в техногенезе. При этом полиморфный механизм превращений представляет собой не химические, а симметричные реакции минералов. В случае формирования ТСМ за счет полиморфных превращений энергия тратится на разупорядочение решетки, и структура превращается в низкосимметричную фазу, как это было показано нами [22] для морфотропного ряда оксидов для Fe руд. Авторы подчеркивают – с понижением симметрии возрастают примесная емкость структуры и реакционная активность полиморфных фаз. На примерах рядов сульфидов и оксидов они показывают, что полиморфные модификации существенно различаются по своим физическим свойствам: плотности, твердости, оптическим характеристикам. Это позволяет фиксировать при измельчении руд на ГОКах превращения: магнетит – гематит, сфалерит – вюрцит и др. Механизм нормального изоморфизма не связан с резким изменением в энергетике структур, предопределяя путь монотонного изменения физических свойств минералов. Нередко в макрокристаллах развит наноблочный изоморфизм [23]. Он образует новый мир структур и морфологически упорядоченных объектов, находящихся в дальнейшем 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 наноструктурах аморфных веществ и др.). Конституция и форма наноиндивидов определяется только внутренними факторами и практически не зависит от внешних воздействий. Этот вид изоморфизма важен при решении проблем полного извлечения полезных компонентов из руд, получения новых видов минерального сырья, при оценке показателей обогащения руд различных генетических типов. Несомненно, выбор режимов обогащения руд различных генетических типов предопределяют оба явления. Практика работы ГОКов также показывает, что на эффективность процессов сепарации многих руд может оказывать отрицательное влияние любой минерал (или группа минералов), даже в

небольшом количестве, ухудшая показатели обогащения [22, 24 и др.]. Например, появление слоистых силикатов (талк, хлорит, слюды) от десятых долей до первых процентов отрицательно сказывается на флотационных свойствах рудных минералов из скарновых W-Mo руд. В Fe-P рудах появление 0,5-1,5% гипса подавляет флотацию апатита и т.д.

– в технологических операциях существенно возрастает осознание роли поверхностей или приповерхностной области S наноминерального вещества [8]. Высокая степень поверхности (площади поверхности) обеспечивает весьма специфические характеристики сепарируемым минералам, которые и обуславливают непредсказуемый потенциал нанотехнологиям, в т.ч. и процессах обогащения. Это связано с проявлением необычных физических, химических и механических свойств наноминералов, изменяющих кинетические и динамические характеристики. Для нанообъектов характерно другое время протекания процессов и явлений: в силу особых физико-химических и геометрических характеристик возрастает «быстродействие». Прослеживаются [8] временная зависимость параметров системы частиц и случайный характер их образования предполагает наличие дуализма наносистем;

– разработаны новые технологии извлечения тонкого золота на основе нанотехнологий [8, 25 и др.]. Б.А. Осташенко показана, в отличие от традиционного технологического подхода, возможность создания поверхностного заряда у минералов, сопутствующих Au в концентрате, что послужило основой для разработки способа его термоэлектрической сепарации. В процессе эксперимента выяснилось, что равновесие на поверхности минерала, обусловленное адсорбцией OH^- , H^+ , O^- , CO^- , C^- , можно сдвинуть в ту или иную сторону самыми различными способами, в том числе нагреванием, облучением и др. Масспектроскопические и манометрические исследования выявили, что поверхность минералов шлиха (концентрата) в обычных условиях покрыта ионами OH^- . В результате нагревания они уходят с поверхности силикатов при 220°C и оксидов при 400°C [8]. Т.к. OH^- -группы имеют отрицательный заряд, то с их удалением поверхность минеральной частицы становится заряженной положительно. При этом на поверхности образуется нескомпенсированный заряд Q_s . У золота и алмаза при этой температуре величина заряда близка к нулю. Извлечению частиц минерала размером 1-5 мкм мелких и тонких классов концентрата в экспериментах составило 99-100%. Б.А. Осташенко разработана также технологическая схема гравитационного обогащения Au класса -200+40 мкм. Использование при этом метода «изометризации» пластинчатого Au (с образованием валиков по краям золотин и формированием тороидальных частиц) позволило повысить его извлекаемость в концентрат на 25%. Ему же удалось повысить качество лейкоксенового концентрата с 50-52% до 80,82% TiO_2 без изменения основных режимов и оборудования за счет изменения магнитной восприимчивости минерала при ультразвуковом облучении. Особенности минерального состава руд позволяют выбирать наиболее оптимальную методику для определения в рудах истинного содержания благородных металлов и на этой основе разрабатывать рациональную технологию обогащения;

– разработаны 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 адсорбифизических методах сепарации, базирующихся на исследованиях кристаллохимических и кристаллофизических процессов в гетерогенных системах под влиянием различных воздействий [8];

– 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 (МЭМИ)** при переработке упорных золотосодержащих сульфидных руд и продуктов обогащения и др. На примере промышленных минералов Карелии сотрудниками Института геологии Петрозаводска [26] разработана 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 удаления газовой-жидких включений при термообработке, СВЧ-излучением, воздействием мощных электромагнитных импульсов и радиационным излучением; – технологами предложены самые разнообразные направленные изменения физико-химических свойств минералов в процессах обогащения ПИ. При направленном изменении свойств минералов на макро-, микро – и наноуровне возможно воздействовать как на сам минерал, так и среду. При различных видах энергетического воздействия с учетом типоморфных особенностей ПИ, возможно, направленно преобразовать их ТС, выбрать оптимальный способ модификации, изменив целенаправленно контрастность сепарируемых минералов и оптимизировав схему обогащения [23].

В заключении поднятой сложной и во многом спорной проблемы следует подчеркнуть – будущее ТМ – в развитии нанотехнологий различных видов тонкодисперсного МС.

ПРОБЛЕМА 6. Роль технологической минералогии в решении задач комплексного использования минерального сырья при добыче и переработке была детально рассмотрена на заседании комиссии ТМ в Петрозаводске в 2007 г. [27]. При этом акцентировалось внимание на комплексной переработке различных видов МС. Нами *особо подчеркивалось, что ТМ ПИ следует рассматривать по целому ряду направлений как систему оценки их комплексности (рис. 5).*

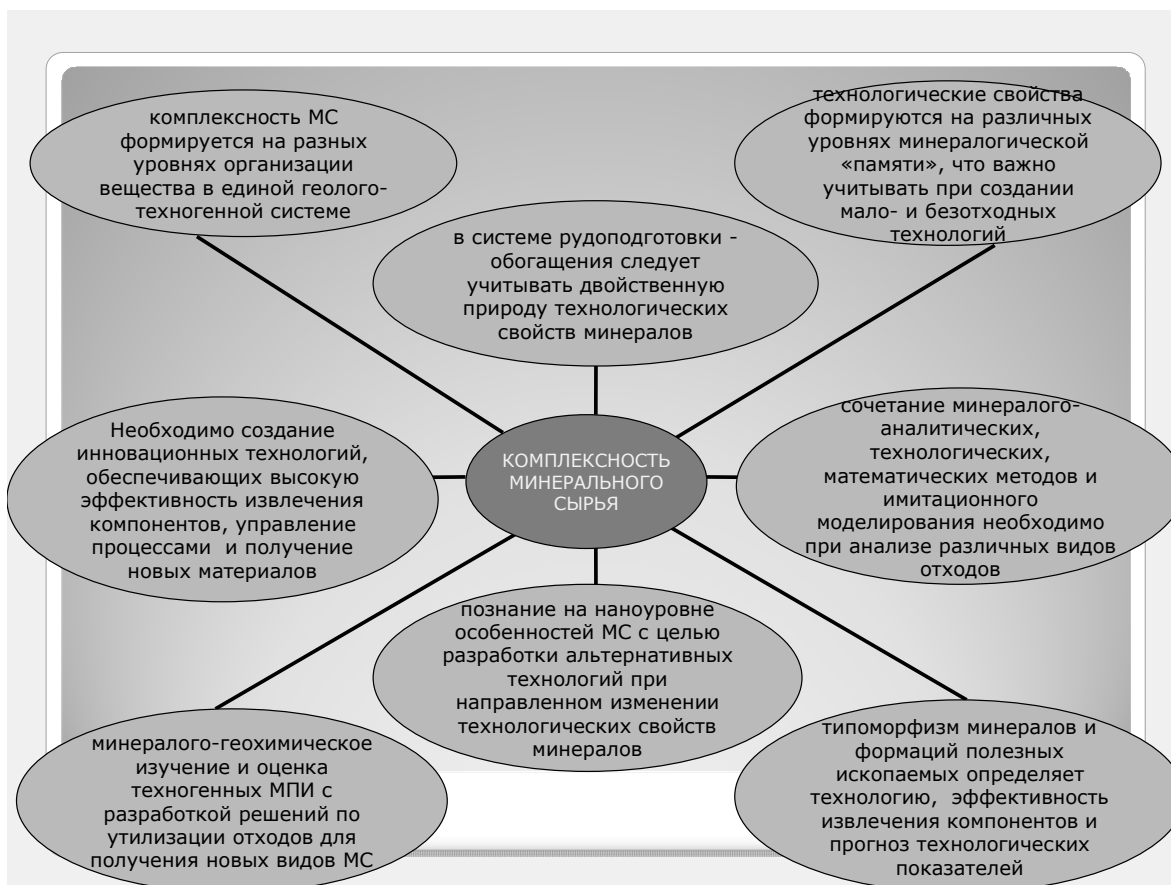


Рис. 5. Принципы системы комплексности минерального сырья

Это связано: с разработкой научно-теоретических принципов комплексности МС; выявлением типоморфных признаков, определяющих природу и изменчивость ТСМ в связи с их переработкой; с внедрением комплекса минералого-технологических и физико-химических методов анализа; выявлением и созданием новых видов МС с учетом наноминералогии и разработкой альтернативных технологий; минералого-геохимическим изучением техногенных МПИ, с разработкой комплексных решений по утилизации отходов для получения новых видов МС.

На семинаре были рассмотрены наиболее актуальные вопросы системы ТМ в связи с комплексным освоением МС по следующим направлениям:

- фундаментальные и прикладные исследования при решении проблем ТМ в процессе изучения ПИ как основы оценки их комплексности,
- роль ТМ в решении задач комплексного использования различных видов МС в разных регионах РФ с учетом экологических последствий в окружающей среде,
- возможности современных методов ТМ при оценке МС,
- проблемы комплексной переработки природного МС,
- исследование структурных изменений минералов в процессах технологической переработки.

Особо подчеркивалось, что **КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МС – ЭТО ПУТЬ К ИННОВАЦИОННЫМ РЕШЕНИЯМ**. В частности, В.В. Щипцов, рассматривая роль ТМ при оценке многоцелевого использования индустриальных минералов Республики Карелия, отмечал, что – **комплексное использование сырья в зависимости от конкретной цели можно рассматривать обособленно на любой стадии производства готовой продукции (не только на завершающей стадии). Развитие комплексного использования МС позволяет экономически эффективно вовлекать в эксплуатацию более бедные по содержанию ценных компонентов руды и, таким образом, существенно расширяет ресурсы недр, непосредственно оказывает влияние на параметры всех стадий производства, включая геологоразведочные и добычные работы. Применительно к недрам Земли экономически оптимальный уровень комплексного использования сырья можно выявить только в рамках системного подхода, при учете всех стадий производства при междисциплинарном или мультидисциплинарном подходе.** Как показала Т.З. Лыгина [27], очень важны сегодня инновационные проекты при комплексной переработке неметаллических ПИ (НПИ). Ею предложена стратегия нового концептуального подхода к минералого-технологическому изучению НПИ (по блокам), обеспечиваемому: 1) высоким уровнем технологической оценки руд на разных стадиях ГРР (блок А); 2) управлением качества передела руд – формированием технологических типов сырья с

заданными свойствами и усовершенствованием процессов обогащения с помощью распознавания устойчивых минеральных ассоциаций – природных типов по экспрессно определяемым параметрам (блок Б); 3) направленным изменением ТСМ, горных пород и руд путем разработки рациональных схем извлечения ПИ, их модификации и облагораживания (блок С). На рис. 6 приведена одна из схем, предложенной стратегии. Она отражает систему, с помощью которой улучшаются физико-химические характеристики сырья при различных способах переработки: *механоактивация и модификация в энергонапряженном режиме, электрохимическая активация (применение активированной воды и электрокинетического обезвоживания) пульсационное, лазерное обогащение, крио-термическое воздействие* и др. За счет воздействий происходят существенные изменения в структуре всех минеральных фаз породы (перестройка структуры, дефекты, изменение цвета и т. д.), что существенно отражается на их полезных свойствах, обуславливая расширение сфер использования МС.



Рис. 6. Перспективные технологии комплексной переработки НПИ [27]

Несомненно, новая методология комплексной оценки НПИ, в том числе и техногенных, обеспечивает рациональное комплексирование минералогических исследований и перспективных технологий их переработки, повышают качество ГРП, полнее используя богатства недр и увеличивает их инвестиционную привлекательность.

Весьма значима сегодня возможность комплексного использования титаноксидного сырья Республики Коми (Ярегское, Пижемское месторождения). Здесь большое значение имеют исследования в области создания нанофаз диоксида Тi для решения многих практических задач (фотокатализаторы в самоочищающихся покрытиях, для очистки воды и воздуха от токсических органических веществ и др.). С вовлечением в технологические схемы промышленных наноминералов, как нового типа сырья, О.Б. Котовой и А.В. Понарядовым [28] рассмотрены механизмы формирования наноразмерных образований на примере тубулярных наноструктур анатаза (рис. 7). Нанотрубки синтезируются гидротермическим методом. При щелочном воздействии (рис. 7-2) на частицы оксида Тi происходит структурная перестройка поверхности с образованием тубулярных наноразмерных индивидов.

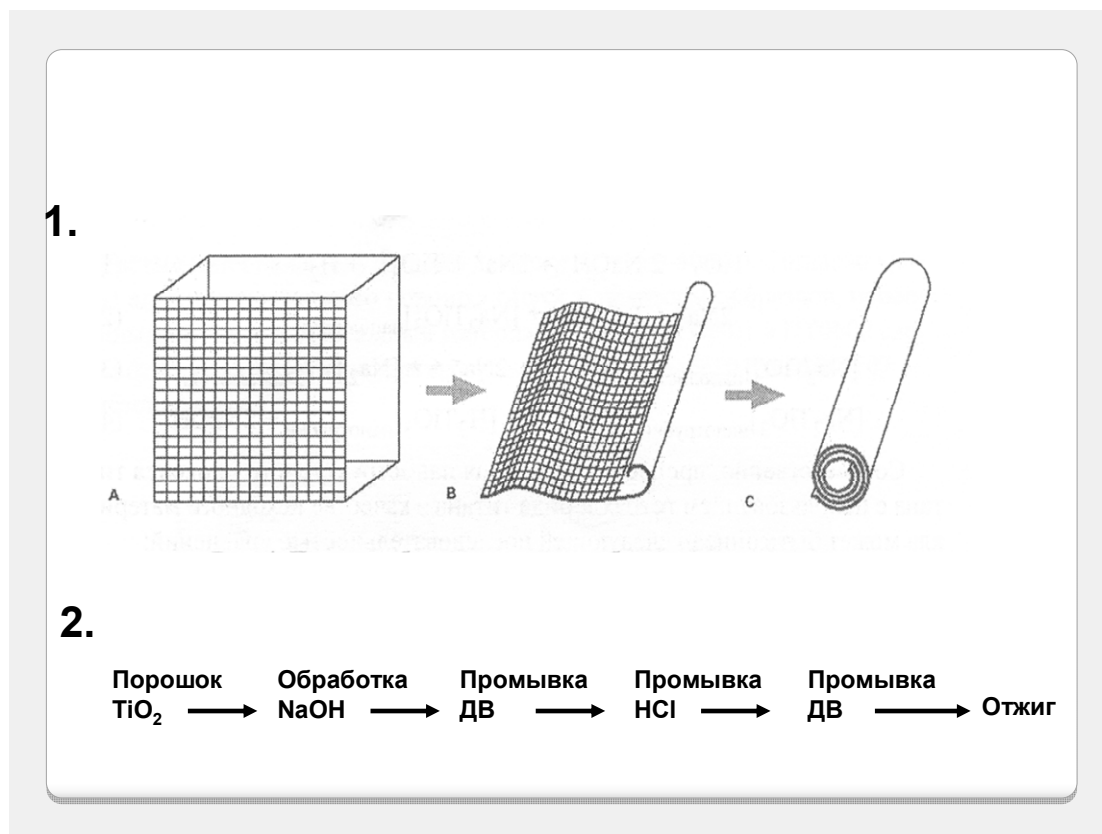


Рис. 7. Процесс образования нанотрубок диоксида титана (1) и схема его синтеза (2). Построено по материалам работы [28].

Обратный процесс перестройки трехмерного кристалла в одномерную наноструктурную систему связан с фазовыми переходами: диоксид титана анатазной или рутильной модификации (3D – рис 7,1A) → в щелочном растворе расслаивается в листы (2D – рис. 7,1B) → за счет оборванных связей листы сворачиваются в нанотрубки одномерной структуры (1D – рис 7,1C). Процесс перехода 2D → 1D может приводить к формированию двух видов нанотрубок: концентрических и спиральных – неконцентрических (Wang et al., 2002). В целом особенности наноструктурной перестройки определяют физико-химические свойства поверхности, а нановключения на поверхности – условия протекания реакций окисления простых молекул газовой фазы. Это в конечном варианте получает конкретное практическое применение.

Определяя в целом актуальность проблемы комплексного использования МС, следует еще раз подчеркнуть необходимость применения методов и методологии ТМ на базе принципов системного подхода к минералого-технологическим оценкам природного и техногенного МС с учетом экологии окружающей среды.

ПРОБЛЕМА 7. Эта проблема нашла воплощение в развитии основ школы ВИМСа [29] по научному обеспечению минерально-сырьевой базы страны – непрерывное (от самых ранних ГРР до передачи МПИ в эксплуатацию) и комплексное (геология → аналитика → минералогия → технология → экономика) изучение минеральных образований. В основу системы были положены разработки методических рекомендаций по прогнозированию технологических свойств на ранних стадиях изучения недр с использованием имеющейся геологической информации, текстурно-структурных и минералогических характеристик. Используя результаты геофизических, геохимических работ и шлихового опробования, минералоги и технологи обеспечивают достаточно полную характеристику вещественного состава оруденения, идентификацию минералов-концентраторов, определение их гранулометрии; прогнозную оценку комплексности; выявление экологически вредных компонентов; принципиальную возможность применения основных методов механического обогащения при сопоставлении различий в физических свойствах минералов ценных компонентов и породообразующих; установления прогнозных качественно-количественных показателей обогащения с использованием метода аналогии по обогащению руд данного геолого-промышленного типа в промышленных условиях. В целом, на ранних стадиях геологического изучения недр система включает следующую последовательность работ: прогнозирование масштабов месторождения и качества ПИ при предварительном отнесении рудного объекта к конкретному генетическому (формационному) типу по геологическим и геолого-промышленным классификациям) → возможное прогнозирование технологических показателей при получении первых сведений о вещественном составе потенциального ПИ (содержание элементов, номенклатура основных рудных минералов) на основе БД по имеющимся математическим моделям (с использованием уравнений множественной регрессии, выведенных при ГТК аналогичных объектов) →

прогнозная технологическая оценка по данным ГТК новых горизонтов, флангов и участков известных или новых аналогичного состава месторождений (при ГТК накапливается большое количество значений параметров вещественного состава, а также технологических, технолого-экономических критериев, характеризующих свойства руды, в т.ч. суммарная абсолютная и относительная потенциальная ценность – для характеристики руды до начала технологических экспериментов и извлечение ценных компонентов, комплексность использования, извлекаемая ценность, относительная измельчаемость руды) → **технологическая оценка с достаточной степенью достоверности приемами и методами ТМ на более поздних стадиях геологического изучения недр прогнозных ресурсов категории P_1 и запасов категории C_2 → технологическая оценка руды при наличии информации о контрастности** (по разделяющим параметрам вещественного состава – плотности, содержанию тех или иных элементов, активности) **не по отдельным минералам или рудным комплексам, а по кускам руды «машинной» крупности** (крупнее 3-8 мм).

Таким образом, на ранних стадиях ГРР изучения недр по мере накопления информации с учетом стадийности обогатимость руд прогнозируется: 1) путем соотнесения генетических данных потенциального месторождения с основными их геолого-промышленными типами, 2) по элементному составу потенциальных руд и ожидаемой номенклатуре ценных минералов с использованием БД, 3) на основе состава и гранулометрической характеристики ценных минералов.

В исследованиях ВИМСа [30] показана высокая эффективность ТМ при экспрессной оценке руд на ранних стадиях ГРР до обоснования схем их переработки на основе глубокого и всестороннего знания вещественного состава в широком понимании. Причем, ведущая роль в комплексе принадлежит методам количественного фазового анализа (*чувствительных, достоверных, высокопроизводительных*), способных обеспечить минералого-технологическое картирование, *экспрессных* – для выполнения оперативного контроля технологического процесса, оценки качества конечных продуктов, в т.ч. попутно получаемых (кварц, полевой шпат, слюды и т.д.). По рекомендациям НСОММИ разработаны и внедрены в практику комплексы экспресс-методов для различных видов ПИ, а также экспрессная технологическая оценка путем поиска аналога технологической пробы по минеральному составу исследуемой руды. Так, для оловянных руд разработана на основе банка данных автоматизированная система экспрессного прогнозирования технологических схем (как прототип для различных видов МС). Это позволяет частично заменить экспериментальные работы по созданию технологии обогащения руд (А.Н. Еремеев, Н.Н. Смирнова, В.П. Борискин). Для прогнозной оценки обогатимости руд на ранних стадиях ГРР (поиски, оценка), МТК месторождений, технико-экономических расчетов при различных вариантах их отработки (Г.В. Остроумов, Л.А. Грекулова, В.А. Рубцов) перспективны математические модели (зависимости с помощью расчетов на ЭВМ показателей извлечения полезных компонентов в технологические продукты от содержаний значимых параметров вещественного состава руд). Опыт многолетних минералого-технологических исследований ВИМСа обобщен в методических указаниях «Виды и последовательность минералогических исследований для обеспечения технологических работ» (В.П. Борискин, Г.А. Сидоренко, Л.К. Пожарицкая и др., 1990). Эти работы получили дальнейшее развитие и в разработках других организаций.

Среди проблем ТМ, решаемых на современном ГОКе сегодня, необходимо выделить, прежде всего, такие:

- усреднение руд и технологический прогноз,
- система контроля за процессом рудоподготовки и обогащения,
- совершенствование рудоподготовки и технологической схемы обогащения руд,
- рациональное, комплексное использование МС и охрана окружающей среды.

Нами подробно рассмотрено состояние этой проблемы для железных руд в специальной работе [22]. Несомненно, кроме поднятых вопросов много других. Несомненно, различные аспекты дальнейшего их развития будут способствовать интенсификации использования природных ресурсов различных регионов РФ.

ПРОБЛЕМА 8. Эта проблема специально обсуждалась на Всероссийском семинаре «Геолого-технологическое моделирование месторождений» 6-8 июня 1992 г. в г. Санкт-Петербурге [31]. Всесторонне были рассмотрены вопросы теории и практики геолого-технологической оценки руд месторождений разных генетических типов (в том числе и техногенных). И сегодня эта проблема остается актуальной, так как развитие системы геолого-технологического моделирования (ГТМ) при картировании МПИ различных генетических типов ПИ весьма значимо на современном этапе исследований в ТМ. Ведь *пространственная* (объемная) *модель* отражает закономерное изменение разнообразных технологических характеристик и свойств ПИ, выраженных в виде показателей их обогащения, в объеме рудных тел, минералого-технологических типов и сортов руд, с помощью методов математической статистики. Для каждой стадии геолого-разведочных работ рассматриваются разные способы моделирования [24]: *для ранних стадий* – на основе генетических связей между генетической природой ПИ и их технологическими свойствами, *для поздних* – по выявленным количественным закономерностям зависимости показателей переработки от вещественного состава ПИ в форме таблиц, графиков, уравнений, изолиний на геологическом графике в объеме рудных тел. Обычно ГТМ завершает ГТК и является составной частью экономической модели предприятия, как подчеркивалось на семинаре (Курманаев Р.Г. и др.). Семинар показал, что в проблеме ГТМ используются разные подходы и методы. Нами [32] проблема ГТМ рассмотрена на примере комплексных железных руд КовдорГОКа. Внедрение ЭВМ и компьютерной техники в практику ГРР, несомненно, обусловило значимый прогресс в повышении эффективности и достоверности обработки и оценки получаемой геологической,

минералогической, геохимической, технологической и других информации. Использование этой информации, опирающейся на различного рода модели природных геологических объектов особенно важно при геолого-промышленной оценке ПИ современных горнорудных предприятий. *Специфика получаемой геолого-технологической информации состоит в том, что она отвечает различным методологическим признакам.* **Вся геологическая информация** (о геолого-структурной позиции месторождения и его литолого-фациальной природе, о характере минерало-геохимической зональности, парагенетических ассоциациях минералов, особенностях онтогении и конституции минеральных тел и собственно минералов и др.), **определяющая особенности вещественного состава руды и пространственно-временные закономерности его изменения, ретроспективна и опирается, как правило, на топоминералогическую модель минералообразования. Информация о показателях обогащения руды, полученная при технологическом эксперименте, отражает динамику преобразования характеристик вещественного состава при рудоподготовке** (дробление, измельчение – раскрытие минеральных фаз) **и разделении измельченного материала при сепарации различными методами с концентрацией полезных минералов (компонентов) руды и сбросом отходов (хвостов, промпродуктов).** Совмещение информации ретроспективной геолого-генетической модели месторождения с динамической вещественно-технологической в единую ГТМ связано с определенными трудностями. Важно ввести в такую модель **типоморфные геолого-структурные и минерало-технологические признаки**, на основе которых может быть дана геолого-технологическая оценка ПИ, обеспечен прогноз обогатимости и управление технологическим режимом в условиях ГОКа.

Опираясь на теоретические основы ТМ [33], следует иметь в виду, что для ГТМ важно учитывать следующие положения [32]:

– *двойкую природу ТСМ*: с одной стороны, они определяются взаимосвязью с генезисом, конституцией и морфологией минералов; с другой – изменением морфологии, конституции и, как следствие, свойств при рудоподготовке и обогащении. Поэтому, многие первичные свойства минералов (руд) могут быть изменены существенно за счет преобразования их природной гранулометрии – переизмельчения, ошламования и флокуляции измельченных частиц, глубоких структурно-фазовых преобразований и др.;

– *ТСМ формируются в сложной природно-техногенной системе*: месторождение → фабрика → хвостохранилище, в которой под действием техногенных процессов происходят изменения первичной концентрации и рассеяния полезных компонентов. Учитывая, что поведение минералов в этой системе подчиняется вероятностно-детерминированным процессам, возможно широкое применение ЭВМ для оценки, прогноза обогатимости и управления технологическими процессами на основе ГТМ месторождения:

– *в основе моделирования – ГТК месторождения, опирающееся на типоморфные признаки обогатимости минералов (руд)*. При этом программа для ЭВМ позволяет достаточно корректно увязать параметры вещественного состава (типоморфные признаки) и показатели обогащения руд в статистическую модель прогноза;

– *завершающий этап модели должен учитывать экономическую и экологическую оценку всех видов продуктов, в том числе отходов, в связи с мало- и безотходной технологией*. Попутные продукты горнорудного производства нередко являются качественно новым видом сырья, позволяющим получать материалы с новыми свойствами, значимо снижать стоимость основной продукции.

Конечным результатом ГТК является пространственно – цифровая модель месторождения, которая на основе его геолого-структурной позиции с максимальной достоверностью отражала бы все особенности изменения вещественного состава руд, проявляющиеся в их технологической неоднородности. При этом всю необходимую информацию геолог получает на основе анализа его модели. Важным является тот факт, что вся геолого-технологическая информация имеет точную координатную привязку. Это относится как к этапу полевого отбора минералогических и технологических проб, так и характеристикам и свойствам объекта, которые выявляются и оцениваются в результате обработки и интерпретации всего комплекса исходных данных.

На основе геолого-технологической модели, как это четко показывают наши исследования [22, 32] по бадделеит-апатит-магнетитовым рудам Ковдора, можно управлять технологией процесса обогащения с учетом рационального и комплексного использования ПИ. Как отмечалось выше, модель строится на системе ретроспективного комплексного минералогического исследования и экспериментальных технологических данных. В ее основу положены следующие принципы:

– *все минералы – продукт единых, взаимосвязанных процессов, поэтому их изучение проводится комплексно, с учетом основных минеральных ассоциаций;*

– *изменения в физико-химическом состоянии минералогической системы фиксируются и изучаются на разных уровнях: месторождение (зональность) → руда (рудное тело) → минерал (агрегат – индивид);*

– *пространственное распределение парагенетических ассоциаций минералов, контролируемых структурными факторами (апатитизация руд приурочена к линейным разрывным нарушениям, а карбонатизация – к кольцевым, предопределяя полярность протекания этих процессов на месторождении);*

– *онтогенетический подход к минерало-технологической оценке руд, позволяющий: установить последовательность выделения и характер взаимоотношения минералов, исследовать закономерности развития процессов минералообразования, а в конечном итоге оценить эффективность раскрытия минералов при обогащении и охарактеризовать контрастность их технологических свойств;*

– типоморфные минералогическо-генетические факторы, определяющие обогатимость, являются основными критериями ГТК; б – при рудоподготовке и обогащении природно-обусловленные технологические свойства минералов (руд) нередко существенно изменяются (не все в одинаковой степени), поэтому, проникая в суть закономерностей, формирующих технологические свойства руд и связь их с конституцией минералов, очень важно придать последней четкий физический смысл.

Сложная и многостадийная генетическая природа руд, а также существенное изменение свойств при рудоподготовке и обогащении обусловили в целом различия между минералогическими сортами 3-х главных компонентов (магнетита, апатита, бадделлита), что осложняет усреднение руд, технологический прогноз и систему контроля за процессами рудоподготовки и обогащения. Внедрение ЭВМ (алгоритм геолого-технологического моделирования месторождения – рис. 8) [32] обеспечивает объединение геолого-технологических планов в единую модель с привлечением дополнительных характеристик руды: содержания Fe, P₂O₅, S и др. Геолого-технологические планы по каждому из видов сырья в совокупности со вспомогательной информацией по руде составляют важнейший информационный модуль (базу данных), по которому ЭВМ строит образ цифровой модели месторождения. Остальные модули и блоки носят вспомогательный, обслуживающий характер на основе расчетных показателей. Так, модуль прогноза и управления технологическими процессами обеспечивает расчет соотношения технологических сортов руд с учетом промышленно-важных компонентов для усреднения руды в цикле *карьер* → *усреднительный склад* → *усреднение на ОФ* с целью достижения рационального режима технологического оборудования и стабилизации показателей переработки. Модуль контроля за процессами рудоподготовки и обогащения позволяет фиксировать и корректировать нарушения технологического процесса, вызванные объективными (изменение природных условий, износ оборудования, переход на новые реагенты и пр.) и субъективными факторами (нарушение технологических режимов, несоблюдение направлений добычных работ и пр.).

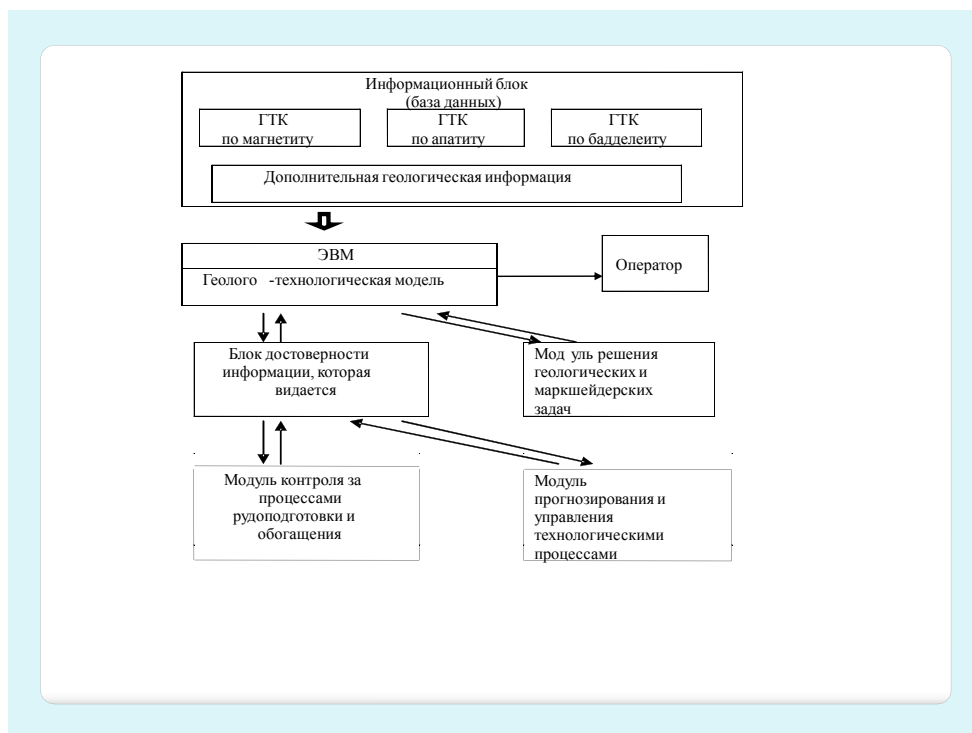


Рис.8. Схема алгоритма геолого-технологического моделирования комплексных магнетитовых руд Ковдорского ГОКа

Модуль решения геологических задач обеспечивает автоматизированное выполнение рутинной работы: подсчет запасов, построение погоризонтных геолого-маркшейдерских планов, ведение геологической документации и т. д. Вся цифровая расчетная информация проходит через блок оценки ее достоверности, что позволит оператору оценить ее значимость и ввести необходимые коррективы.

В условиях рыночной экономики ГТМ приобретает особое значение для всех стадий ГРР, т.к. позволяет оценить перспективы действующих предприятий, обоснованно выбрать объект для разведки и последующей разработки [24]. Необходимо подчеркнуть, что результаты ГТК месторождений сегодня используются для решения широкого круга задач: рационализации работы горных, геологических и технологических служб ГОКов в связи с усреднением руд перед подачей на ОФ, оценки сырьевой базы комбината (в том числе комплексности), разработки автоматизированных систем управления производством (АСУП). На основе последней, с помощью ГТК, можно проводить разные виды оперативного и перспективного планирования, контролировать работу ГОКов. Это требует постоянного совершенствования системы ГТК.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ларичкин Ф.Д.* Методические особенности оценки экономической эффективности комплексного использования минерального сырья // Север и рынок. 2000. № 2. С. 92-99.
2. *Овчинников Л.Н.* Прикладная геохимия. М.: Недра, 1990. 248 с.
3. *Юргенсон Г.А.* Проблемы минералогии геотехногенеза // Роль минералогических исследований в решении экологических проблем (теория, практика, перспективы развития). М.: РИЦ ВИМСа. С. 200-202.
4. Новые минерально-сырьевые металлургические комплексы России (отв. ред. Г.А. Машковцев) М.: ВИМС, 2007. 44 с.
5. *Пирогов Б.И.* Геолого-минералогические факторы, определяющие обогатимость железистых кварцитов. М.: Недра, 1969. 240 с.
6. *Барский Л.А., Данильченко Л.М.* Обогащаемость минеральных комплексов. М.: Недра, 1977. 239 с.
7. *Юшкин Н.П.* Наноминералогия: объекты, функции, перспективы // Минералогическое общество и минералогическая наука на пороге XXI века. СПб.: Мин. об-во при РАН, 1999. 20 с.
8. *Котова О.Б.* Поверхностные процессы в тонкодисперсных минеральных системах. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 194 с.
9. *Сидоренко Г.А.* Современный фазовый анализ как средство оценки качества и обоснования путей технологической переработки минерального сырья // Обогащение руд. 1996. №1. С. 32-35.
10. *Ожогина Е.Г., Рогожин А.А.* Применение комплекса минералого-аналитических методов для технологической оценки руд черных и цветных металлов // Разведка и охрана недр. 2005. №4. С. 33-36.
11. *Григорьев Д.П.* Позиции онтогении минералов // ЗВМО. 1978. Ч. 107. В. 4. С. 407-415.
12. *Куштаренко Ю.С.* Минералогическая технология – новое направление изучения вещественного состава минерального сырья. М.: РИЦ ВИМСа, 1997. 40 с.
13. *Ревнивцев В.И., Доливо-Добровольская Г.И., Владимиров П.С.* Технологическая минералогия обломочных малых частиц. СПб.: Наука, 1992. 248 с.
14. *Владимиров П.С., Доливо-Добровольская Г.И.* Роль малых частиц при технологической переработке минерального сырья // ЗВМО. Ч.115. Вып. 2. 1986. С. 166-172.
15. *Пирогов Б.И., Холошин И.В.* Инфракрасные спектры поглощения магнетита и их прикладное значение // Минерал. журн. 1989. № «. С. 73-80.
16. *Юшкин Н.П., Ракин В.И.* Микро– и нанодисперсные структуры минерального вещества // Сыктывкар: Геопринт, 1999. 216 с.
17. *Конеев Р.И.* Наноминералогия золота эпитеpmальных месторождений Чаткало-Кураминского региона (Узбекистан). СПб.: DELTA, 2006. 206 с.
18. *Турсебеков 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.
19. Направленное изменение физико-химических свойств минералов в процессах обогащения полезных ископаемых // Плаксинские чтения. М.: Альтекс, 2003, 145 с.
20. Современные методы оценки технологических свойств труднообогатимого и нетрадиционного минерального сырья благородных металлов и алмазов и прогрессивные технологии их переработки // Плаксинские чтения (Иркутск). М.: Альтекс, 2004. 232 с.
21. *Дементьева Г.И., Смирнов Ю.М.* Изоморфные и полиморфные превращения минералов в техногенезе // Обогащение руд. № 3. 1988. С. 34-37.
22. *Пирогов Б.И., Поротов Г.С., Холошин И.В., Тарасенко В.Н.* Технологическая минералогия железных руд. Л.: Наука, 1988. 304 с.
23. *Пирогов Б.И.* От наноминералогии полезных ископаемых к нанотехнологиям их переработки // Минералогическая интервенция в микро– и наномир. Сыктывкар: Геопринт, 2009. С. 58-61.
24. *Изоитко В.М.* Технологическая минералогия и оценка руд. СПб.: Наука, 1997. 582 с.
25. *Остащенко Б.А.* Направленное изменение технологических свойств минералов // Автореф. докт. дис. Сыктывкар: ИГ Коми науч. Центра УрО РАН, 1998. 43 с.
26. *Щипцов В.В.* Технологическая минералогия промышленных минералов Карелии. // Минералогия, петрология и минералогия докембрийских комплексов Карелии. Петрозаводск: Карел.НЦ РАН, 2007. С. 119-123.
27. Значение исследований технологической минералогии в решении задач комплексного освоения минерального сырья // Сб. науч. статей / Отв. ред. Щипцов В.В. Петрозаводск: Институт геологии КарНЦ РАН, 2007. 200 с.
28. *Котова О.Б., Понарядов А.В.* Свойства и механизм образования микро– и наноразмерных фаз на поверхности минералов. Сыктывкар: Геопринт, 2007, 3 (53). 20 с.
29. *Остроумов Г.В., Грекулова Л.А., Куштаренко Ю.С., Борискин В.П., Гетманская Т.И., Смирнова Т.А., Потконен Н.И., Барсукова З.С., Михайлова Н.С.* Технологическая оценка минеральных объектов на ранних стадиях геологоразведочных работ // Традиционные и новые направления в минералогических исследованиях. М.: ИГЕМ РАН, ВИМС МПР РФ, 2001. С. 112-115.
30. *Борискин В.П., Сидоренко Г.А.* Достижения и направления развития технологической минералогии в ВИМСе // Минеральное сырье. М.: Изд. ВИМС. 1997. № 1. С. 181-190.

31. Геолого-технологическое моделирование рудных месторождений // Сб. научн. тр. / Отв. редактор Изоитко В.В. СПб.: А/О «Механобр-Техника», 1993. 132 с.

32. Пирогов Б. И., Холошин И.В. Геолого-технологическое моделирование комплексных железорудных месторождений // Геолого-технологическое моделирование рудных месторождений. СПб.: А/О «Механобр-Техника», 1993. С. 83-95.

33. Пирогов Б.И. Теоретические основы технологической минералогии // Теория минералогии. Л.: Наука, 1988. С.127-134.

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПЕРЕРАБОТКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ НА ОСНОВЕ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МИНЕРАЛОВ

Юсупов Т.С.

Учреждение Российской академии наук Институт геологии и минералогии Сибирского отделения РАН,
г. Новосибирск

Известно, что реакционная способность минералов во многом зависит от совершенства их структуры и дефектов кристаллической решетки. Одним из эффективных методов создания дефектного состояния в твердых телах является активационное измельчение, состоящее в диспергировании веществ при механических усилиях, превышающих нагрузки в обычных шаровых мельницах.

Практические аспекты активационного измельчения были обозначены еще в ранних работах П.А. Ребиндера – основоположника физико-химической механики, которым установлены аномальные физические и химические свойства твердых тел, в частности кварца в тонкодисперсном состоянии [1]. В дальнейшем Г.С. Ходаков экспериментально показал связь реакционной способности и, прежде всего, химической активности минералов с аморфизацией структуры, создаваемой механическими воздействиями [2]. Кварц в указанных работах был выбран не только как информативный объект изучения дефектообразования, но и многоцелевой минерал, находящий широкое применение в индустрии. Другие минеральные вещества как объекты механоактивации были исследованы значительно меньше. П.А. Ребиндер в выступлении на VIII международном конгрессе по обогащению полезных ископаемых (1968 г., Ленинград) с сожалением констатировал, что «они остались вне поля наших интересов».

Данный пробел в определенной мере восполнен работами института геологии и геофизики СО АН СССР (ныне институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН), в котором были заложены основы и выполнены исследования по механоактивации широкой гаммы минералов и минерального сырья [3, 4]. Параллельно в Институте химии твердого тела и механохимии СО РАН велись исследования теоретических аспектов механохимических процессов в твердых телах [5, 6]. Экспериментальной базой названных работ служили центробежно-планетарные мельницы периодического и непрерывного действия (рис. 1, 2), достаточно широко также используются вибрационные мельницы, атриторы и другие механизмы. Устройства, в которых преобладающим воздействием является трение, часто называют трибоактиваторами, а изменения в твердых телах – трибохимическими. Отдельным механоактивационным направлением является дезинтеграционное измельчение, в котором преобладают ударные воздействия.

Разрушение минералов в мельницах повышенной энергонапряженности сопровождаются многогранными структурно-химическими преобразованиями – изменяются длины и углы межатомных связей, электронная структура и химический состав веществ. Возникают точечные дефекты, дислокации, деформации и искажения решетки, в результате чего происходит разрыв связей между фрагментами структуры и их распад, завершающийся переходом части вещества в рентгеноаморфное высокорекреационное состояние (табл. 1).

Возрастание свободной энергии (энергии Гиббса) ΔG складывается из поверхностной энергии $\Delta G_{\text{пов}}$ и энергии внутренних дефектов $\Delta G_{\text{деф}}$. Значение $\Delta G_{\text{пов}}$ получают из выражения $\Delta G_{\text{пов}} = \sigma \Delta S_{\text{пов}}$.

Вследствие структурных превращений изменяются такие свойства как растворимость, смачиваемость, адсорбционная способность, магнитная восприимчивость, электропроводность, температуры диссоциации, спекания, плавления и другие характеристики, на которых основаны многие методы обогащения и химико-металлургической переработки минерального сырья.

С позиций технологической минералогии наиболее информативными характеристиками внутренних дефектов являются размеры микрокристаллитов (блоков когерентного рассеяния) и величины микроискажений, рассчитываемые на основе рентгенографических данных. Также важно иметь данные ИКС и ДТА, точечные дефекты для многих минералов могут фиксироваться методом ЭПР.