

МЕТОДОЛОГИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ И ПРИРОДА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МИНЕРАЛОВ

Пирогов Б.И.

Российский государственный геологоразведочный университет (Москва),
Email: pirogov_bi @ inbox. ru

Еще в 1954 г. А.И. Гинзбург отмечал, что вовлечение в сферу практического использования какого-либо минерала или отыскание новых областей применения минералов, уже используемых в народном хозяйстве, зачастую оказывается равноценным по своему технико-экономическому эффекту открытию и освоению нового крупного месторождения, не требуя к тому же значительных капиталовложений. Он всегда призывал к комплексности изучения, оценки и переработки полезных ископаемых (ПИ). Именно, **технологическая минералогия (ТМ) объединяет минералогические и технологические исследования, связанные с изучением вещественного состава, текстурно-структурных признаков ПИ, технологических свойств минералов, направленные на разработку рациональных схем их обогащения, комплексное использование минерального сырья.** Она позволяет с единых позиций проследить весь ход изменений минерального вещества (МВ) литосферы через технологию обработки и переработки до накопления в литосфере отходов [1]. Разработку научной системы и методологии этого важнейшего направления прикладной минералогии следует увязывать с основами теории минералогии в целом, физики и химии твердого тела, достижениями таких наук, как поиски, разведка и оценка месторождений, обогащение, экономика и экология полезных ископаемых через:

– исследование эволюционных закономерностей развития минерального мира во взаимосвязи с живым веществом, учитывая, что минералы и их ассоциации (в целом вещественный состав, текстурно-структурные признаки и свойства ПИ (в том числе технологические) формируются на макро- микро- и наноуровне в единой геолого-техногенной системе (ЕГТС), определяя основные геолого-минералогические факторы их обогатимости и экологические особенности. Они отражают круговорот МВ в природе на различных уровнях его организации: *индивид (кристалл, зерно, частица) – агрегат (технологический агрегат малых частиц) – рудное тело (ПИ) – минералогическая аномалия (в т. ч., отвалы пустых пород и некондиционных ПИ, хвостохранилища – потенциальные техногенные МПИ) – минералогическое поле - ...;*

– понимание, что технологические свойства (ТС) минералов (магнитные, плотностные, полупроводниковые, люминесцентные, свойства поверхности и др.) являются функцией их конституции и генезиса, а потому их «жизнь», начатая в геологических процессах, продолжается в технологических аппаратах. Это отражает двойную природу ТС минералов [2] : с одной стороны, они определяются взаимосвязью с генезисом, конституцией и морфологией выделений, с другой – изменениями морфологии, конституции минералов и как следствие природных свойств их при рудоподготовке и обогащении. Информация о свойствах локализуется на различных уровнях минералогической «памяти» - морфологическом, изотопном, молекулярном, структурном, магнитном и т.п. Поэтому минералогии и технологи должны понять характер и особенности проявления ТС минералов, чтобы научиться управлять ими;

– учет в природных геологических и технологических системах иерархической систематики дискретного состояния вещества [2] в ряду образований: *минерал – микроминерал – квазикристаллы – фуллерены – аморфное вещество – коллоиды – наночастицы – кластеры.* Это позволяет по-новому подойти к минералого-технологической оценке комплексности, экологичности ПИ и отходов, разработке нестандартных методик их оценки, технологии добычи и обогащения; обеспечить разработку экономо-экологических технологий получения новых нетрадиционных видов МС (цеолиты, сапонит, полевые шпаты, дистен, гранаты и др.), постоянно расширяя области их применения;

– использование онтогенического подхода в комплексе с традиционными минералогическими, а также современными физическими и физико-химическими методами анализа вещества (высокоразрешающей оптической и электронной микроскопией, РЭМ, визуализации изображений, рентгеновской топографии, РВМТ, ИКС, РКФА, ЯГРС, ЯМР, ЭПР, КФА, люминесцентного, термохимического, микрозондового, в т. ч. протонного, рентгеноспектрального, термобарогеохимического и др.) при телесном исследовании индивидов, агрегатов минералов [4, 5] и ПИ в целом. Обработка полученной информации с помощью компьютера для выявления тонких особенностей конституции минералов, а также при детальном изучении минеральных ассоциаций, выявлении закономерностей изменчивости минералов в морфолого-структурном ряду с учетом технологических данных; получение информации о типоморфных признаках и свойствах минералов, определяющих обогатимость рудных и нерудных ПИ. Для каждого вида рудных, нерудных, техногенных ПИ определяется свой комплекс минералогических и других методов минералого-технологической оценки с учетом их генетических особенностей и преобразований при обогащении;

– интеграцию минералогических методов с обогащением ПИ на основе синтеза минералогических знаний и развития различных экспериментальных направлений в технологии с целью повышения системы рудоподготовки и обогащения ПИ в целом (сохранение и преобразование минералого-генетической информации в процес-

се природно-техногенной эволюции минерального вещества, учет при этом двойственной природы свойств минералов, особенно с возможностями их направленного изменения). Оценка обогатимости нерудных ПИ (цеолитовое, гранатсодержащее, карбонатное, фосфатное, глинистое и другие виды МС) на основе комплексирования специфических минералого-аналитических, математических методов и имитационного моделирования [6];

– использование данных по изучению процессов концентрации минералов в природных месторождениях для совершенствования процессов их технологической концентрации путем: а) создания процессов-аналогов; б) термодинамической оценки направления протекания соответствующих процессов с целью сдвига равновесия в определенном направлении для усиления концентрации тех или иных элементов или минералов; в) совместного рассмотрения и совершенствования общей «технологической схемы» концентрации элементов, включая природные и техногенные процессы. Однако, следует иметь в виду, что геологические процессы существенно отличаются по кинетике их протекания и реакций [6,7]. Тем не менее, ТМ позволяет не только выявить и оценить технологические особенности ПИ и минералов, но и получить обратную информацию для понимания их генезиса;

– выявление на основе геолого-технологической модели при геолого - (минералого) - технологическом картировании месторождения закономерностей изменчивости вещественного, состава текстурно-структурных признаков, физико-механических и физико-химических свойств типов и сортов рудных и нерудных ПИ на фоне минералого-геохимической зональности рудных тел (толщ), определяющей характер их геохимической и экологической специализации, фазовый состав минеральных ассоциаций и микропарагенезисов основных рудных и нерудных минералов, кристалломорфологию, гранулометрию - особенности технологических схем и показатели обогащения ПИ;

– развитие системы геолого-технологического моделирования МПИ различных генетических типов ПИ на основе совершенствования методов картирования и прогноза их обогатимости; технологической оценки ПИ на ранних стадиях изучения с использованием банков данных (минералогических, геохимических, экологических, технологических), а также априорных методов;

– переход от «сырьевого» использования минералов, от утилизации и эксплуатации минерального мира к применению минералов в составе композиционных материалов [8], с учетом разнообразия нашей минерально-сырьевой базы, к взаимодействию и гармоничному «срастанию» человека с минералами (создание минеральных биоконплементарных систем, имплантантов и т.п.);

– расширение и углубление в связи с ТМ минералогических исследований в области экологической минералогии.

Таким образом, определив важнейшие направления методологии ТМ, можно попытаться понять природу ТС минералов, характер и глубину природно-технологических системных изменений, научиться управлять их формированием. Ведь в конечном итоге технологическая схема строится на основе знаний о минеральном сырье: где, сколько и с какими свойствами имеются минералы (ПИ). Изучение их важно именно в ЕГТС, охватывающей физическое, вещественное и энергетическое пространство, в котором минерал развивается во взаимосвязи со средой (природной геологической и технологической), эволюционируя под действием внешних и внутренних факторов, распадаясь на системы «минерал», два типа «сред» и взаимосвязи между ними. Развивая идеи Н.П. Юшкина [9] о взаимосвязи между минералом и минералогенетической средой, следует считать их во многом общими и в технологической системе. Они подразделяются на: а) *энергетические*, обеспечивающие обмен энергией при структурных преобразованиях индивида, б) *вещественные*, связанные с поступлением вещества из среды в минеральный индивид, обеспечивающее его рост, или, наоборот, разрушение индивида и удаление вещества из минерала в среду; в) *информационные* – передача особенностей структурной организации вещества и энергии от среды к минералу и обратно. Опираясь на данные об особенностях вещественного состава, текстурно-структурных признаков, физико-механических и физико-химических свойств ПИ различных генетических типов; законы минералогии – информационные, резонанса, инерции [9, 10, 11]; учитывая взаимосвязи и во многом подобие между процессами минералообразования (преобразования) в Природе и Технологии; результаты технологических экспериментов, мы развиваем наши представления о системе природы ТС минералов (рис. 1).

Двойственная природа свойств, их контрастность формируются в динамике ЕГТС на различных дискретных уровнях (макро, микро-, наноуровне) и проявляются широко в природно-технологическом гранулометрическом спектре как на стадии рудоподготовки, так и в различных узлах технологической схемы. Они отражают круговорот вещества в природе на фоне минералого-геохимической и эколого-технологической специализации ПИ. Различия природных и технологических условий локализации информации на различных уровнях минералогической «памяти» связаны с масштабностью размеров, массой, временем, энергией процессов [2, 12]. Причем длительность природных процессов, которые формируют ТС минералов, до установления термодинамического равновесия исчисляется тысячелетиями. Согласно принципу наследования структурных, вещественных и морфологических признаков минералов [13], их ТС потенциально проявляются в различных эволюционных рядах минералов (ассоциаций), отражающих непрерывное направленное развитие процессов минерагенезиса (результат взаимодействия в различных энергетических полях минералов со средой).

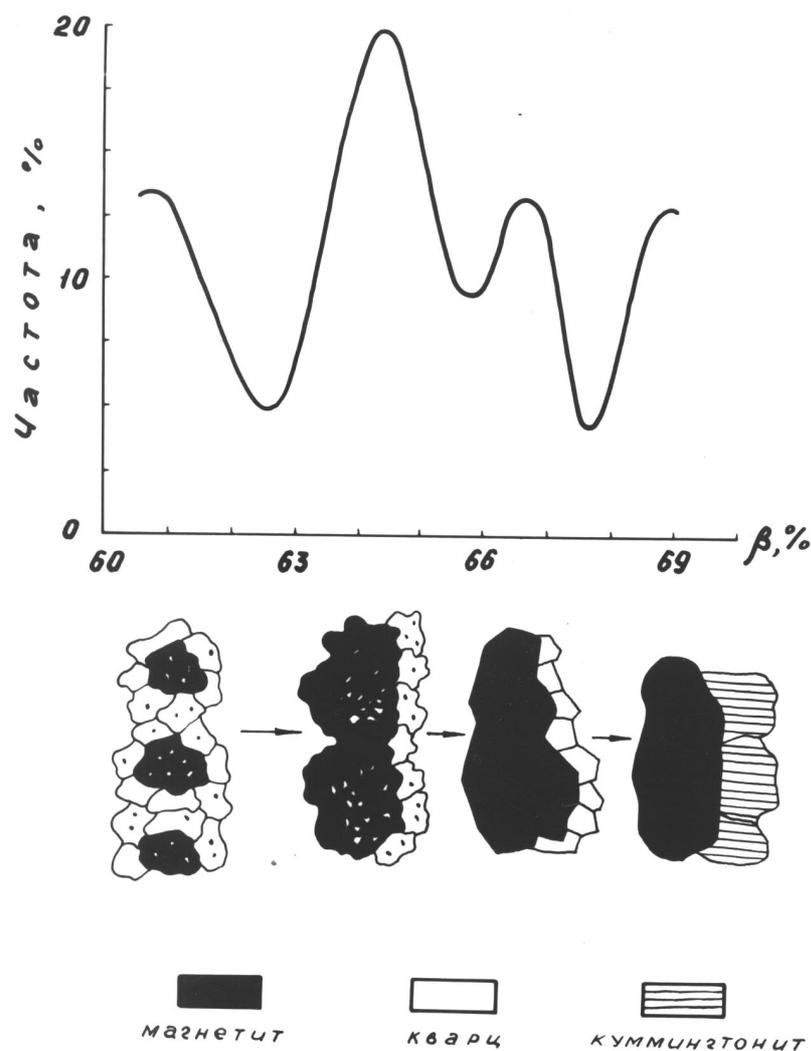


Рис. 1. Зависимость технологических показателей обогащения магнетит-силикатных кварцитов Ингулецкого месторождения (Кривой Рог, Украина) от эволюции типов сростаний минералов, отражающих особенности их геолого-структурной позиции

Этот принцип важно учитывать при переработке и модифицировании минералов (руд); в управлении этими процессами. Однако, быстро текущие технологические процессы, обусловленные производительностью аппаратов, интенсивно разрушая естественную информационную структуру минерала, медленнее передают ее новым продуктам в более или менее сохранившемся виде.

Ведущим фактором при обогащении руд выступает, прежде всего, крупность их измельчения [14], верхний предел которой в начале XX в. составлял 1 мм, в 30-е годы для всех типов руд он был снижен на порядок – до 100 мкм, а в настоящее время многие руды измельчаются до 50 мкм, т.к. существенно ухудшились их текстурно-структурные признаки. Суммарная поверхность измельченной руды при переходе 1мм → 100 мкм крупности возрастает на 2 порядка, а при снижении линейных размеров до 50 мкм она увеличивается уже на 4 порядка (преодолевается качественный барьер). Эти изменения в системе обогащения связаны с вовлечением все большего количества «труднообогащаемых руд» с неблагоприятными характеристиками: тонкозернистые со сложными сростаниями минералов и текстурами, обогащаемые с большим количеством шламов (частицы < 20-10 мкм), не имеющих эффективных методов обогащения. В этих рудах ассоциации минералов имеют близкие ТС и обуславливают низкую их контрастность при сепарации. Например, ассоциации хризоколлы, халькантига, брошангита, полевых шпатов и кварца затрудняют флотуемость окислов и сульфидов ряда Cu-Mo и Cu руд. При тонком измельчении (< 44 мкм) могут значительно изменяться природные признаки ПИ – морфология, гранулометрия и конституция минералов, вплоть до появления новообразованных фаз, явлений аморфизации, псевдоморфизации, полиморфизма [15]. Преобразования минералов при измельчении обычно начинается и заканчивается под воздействием нагрузок (тектонических в природе и механических в измельчительных аппаратах), обуславливая различную степень диспергирования и последующее формирование технологического, вновь образованного, агрегатного состояния вещества (флокулы и др.). При этом по

деформированным участкам, особенно вдоль зон хрупкого разрыва, интенсивнее протекают процессы разложения, окисления и других видов физико-химических преобразований системы минерал – среда, что особенно минералов техногенных МПИ [16]. Все эти особенности ПИ необходимо учитывать при их минералогическом изучении.

Исследуя индивиды и агрегаты рудных минералов, сростаний с другими минералами с учетом конституции, как уже подчеркивалось выше, важно выразить телесно эволюцию их ТС и придать понятию наряду с химическим четкий физический смысл [4], в котором закодированы важнейшие их особенности. Это позволит выразить те или иные особенности неоднородности химического состава и структуры различных порядков в анатомии реальных кристаллов и частиц (зональность, секториальность, мозаичность) в подробностях конституции 2-го и 3-го порядков (полисинтетическое, доменное сложение, эпитаксиальные прослойки); деталях атомного и молекулярного масштаба (разнообразные дефекты кристаллической структуры), в изотопном составе, ядерной, электронной и магнитной структурах. Важно учесть различные по составу включения, поры, трещины, покрытие индивидов и частиц адсорбционным слоем, различные пленки, синтаксию, эпитаксию и др. особенности. При расшифровке анатомии индивидов следует также иметь в виду, что она отражает историю их роста, неоднократную смену габитуса, трансформацию скелетного роста в полногранный и наоборот. Причем она может быть существенно преобразована в процессе изменения и разрушения минералов за счет внешнего энергетического воздействия, как в природе, так и технологии. Важно выявить и проследить особенности изменений, связанные с этапами их син- и эпигенетического метаморфизма [17]. Особое место в оценке ТС минералов и руд принадлежит заключительным этапам минерагенеза, фрагментарно «замораживающих» информацию в морфолого-структурных количественных параметрах (прежде всего, в сростаниях минералов, позволяющих оценивать эффективность их раскрытия при измельчении). Несомненно, один из наиболее эффективных методов познания ТСМ заключен в онтогенетическом подходе [2, 4, 5]. Именно этот подход к оценке технологических особенностей минералов и ПИ, с учетом данных технологического эксперимента, обеспечивает: а) *выбор оптимальных условий раскрытия зерен полезного компонента* с учетом природы сростаний, определяющей гранулометрию, форму зерен сростающихся минералов и особенности их границ; б) *оптимизацию технологического процесса* с учетом контрастности свойств разделения минералов на основе особенностей их конституции - неперменной неоднородности состава и свойств мономинеральных зерен (при комплексном анализе анатомии индивидов и измельченных частиц); в) *выделение при минералоготехнологическом картировании типов и сортов ПИ* с получением их всесторонней минералоготехнологической характеристики.

ТСМ формируются и потенциально наследуются в эволюции морфологии, гранулометрии, конституции природных минеральных ассоциаций на макро-, микро-, наноуровне, преобразуясь при деструктивно-энергетических процессах в различных узлах технологической схемы обогащения ПИ. Исследования эволюции ТС минералов и поведения техногенных фаз позволяют говорить о двух основных механизмах изменений, как это уже подчеркивалось выше, - полиморфном и изоморфном [12]. Наиболее четко оба механизма превращений противопоставляются в техногенезе. При этом полиморфный механизм превращений представляет собой не химические, а симметричные реакции минералов. В случае формирования ТС минералов за счет полиморфных превращений энергия тратится на разупорядочение решетки и структура превращается в низкосимметричную фазу. Авторы подчеркивают - с понижением симметрии возрастают примесная емкость структуры и реакционная активность полиморфных фаз. Исследования обогатимости Fe руд различных генетических типов [18] показали, что преобразования в структуре рудных минералов связаны с морфотропными изменениями в ряду: вюстит $Fm\bar{3}m$ – магнетит $Fd\bar{3}m$ – маггемит $R\bar{4}_22_12$ – гематит $R\bar{3}c$. В природных и промышленных условиях окислительно-восстановительные процессы перехода магнетита в вюстит или маггемит (далее в гематит) обусловлены объемными изменениями на фоне симметричных преобразований [19]. Так, при окислении магнетита до маггемита объем рудной фазы увеличивается на 9%, при восстановлении до вюстита – уменьшается на 21%, что приводит к большой деформации как отдельных зерен, так и агрегатов. Они провоцируют процессы псевдоморфизации магнетита и гематита (мартитизацию и мушкетовитизацию), которые весьма существенно сказываются на изменении таких ТС преобразованных минералов, как характер и величина удельной поверхности, магнитных (прежде всего, на коэрцитивной силе и др.). Эти процессы в природе усиливаются за счет возникновения многочисленных вторичных микротрещин в минералах. По нашим наблюдениям процессы мушкетовитизации и мартитизации весьма существенно проявлены в железистых кварцитах Михайловского месторождения КМА. Это четко прослеживается в изменении величины полной удельной поверхности магнетитового концентрата и его качества (крупность измельчения 95% класса < 44 мкм) в увязке с зональностью толщи кварцитов - от существенно магнетитовых с силикатами и пиритом лежачего и висячего бока, к силикат-магнетитовым и гематит-магнетитовым центра залежи (1- Fe= 65,8% и уд.п.= 1788 м²/ кг; 2 – 65,3 и 1407; 3 – 66,0 и 1200). На примерах рядов сульфидов и оксидов Дементьева Г.И и Смирнова Ю.М. 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 – вюртцит 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 [8]. 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 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. Он четко фиксируется комплексом современных методов исследований и в анатомии индивидов. С помощью ИК-спектров поглощения в координатах $\sqrt{3} - I\sqrt{4}$ нами [20] были выявлены закономерности в проявлении нормального и наноблочного изоморфизма в магнетитах различных генетических типов руд, позволяющие оценивать характер замещения Fe в структуре минерала, фиксировать наноблочный изоморфизм в анатомических срезах и разделять магнетиты по минералого-технологическим сортам руд при картировании. Несомненно, оба явления (изоморфизм и полиморфизм) в значительной степени предопределяют выбор режимов обогащения руд различных генетических типов.

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 [21, 22, 23]. Например, появление слоистых силикатов (тальк, хлорит, слюды) от десятых долей до первых процентов отрицательно сказывается на флотационных свойствах рудных минералов из скарных W-Мо руд. В Fe-P рудах появление 0,5-1,5% гипса подавляет флотацию апатита и т.д.

Представления о геолого-структурной позиции месторождения позволяют учесть структурно-тектонические факторы в формировании, изменении технологических особенностей ПИ и проследить динамику деформационных проявлений (микроскладчатость, трещиноватость, кливаж, будинаж, брекчирование и др.) на разных уровнях: месторождение – рудное тело – агрегат минералов – индивид в связи с постулатом онтогении минералов – физика управляет химией [24]. Именно деструктивно-энергетические преобразования приводят к существенному изменению морфологии и размеров рудных и нерудных минералов, текстурно-структурных признаков и вещественного состава ПИ. Так, проявления упругих, пластических и хрупких деформаций, особенно двух последних, определяют практически все изменения формы и анатомии индивидов минералов (скольжение, двойникование, блокирование, разделение на части, скалывание, истирание), а как следствие – изменение технологических характеристик и показателей обогащения ПИ. Нами [21, 25] показано, что наиболее ощутима роль этого фактора в железистых кварцитах, метаморфизм и метасоматоз которых связан прежде всего с процессами деформации и перекристаллизации. Эти изменения определяются, с одной стороны, физическими свойствами сосуществующих минералов, с другой – особенностями онтогении индивидов и агрегатов в связи с проявлением различных видов деформации и повышенной способности к перекристаллизации. Деформации в слоистой текстуре кварцитов проявляются, как правило, дифференцированно: наряду с пластичностью одних слоев подчеркивается хрупкость других. Соотношение динамометаморфизма и рудных проявлений при этом усложняется относительно хорошей растворимостью рудных минералов или их подвижностью. Проявляющийся метасоматоз в связи с дислокациями нередко вызывает сильное искажение не только состава и формы рудных тел, но и появление новых рудных тел, а в конечном итоге существенно влияет на технологические особенности руд. Качество магнетитового концентрата снижается на 1-5%. Детально изучение метаморфической перекристаллизации железистых кварцитов Ингулецкого месторождения в связи с проявлением тектоники - складчатости, брекчирования, образования структур будинаж позволило проследить изменения их технологических свойств (рис. 2). При складкообразовании изменения пластичности слоев кварцитов увязываются с последовательностью их перекристаллизации: кварцевые слои на стадии перекристаллизации кварца более пластичны, чем магнетитовые и куммингтонитовые. Поэтому существенное изменение технологических свойств кварцитов связано с потерей кварцем и магнетитом способности к перекристаллизации, приводящей к их интенсивной грануляции при продолжающейся деформации. В участках развития будинажа кварцевых слоев, связанных с процессами разлинзования и грануляции магнетита, содержание Fe в концентрате уменьшается с 63-66% до 60-63%. Выявленная на месторождении последовательность формирования минералов (пойкилитовый магнетит → роговиковый кварц → ксенобластовый магнетит → идиобластовый магнетит → сотовый кварц → метасоматический куммингтонит) предопределяет генетический тип их сростаний. Это обуславливает корреляционные связи между характером границ сростаний магнетита, двух типов кварца, метасоматического куммингтонита и технологическими свойствами кварцитов, предопределяя колеблемость качества концентрата в пределах одной и той же их разновидности (см. рис. 1). Онтогенические наблюдения фиксируют формирование того или иного типа сростаний с приуроченностью кварцитов к определенной структурной позиции: а) в участках перекристаллизация проявлена слабо - в значительном количестве сохраняется тонкозернистый, пойкилитовый магнетит, ухудшающий качество концентрата (первый мак-

симум); б) сотовый кварц и метасоматический куммингтонит приурочены к зонам растяжения пластов – замкам складок. Их появление обуславливает границы типа нарастания с магнетитом и, как следствие, ухудшение качества концентрата, дробимости, измельчаемости кварцитов (второй максимум); в) для крыльев складок характерно торможение перекристаллизации, предопределяющей широкое распространение метасоматического типа сростаний ксенобластового магнетита с роговиковым кварцем, что улучшает раскрытие магнетита при измельчении, а значит, и качество концентрата (третий максимум); г) значительное развитие метасоматического куммингтонита вызывает дальнейшее ухудшение дробимости кварцитов – возрастает в целом их вязкость. Одновременно происходит смена границ нарастания (между магнетитом и сотовым кварцем) на «ложные» (между магнетитом и куммингтонитом), что способствует лучшей измельчаемости и раскрываемости магнетита – улучшению качества концентрата (последний максимум).

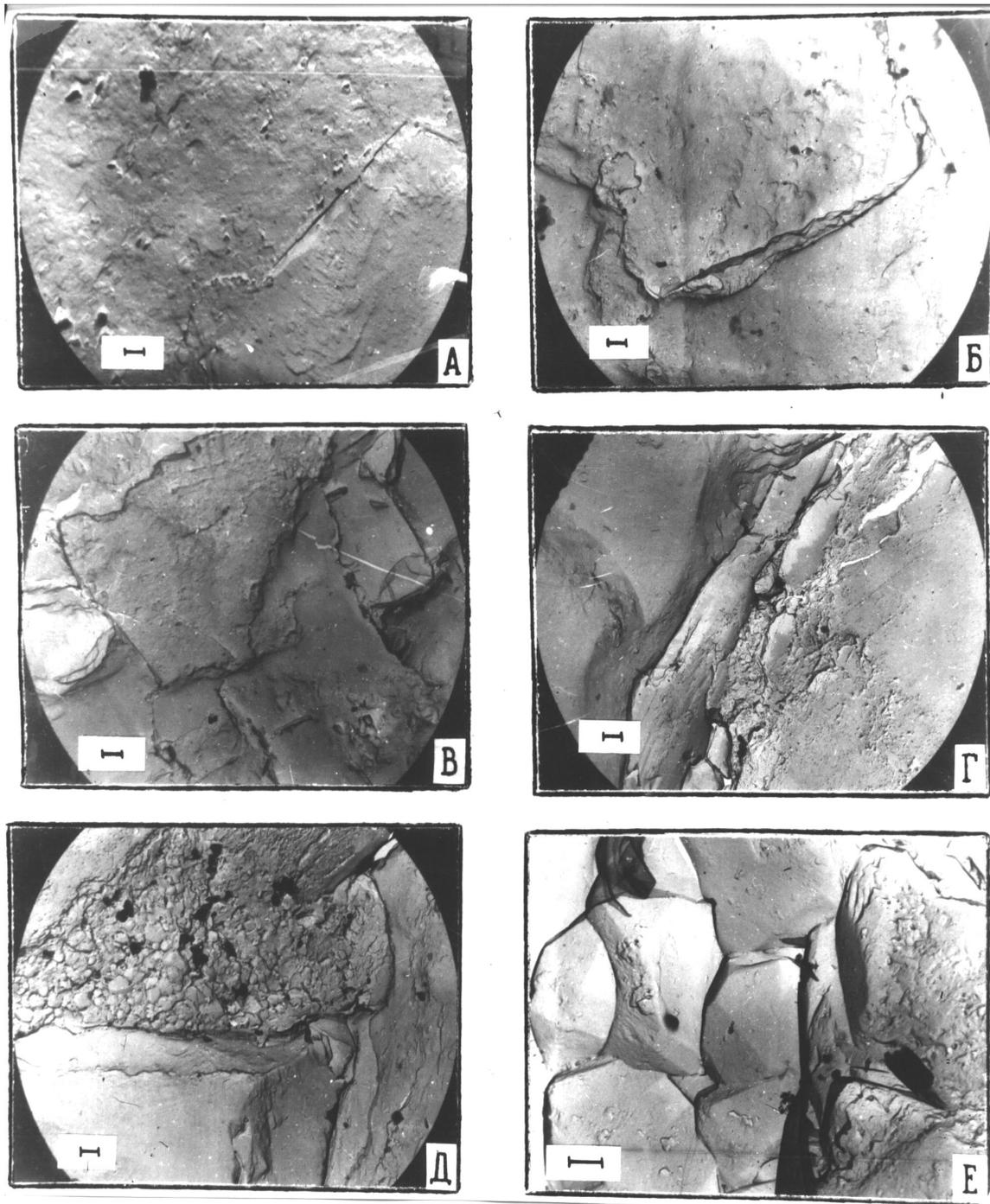


Рис. 2. Последовательные стадии процесса рекристаллизации: от начала разрушения индивида магнетита-1 (А-Г) до появления мелких вторичных индивидов магнетита-3 (Д-Е). Угольные реплики. Масштаб – 10 мкм

Наблюдения в сложноскладчатых железистых кварцитах Михайловского месторождения [21] показали также изменения минералогических (анатомии индивидов магнетита) и технологических характеристик в зависимости от микроскладчатости и кливажа. Кливаж разлома и скольжения связан с серией кулисных микроскладок и серией мелких асимметричных складок с некоторыми элементами их проволакивания, с развитием в отдельных участках зон милонитизации. Все это существенно влияет на развитие процесса рекристаллизации магнетита (рис.) и появление значительного количества тонких микроблочковых выделений размером менее 30 мкм. Между количеством частиц минерала такого размера и содержанием Fe в концентрате выявляется четкая обратная связь ($r = -0,80$).

В минералого-технологической классификации кварцитов для каждого технологического сорта на месторождении учитывается этот параметр, как при картировании, подаче руд на обогатительную фабрику (ОФ), так и при минералогическом контроле их обогащения.

Таким образом, при оценке обогатимости железистых кварцитов и геолого-технологическом картировании необходимо учитывать взаимосвязь их технологических свойств с характером структурно-тектонических проявлений их на месторождении, которые в значительной степени предопределяют закономерности пространственной изменчивости и, как следствие, закономерности изменчивости вещественного состава и технологических показателей обогащения.

Типоморфные свойства минералов (в т.ч. технологические) выявляются в сочетании онтогенетических исследований с комплексом современных методов изучения вещества и технологическим экспериментом, предопределяя выбор схемы и глубину обогащения ПИ. На их основе оцениваются ведущие геолого-структурные и минералого-технологические факторы, определяющие обогатимость ПИ. Они связаны с восстановлением минерагенеза любого объекта – отдельного минерального вида (даже отдельных его конституционных или анатомических элементов) до минеральных агрегатов, парагенезисов, ассоциаций, комплексов на уровне минералогической «памяти», отражающего свою генетическую историю в эволюционных структурных, морфологических, видовых, формационных и т. п. рядах. Здесь используется информация, записанная в каменной форме [13, 24]. Ведь зарождаясь, разрастаясь, изменяясь (при совместном действии параметров среды - Р, Т, С, Eh-pH и др.), минералы фиксируют на себе в виде зонального строения, реакционных каемок, псевдоморфоз, структур распада, нарастаний одних кристаллов на другие, прочих особенностей – начало, эволюцию и остановку действия факторов, отражая, таким образом, в каменной записи динамику причин минерагенеза и техногенеза. Поэтому их следует рассматривать не только как «куски пространства», но и «окаменевшие отрезки времени». Важную роль при этом играют факторы структурного, вещественного, морфологического наследования, проявленные в определенных энергетических условиях. ТС минералов формируются в ЕГТС и имеют двоякую природу - инерционно и в соответствии с принципом детерминизма наследуют природные особенности вещественного состава, текстурно-структурные признаки, физические и физико-химические свойства ПИ различных генетических типов месторождений, изменяемые в техногенезе. Например, в железных рудах различных генетических типов месторождений магнетит характеризуется следующими типоморфными признаками, определяющими их обогатимость [21]:

– **гетерогенностью состава**, обусловленного генезисом минерала и связанного с проявлениями нормального и аномального – наноблочного изоморфизма, предопределяющего теоретически возможное и технологически достижимое качество магнетитового концентрата. Характер неоднородности и содержание Fe в минерале (ср. данные) изменяется в ряду: 71,9% (собственно магнетиты и оксимагнетиты в железистых кварцитах Кривого Рога и КМА) → 69,3% (Mn-магнетиты в карбонатных скарнах Дашкесана) → 68,4% (Ti, Mg, Al-магнетиты в карбонат-силикатных скарнах Соколовки и Сарбая) → 65,4% (Ca, Mg, Al – магнетиты в пирокластических породах, связанных с траппами Коршуновского и Рудногорского месторождений) → 64,7% (Al, Mg, Ti – магнетиты в ультраосновных щелочных породах с карбонатитами Ковдора) → 63,7% (Ti – магнетиты и Ti – магнетиты с ильменитом в ультраосновных и основных породах Качканарского и Кусинского месторождений). Следовательно, наиболее чистые магнетиты метаморфического типа и самые низкие по содержанию Fe магматические. **Метаморфизм минералов любого генезиса, как заключительный этап минералообразования вызывает изменение его состава и свойств, как в природе, так и техногенезе.** Изучение анатомии индивидов позволяет четко проследить эволюцию метаморфических преобразований минерала [17]: последовательное изменение вплоть до разрушения первичных структур зонального, зонально-секториального, микроблочного строения, связанного с явлениями перекристаллизации, рекристаллизации и т.п. см. рис. 3), приводящие в итоге к изменению уровня гетерогенности состава и строения частиц магнетита в классах различной крупности. В технологической схеме при измельчении за счет явлений метаморфизма минерала нарушается его первичная доменная структура, что вызывает существенный рост коэрцитивной силы (к.с.) частиц. По данным Дина и Дэвиса (1940), к.с. намагниченных частиц магнетита резко возрастает с уменьшением их размера в интервале 40-20 мкм. Это обуславливает повышенную флокулируемость их и захват крупных частиц нерудных минералов, разубоживающих концентрат (на 1-3% по Fe). Повышение качества концентрата возможно за счет стадий перечистки при размагничивании исходной пульпы в магнитных гидроциклонах. В то же время резко падает удельная магнитная восприимчивость частиц минерала размером менее 20

мкм, обуславливая их потери в хвостах (обычно их содержание в хвостах составляет 15-30% от общего содержания магнетита);

-- изменчивостью магнитных свойств (в т.ч. характера магнитных доменов) в связи с генезисом руд, определяющих эффективность сепарации (изменение содержания Fe в концентрате и потери его в хвостах). Особенности изоморфизма элементов предопределяют параметры кристаллической структуры минерала, прежде всего параметры его решетки, и в итоге типоморфизм магнитных свойств. По величине удельной магнитной восприимчивости изученные магнетиты подразделяются на 3 группы: 1 – (75000-100000) · 4 π /10³ м³/кг (железистые кварциты); 2 - (53000-77000) · 4 π /10³ м³/кг (магнетиты в карбонат-силикатных скарнах и карбонатитах); 3 - (60000-95000) · 4 π /10³ м³/кг (магнетиты карбонатных скарнов). Важны также данные, как уже подчеркивалось выше, по изменению к.с. минерала, которая изменяется в тех пределах: 1) наиболее высокие – (120-470) · 10³ /4 π А/м – характерны для магнетитов щелочного (железистые кварциты СевГОКа, Кривой Рог) и карбонатного (Дашкесан, Ковдор) метасоматоза; 2) к.с. магнетитов железистых кварцитов без существенного метасоматоза колеблется в пределах (40-150) · 10³ /4 π А/м, а за счет процессов щелочного и карбонатного метасоматоза она возрастает до 350-400) · 10³ /4 π А/м; 3) специфическое тонкоблочное строение магнетитов Соколовского и Сарбайского месторождений (исключая шестоватую разновидность) обуславливает низкие значения - 150-40) · 10³ /4 π А/м. **Высокую минералого-технологическую информативность несут в себе коэрцитивные спектры и данные термомагнитных анализов, позволяющие также оценивать гетерогенность состава и структуры магнетитов различного генезиса**, что рассмотрено нами детально [21]. Интересны также данные по типоморфизму ТЭДС магнетитов (точкам Кюри, информацией по анализу кривых нагревания и охлаждения, связей их с изменением кристаллической структуры, стадийностью минералообразования, обеспечивающих определенные по содержанию Fe концентраты в основных минералого-технологических типах сортов, как показано нами по Ковдору:

– эволюции морфологии (в т.ч. анатомии), гранулометрии и типов сростаний магнетита с рудными и нерудными минералами, как фактора оценки значимости текстурно-структурных признаков руд и особенностей раскрываемости минералов при дроблении и измельчении, влияющих на эффективность сепарации минеральных частиц. Изучение особенностей онтогении магнетита нередко выявляет сложное внутреннее строение кристаллов и агрегатов, проявление зонального, секториального, мозаично-блокового строения, следов роста и растворения на гранях кристаллов, характер деформационных изменений. Колебания физико-химической обстановки приводит к неоднократной смене габитуса минерала, что может быть выражено общей формулой:

$$\begin{array}{ccc} \{111\} & \{111\} & \{111\} \\ > \{111\} - \{110\} < & & > \{111\} - \{100\} < \\ \{110\} & \{110\} & \{110\} \end{array}$$

Как правило, в пределах одного и того же месторождения магнетит встречается в виде нескольких генераций: это зернистые различного облика и крупности индивиды, псевдоморфозы; сплошные, ленточные, пойкилитовые за счет включений других минералов, мирмекитовые и мирмекитоподобные, радиально-лучистые агрегаты, параллельные сростки, сложные эпитактические нарастания слюд, хлоритов на магнетит и т.д. При измельчении кристаллы минерала раскалываются по определенным кристаллографическим плоскостям и фиксируются в широком технологическом гранулометрическом спектре различных классов крупности (со своей кристаллохимией и способностью поверхности адсорбировать как определенные химические элементы и группы, так и переизмельченные частицы других минералов, затрудняющих их сепарацию, в частности, при флотации). Очень важно выявить природу границ типов сростаний магнетита с гематитом, сульфидами, нерудными минералами, как это рассмотрено нами выше при анализе минералого-технологических данных рис. 2.

В оценке типоморфных признаков минералов комплексных руд при обогащении важно комплексно сочетать их природные и технологические характеристики - в рудах Ковдора это сделано нами как для магнетита, так и попутно извлекаемых бадделеита и апатита [21, 25]. Следует также заметить, что сегодня для многих типов рудных и нерудных ПИ исследованы типоморфные признаки минералов и минеральных ассоциаций, обеспечившие разработку высокоэффективных технологических схем [23, 26, 27, 28].

ТС минералов в Природе и Технологии основные методы направленного их изменения связаны с «регенерированием» или «залечиванием» дефектов кристаллической решетки на поверхности или в объеме измельченных частиц. К ним относятся: *механические* (особые режимы и приемы измельчения), *акустические* (ультразвуковая обработка), *термические* (нагревание и последующее быстрое или медленное охлаждение), *активация свойств поверхности* (блокировка поверхностных центров в физических полях простыми молекулами газовой составляющей; изменение соотношения электронных и дырочных центров различными методами смещения адсорбционно-десорбционного равновесия, что изменяет условия сепарации частиц как за счет поверхностных, так и объемных изменений [29], *химические изменения* (протравливание, обработка реагентами, «легирующими» поверхность примесными ионами), *радиационные* (облучение рентгеновскими и гамма-лучами, потоками быстрых частиц) т.п.

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 [30]. Разработка и внедрение методов селективного выделения минералов связано с использованием новых систем рудоподготовки и обогащения ПИ. Гараниным К. В. (2003) впервые предложены и обоснованы элементы новой технологии электроимпульсной дезинтеграции для селективного раскрытия щелочно-ультраосновных пород; в т.ч. и с целью обеспечения высокой степени сохранности алмаза и минералов-спутников при их извлечении и возможности извлечения микрокристаллов. С помощью применения метода электроимпульсного дробления были выделены и изучены микроалмазы из автолитовой брекчии (считавшейся неалмазоносной) трубки им. В. Гриба Архангелской алмазонасной провинции. Несомненно, предложенная технология может быть использована в качестве отдельного завершённого цикла дезинтеграции пород и руд, а также как звено в технологической цепи аппаратов.

Разработаны новые технологии извлечения тонкого золота на основе нанотехнологий [31]. Б. А. Остащенко 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^- , O^- , CO^- , C^- , можно сдвинуть в ту или иную сторону самыми различными способами, в т.ч. 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 . 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. Остащенко разработана также технологическая схема гравитационного обогащения Au класса $-200+40$ мкм. Использование при этом метода «изометризации» пластинчатого Au (с образованием валиков по краям золотинок 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.

Микроминералогия выделений порядка 100-0,1 мкм является сегодня новым высоко эффективным направлением в изучении, оценке и обогащении тонкодисперсных руд (минералого-геохимических систем) благородных, редких и др. металлов, промышленную ценность которых составляют элементы с низкой концентрацией (0,000n-0,0n %). Методология микроминералогического подхода при изучении руд Au-Ag месторождений (на примере золоторудных месторождений вулканогенных областей Чаткальско-Кураминского региона Восточного Узбекистана) позволила уточнить физико-химические особенности их образования, элементы зональности, уровни эрозионного среза и т. д. скрытого Au оруденения и разработать технологию их обогащения. В результате наноминералогических исследований установлены закономерности формирования минералов и минеральных фаз в нетрадиционных месторождениях (Чудное, Полярный Урал) редкоземельно-редкометалльно-золотого типа. Новые данные об особенностях минерального состава руд позволяют выбирать наиболее оптимальную методику для определения в рудах истинного содержания благородных металлов и на этой основе разрабатывать рациональную технологию обогащения. Предложенная технология автоклавного кислотного разложения слюдяного концентрата, хотя пока и дорогая, но обеспечивает 100% извлечение Au. Высокое содержание Au в рудах подобного типа, представленного микро- и нанофазами, пространственно связанных со слюдами, несомненно, требует разработки специальных технологий их обогащения. В результате экспериментальных работ в Институте геологии Коми разработана методика искусственного облагораживания исходных бесцветных пренитов из базальтов Северного Тимана. Применение разработанного способа (облучение и отжиг) позволяет повысить выход ювелирного сырья с 3-5% до 60%, агата – до 70%. Создана модель природной окраски пренита, позволяющая описывать все многообразие цветовой гаммы минерала из разных месторождений и прогнозировать возможного такого облагораживания исходного сырья.

Эволюция ТСМ, связанная с пространственно-временными закономерностями распределения минералов типов и сортов ПИ, прослеживается при геолого-технологическом картировании на основе геолого-технологической модели месторождения. С помощью такой модели, как показывают наши исследования по бадделит-апатит-магнетитовым рудам Ковдора [18], можно управлять технологией процесса обогащения с учетом рационального и комплексного использования ПИ. 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;
- различаются на разных уровнях: месторождение (зональность) – руда (рудное тело) – минерал (агрегат – индивид);
- пространственное распределение парагенетических ассоциаций, контролируемых структурными факторами;
- онтогенический подход к минералого-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 минералого-генетические факторы, определяющие обогатимость, являются основными критериями ГТК;
- 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 минералого-технологическими сортами 3-х главных компонентов (магнетита, апатита, бадделеита), что осложняет усреднение их, технологический прогноз и систему контроля за процессами рудоподготовки и обогащения. Внедрение ЭВМ (алгоритм геолого-технологического моделирования месторождения) обеспечивает объединение геолого-технологических планов в единую модель с привлечением дополнительных характеристик руды: содержаний 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 обогатительной фабрике (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.). *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 позволяет оператору оценить ее значимость и ввести необходимые коррективы.

Сегодня результаты ГТК месторождений 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 комбинатов. Это требует постоянного совершенствования системы ГТК.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ревнивец В.И.* Роль технологической минералогии в обогащении полезных ископаемых. // Зап. Всесоюз. минерал. об-ва, 1982, вып. 4. - С. 4-20.
2. *Пирогов Б.И.* Онтогенический метод в познании технологических свойств минералов. // Проблемы онтогении минералов. Л.: Наука, 1985. - С.22-30
3. *Туресебеков А.Х. Конев 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.
4. *Григорьев Д.П.* Позиции онтогении минералов. // ЗВМО, 1978, ч. 107, в. 4. - С. 407-415.
5. *Григорьев Д.П.* Рассуждения о минералогии. Сыктывкар: Геопринт, 1998. - 88с.
6. *Землянский В.Н.* Развитие технологических основ комплексной утилизации Al-, Ti- и Fe силикатных горнопромышленных и техногенных отходов (на примере бокситовых и титановых руд Северо-Онежской и Тиманской минералогических ровинций Восточно-Европейской платформы. // Автореф. докт. дис. Ухта : Изд. УГТУ. 2005. - 43 с.
7. *Барский Л.А.* Основы минералургии. Теория и технология разделения минералов. М.: Наука. 1984.- 470 с.
8. *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.

9. Юшкин Н.П. Теория и методы минералогии. Л.: 1977. - 291 с.
10. Юшкин Н.П. Теоретические и методические основы расшифровки генетической информации, содержащейся в минералах. // Новые идеи в генетич. минералог. Л.: Наука, 1983. - С. 38-47.
11. Григорьев Д.П. Соотношение технологической минералогии с сопредельными отраслями знания. // Онтогенез минералов и технологическая минералогия. Киев: Наукова Думка, 1988. - С. 11-15.
12. Дементьева Г.И., Смирнов Ю.М. Изоморфные и полиморфные превращения минералов в техногенезе. // Обогащение руд, № 3. 1988. - С. 34-37.
13. Юшкин Н.П., Хомяков А.П., Евзикова Н.З. Принцип наследования в минералогенезисе. Сыктывкар: Препринт. 1984, в. 93. - 32 с
14. Ревнищев В.И. Рудоподготовка как новое направление горных наук. // Основные направления развития техники и технологии обогащения ПИ. Л., 1983. - С. 3-22.
15. Пирогов Б.И. Роль минералогических исследований в обогащении руд. // Минерал. журн. 1982, № 1. - С. 81-92.
16. Юргенсон Г.А. Проблемы минералогии геотехногенеза. // Роль минералог. исслед в решении эколог. проблем (теория, практика, перспективы развития). СПб.: Мин. об-во при РАН, 2002. - С. 200-203.
17. Руденко С.А., Иванов М.А., Романов В.А. Метаморфизм минералов – важное явление в истории их формирования. // ЗВМО, 1978, № 6. - С. 698-710
18. Пирогов Б.И. Теоретические основы технологической минералогии. // Теория минералогии. Л.: Наука, 1988. - С.127-134.
19. Дымкин А.М., Пермьяков А.А. Онтогенез магнетита. Свердловск: УНЦ АН СССР. 1984. - 188 с.
20. 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.
21. Пирогов Б.И., Поротов Г.С., Холошин И.В., Тарасенко В.Н. Технологическая минералогия железных руд. Л.: Наука, 1988. - 304 с.
22. Попов В.А. О необходимости усиления минералогических исследований в технологии минерального сырья // Онтогенез минералов и технологическая минералогия. Киев: Наукова Думка, 1988. - С. 16-21.
23. Изюмко В.М. Технологическая минералогия и оценка руд. СПб.: Наука, 1997. - 582 с
24. Григорьев Д.П., Жабин А.Г. Онтогенез минералов. М., 1975. - 340 с.
25. Пирогов Б.И., Холошин И.В. Инфракрасные спектры поглощения магнетита и их прикладное значение. // Минерал. журн. 1989, № 2. - С. 73-80.
26. Лыгина Т.З. Методические основы комплексной оценки состава и свойств неметаллических полезных ископаемых. // Автореф. докт. дис. М: ВИМС. 2001. - 50 с
27. Ожогина Е.Г. Технологическая минералогия труднообогатимых марганцевых руд России. // Автореф. докт. дис. М: ВИМС. 2002. - 50 с
28. Щипцов В.В. Геолого-минералогические основы технологической оценки промышленных минералов Карелии. // Автореф. докт. дис. СПб.: РИЦ СПГГИ. 2000.- 46 с.
29. Котова О.Б. Поверхностные процессы в тонкодисперсных минеральных системах. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. - 194 с.
30. Направленное изменение физико-химических свойств минералов в процессах обогащения полезных ископаемых. // Плакатиные чтения. М.: Альтекс, 2003. – 145 с.
31. Остащенко Б. А. Направленное изменение технологических свойств минералов. // Автореф. докт. дис. Сыктывкар: ИГ Коми науч. Центра УрО РАН. 1998. - 43 с.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ В РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Ожогина Е.Г., Рогожин А.А.

ВНИИ минерального сырья им. Н.М.Федоровского, г. Москва,
e-mail vims-ozhogina@mail.ru

Одной из основных проблем недропользования в настоящее время является ухудшение воспроизводства минерально-сырьевой базы, в том числе – черных, цветных, легирующих металлов, многих видов нерудного сырья. Медленное и трудное вовлечение месторождений в освоение, и даже при этом – рост дисбаланса между добычей и приростом запасов представляют серьезную проблему для развития потенциала металлургической, химической и других ключевых отраслей промышленности. Отечественная минерально-сырьевая база по многим дефицитным полезным ископаемым представлена низкокачественным труднообогатимым сырьем, сосредоточенным в месторождениях с неблагоприятными для освоения географо-экономическими и горно-техническими условиями. Промышленное освоение месторождений зачастую связано со значительными потерями главных и особенно сопутствующих полезных компонентов, большим объемом вскрышных работ и, следовательно, негативным влиянием на окружающую среду. В