

ОНТОГЕНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ – ОСНОВА ВЫЯВЛЕНИЯ И ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МИНЕРАЛОВ

Пирогов Б.И.

РГГРУ, г. Москва

«Генезис минералов не что иное, как история образования их самих, начиная от акта зарождения и до завершающих событий их «жизни». «Биография» минералов, в ходе которой создаются все их качества, включая практически используемые, это и есть подлинный генезис» [1]. Технологическая минералогия (ТМ) позволяет с единых позиций генезиса полезных ископаемых (ПИ) на онтогенической основе проследить весь ход изменений минерального вещества (МВ) литосферы через технологию обработки и переработки до накопления в литосфере [2]. Опыт показывает, что при разработке технологических схем для руд (ПИ) хорошо изученных однотипных месторождений, каждый раз приходится сталкиваться с большими трудностями, так как технологические свойства минералов (ТСМ) весьма существенно могут варьировать в пределах даже одного месторождения. 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 онтогенической основе, что позволит выявить и оценить ТСМ. Достижения минералогической науки (развитие таких направлений как кристаллохимия и физика минералов, онтогенез и филогенез, внедрение новых методов анализа вещества, топоминералогия) в XX столетии способствовали углублению и развитию теоретических и практических принципов ТМ. **Они позволяют учесть эволюционные закономерности развития минерального мира во взаимосвязи с живым веществом - минералы и их ассоциации. В целом состав, текстурно-структурные признаки и свойства (в т.ч. технологические) полезных ПИ, формируются на макро-, микро- и наноуровне в различных энергетических полях (гравитационных, магнитных, электрических и др.) единой геолого-техногенной системы (ЕГТС).** Эти принципы определяют основные геолого-минералогические факторы обогатимости различных 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.* ЕГТС охватывает физическое, вещественное и энергетическое пространство, в котором минерал развивается динамически во взаимосвязи со средой (природной 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 [3] о взаимосвязи между минералом и минералогенетической средой в ТМ, следует считать их во многом общими и в технологической системе. Это взаимосвязи: а) *энергетические*, обеспечивающие обмен энергией при структурных преобразованиях индивида, б) *вещественные*, связанные с поступлением из среды в минеральный индивид, обеспечивающие его рост, или, наоборот, разрушение индивида и удаление вещества из минерала в среду; в) *информационные*, обеспечивающие передачу особенностей структурной организации вещества и энергии от среды к минералу и обратно. Такой подход наиболее значим при использовании онтогенического метода в познании ТСМ. **Онтогенический анализ основан на сравнительно-исторических реконструкциях эволюции объектов различного уровня** (индивидов, агрегатов, минеральных тел и МПИ). При этом онтогенический метод опирается на фундаментальные эволюционные закономерности минералогенезиса [3-9]:

1) **закон происхождения минерального индивида через этапы зарождения, роста и до завершающих событий их «жизни» - изменения и разрушения**, история которых отражается в явном или скрытом виде в морфологии, анатомии, во взаимоотношениях индивидов и других их особенностях. Для более сложных систем, чем индивид и агрегат (минеральное тело, МПИ), этот закон известен как закон стадийного развития - стадийный анализ [8], включающий стадии сингенеза, диагенеза и метаморфизма;

2) **принцип наследования в минералогенезисе определенных признаков минералов** (вещественных, структурных, морфологических, качественных) - **в цепи последовательной смены поколений минералов каждое последующее поколение наследует определенные признаки минералов предыдущего поколения.** В минеральном мире наследование проявляется на всех структурных уровнях - от отдельного индивида, даже от отдельных конституционных или анатомических элементов, до минеральных агрегатов, парагенезисов, ассоциаций, комплексов;

3) **закон инерции - минералогической «памяти» - в процессе изменения минеральных систем первичная генетическая информация инерционно сохраняется, локализуясь на каком-либо уровне памяти - морфологическом, структурном, изотопном, молекулярном, магнитном и т.п.** При исследовании анатомии кристаллов удается в эволюции проследить как особенности механизма их кристаллизации, так и роль в них различных твердых, жидких и газовой-жидких включений;

4) **закон минералогического резонанса - «в процессе онтогенеза минерала, являющегося продуктом эволюции минералообразующей среды и отражающего в своей структуре все ее параметры, любое изменение среды вызывает определенное изменение минерала и, естественно, любое изменение минерала**

выражается в минералогической среде». Отсюда вытекают два постулата [10]: первый - «генезис фиксируется в совокупности качеств минералов». Функционирование структурных и информационных взаимосвязей, наряду с вещественными и энергетическими, позволяет рассматривать процессы минералообразования с кибернетической точки зрения; второй - «познание генезиса минералов есть познание его качеств», что определяет потенциальную возможность расшифровки минералогической информации в результате целенаправленного исследования. Выделяется несколько типов резонанса минералов в изменении среды: а) конституционный (морфологический, структурный, химический); б) качественный или резонанс свойств (гравитационных, электрических, магнитных, оптических, механических и т.п.);

5) специальные законы для изучения минералогической информации, отражающие «смысл» информации и длительность (геологическую) времени ее функционирования: а) минералогического резонанса; б) обязательного наличия генетической информации в минерале; в) многообразия форм записи генетической информации; г) сложения генетической информации; д) вытеснения первичной информации информацией из наложенных процессов; е) инерции в приложении к информации.

Эти законы определяют суть и содержание генетикоинформационной минералогии, обеспечивающей онтогенетический анализ объекта исследований [5], в т.ч. и в связи с технологией переработки ПИ. Непосредственно наблюдать сам процесс минералообразования невозможно [10], но по его результатам за счет выявления генетической информации по тем или иным признакам минералов создается ретроспективная модель с выявлением материальных признаков генетических событий во временной последовательности. *Индивиды как реальные физические тела геологических образований отличаются специфическими особенностями кристаллохимии, строго индивидуальной морфологией, анатомией, реакцией на изменения внешней среды, способностью к саморегуляции структуры. Специфичность и динамичность структуры индивида, сложность и разнообразие функций позволяют рассматривать его как сложный организм [11]. Теоретические основы учения об онтогенезе предполагают, что генезис руд (ПИ) проявляется в качествах минералов — минерогенетических признаках, «записанных в конституции, морфологии и свойствах минеральных индивидов и агрегатов» [1]. Расшифровка его состоит в познании этих качеств - телесном воплощении генезиса минералов [10]. Познавая генезис минералов, следует учитывать совокупность трех позиций: собственно образование (зарождение→рост→изменение, вплоть до уничтожения), способ образования (физико-химический механизм генезиса: свободная кристаллизация, перекристаллизация, метасоматическое образование, раскристаллизация гелей и т.д.) и геологический процесс (магматический, гидротермальный и др.).*

Внедрение в практику минерало-технологической оценки ПИ учения Д.П. Григорьева об онтогенезе минералов позволило глубже понять как природу становления, так и изменения ТСМ. Именно онтогенетический подход с учетом данных технологического эксперимента, обеспечивает [12-14]:

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. В конечном итоге особенности раскрытия минералов характеризуют 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 – особенностей неоднородности состава и свойств мономинеральных зерен (выявляются при комплексном минералогическом анализе анатомии индивидов и измельченных частиц), исследованием 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 (минерало) - технологическом картировании типов и сортов ПИ, их всесторонней минерало-технологической характеристики.

Это позволяет определять направленность природных процессов минералообразования и их роль в формировании основных вещественно-технологических характеристиках ПИ различного генезиса. **Таким образом, опираясь на исследования особенностей вещественного состава, текстурно-структурных признаков, физико-механических и физико-химических свойств ПИ различных генетических типов; законы минералогии – информационные, резонанса, инерции; учитывая взаимосвязи и во многом подобие между процессами минералообразования (преобразования) в Природе и Технологии; данные технологических экспериментов, мы формируем наши представления о ТСМ.** При этом следует иметь в виду, что «жизнь», начатая в геологических процессах, **продолжается в технологических аппаратах. Это отражает двойную природу ТСМ** [12]: с одной стороны, они определяются взаимосвязью с генезисом, конституцией и морфологией, с другой – изменениями морфологии, конституции минералов и, как следствие, природных свойств их при рудоподготовке и обогащении (в цепи МПИ → обогатительная фабрика → хвостохранилище). Здесь и появляется возможность получить прямую информацию о **технологической онтогенезе (ТО) - генезисе технологической «жизни» минералов - минеральных обломочных малых частиц (ОМЧ)** по данным изменчивости первичной морфологии и особенностей их кристаллохимии. Причем, надо иметь в виду, что длительность природных процессов, которые формируют ТСМ, до установления термодинамического равновесия исчисляется тысячелетиями. **Быстро же текущие технологические процессы, обусловленные производительностью аппаратов, интенсивно разрушая естественную информационную структуру минерала, медленнее пере-**

дают ее новым продуктам процессов в более или менее сохранившемся виде. Согласно принципу наследования структурных, вещественных и морфологических признаков минералов, их ТС (плотностные, магнитные, полупроводниковые, люминесцентные, флотационные и др.) потенциально проявляются в различных эволюционных рядах минералов (ассоциаций), отражающих непрерывное направленное развитие процессов минерагенезиса (результат взаимодействия в различных энергетических полях минералов со средой). Этот принцип важно учитывать при разработке технологических схем, управлении ими и модифицировании минералов.

Известно, что в процессах минералообразования и преобразования всегда физика управляет химией. Поэтому, Д.П. Григорьев [1] подчеркивал, что, познавая генезис минералов, как в природе, так и технологии, мы можем подойти к возможному рациональному использованию МС. **Исследуя морфологию, особенности конституции индивидов и агрегатов рудных минералов, сростаний с другими минералами важно выразить телесно изменчивость и эволюцию их ТС и признаков с использованием комплекса современных методов анализа:** визуализации изображений, 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, люминесцентный, радиографический, рентгеноспектральный, микронзондовый (протонный), термобарогеохимический и др. **Это позволит в конечном итоге глубже проникнуть в природу этих свойств, определить степень их контрастности при сепарации, возможности управления процессами обогащения, предложить методы селективного выделения минералов с использованием новых систем рудоподготовки и обогащения ПИ.** Обработка полученной информации с помощью компьютера при выявлении тонких особенностей конституции минералов, а также детальное изучение минеральных ассоциаций, закономерностей изменчивости минералов в морфолого-структурном ряду с учетом технологических данных; получение информации об онтогении и типоморфных признаках и свойствах минералов позволяет корректно оценивать обогатимость рудных и нерудных ПИ.

Рассматривая конституцию минералов как взаимосвязанные химический состав и структуру важно придать понятию наряду с химическим четкий физический смысл [1]. Это даст возможность выразить те или иные особенности неоднородности химического состава и кристаллической структуры минералов различных порядков в **анатомии реальных кристаллов и частиц** (зональность, секториальность и мозаичность), 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 при этом учесть различные по составу включения, поры, трещины, покрытие индивидов адсорбционным слоем, различные пленки, синтаксию, эпитаксию и др. особенности. Следует также иметь в виду, что она отражает историю их роста, неоднократную смену габитуса, трансформацию скелетного роста в полногранный и наоборот. Важно выявить и проследить особенности изменений, связанные с этапами их син- и эпигенетического метаморфизма Руд. **При этом анатомия может быть существенно преобразована в процессе изменения и разрушения минералов за счет внешнего энергетического воздействия** ТСМ, являющиеся физической основой процессов сепарации при обогащении, тесно связаны генезисом руд (добавляются новые качества за счет техногенных преобразований), но в одном случае эта зависимость прямая, а в другом - посредством конституции [1]. **Такая взаимосвязь прослеживается постоянно на всех стадиях обогащения руд: текстуры и структуры минеральных сростаний (онтогения агрегатов), характер сростания рудных и нерудных минералов (взаимные проникновения, морфология и характер границ сростания, величина сил сцепления) предопределяют эффективность дробления и измельчения руд, а такие процессы обогащения, как флотация, существенно зависят от морфологии, распределения химических примесей, включений, дислокаций, деформаций, электрофизических свойств индивидов (тип проводимости, концентрация электронов и др.).** Важно учитывать, какие признаки и как проявят себя в различных стадиях схем и технологических процессах в целом, отражая характер преобразований. **Особое место в оценке ТСМ полезных ископаемых принадлежит заключительным этапам минерагенеза, фрагментарно «замораживающих» информацию в морфолого-структурных и конституционных количественных параметрах (прежде всего, в сростаниях минералов, позволяющих оценивать эффективность их раскрытия при измельчении).** В организации системы рудоподготовки и выбора наиболее эффективных методов сепарации ПИ важна оценка морфолого-структурных признаков и свойств минералов, определяющих минералоготехнологические особенности типов и сортов руд по глубине и экономичности их переработки. Например, изучение кристаллов (зерен) магнетита в рудах различных генетических типов позволяет выявить особенности их морфологии и анатомии. Прежде всего необходимо проследить изменчивость основных габитусных форм. Колебания физико-химической обстановки приводит к неоднократной смене габитуса минерала, отраженных формулой [14]:

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

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 эпитаксиальные нарастания слюды, хлоритов на магнетит и т.д. В железистых кварцитах магнетитовых разновидностей морфология магнетитов в значительной степени определяется динамикой процессов метаморфизма: сочетанием перекристаллизации с катаклизмом - с проявлением пликативной и дизъюнктивной тектоники (рис. 1).

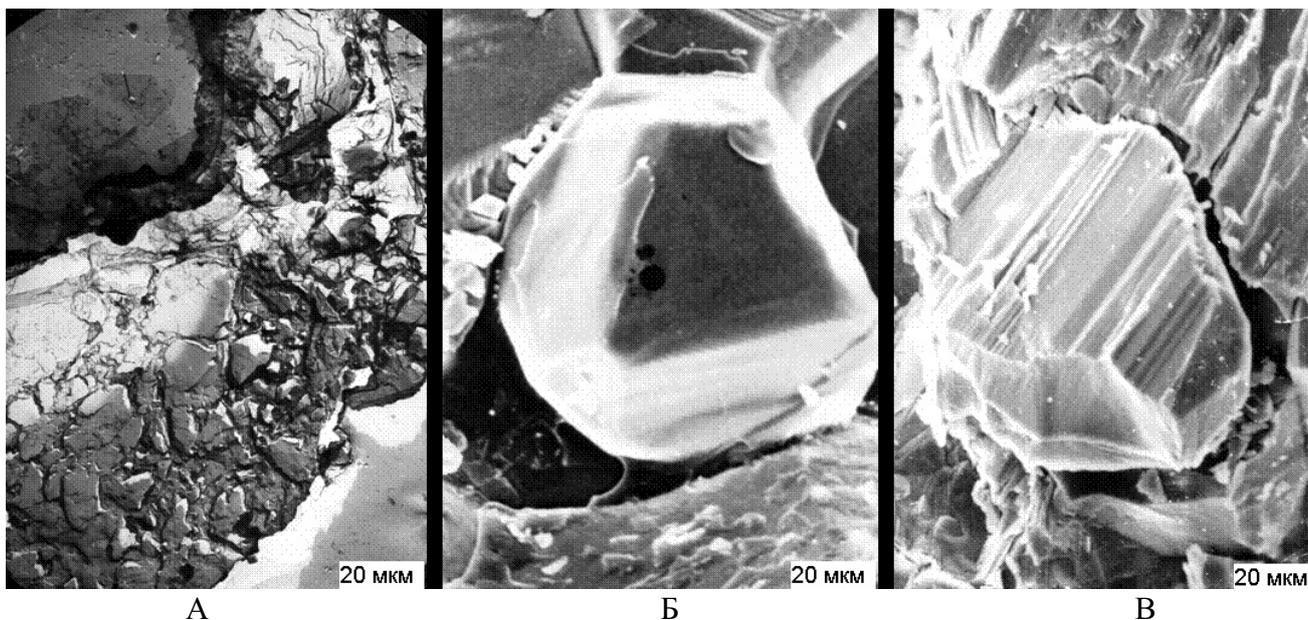


Рис. 1. Морфолого-структурные особенности магнетитов кварцитов по данным РЭМ. А – раздробленный кристалл в контакте с кварцем (ЮГОК, Кривой Рог), Б и В – в разной степени искаженные кристаллы в контакте с кварцем и амфиболом Б (ЛебГОК, КМА) и В (ИнГОК, Кривой Рог)

На контактах кристаллов четко просматривается щель (шов), которая облегчает раскрытие минералов при измельчении и учитывается нами в оценке срастаний минералов [14]. Ширина шва в зависимости от генезиса срастаний – последовательности образования, симметрии, морфологии границ, неоднородности, микротвердости сосуществующих минералов изменяется для разных типов срастаний в широких пределах, предопределяя характер раскрытия. Эволюция форм при этом от фации зеленых сланцев к амфиболитовой и гранулитовой связана с переходом от форм октаэдра $\{111\}$ к комбинациям с кубом $\{100\}$, ромбододекаэдром $\{110\}$ и даже куба с ромбододекаэдром. В фации зеленых сланцевой нередко наблюдается искажение октаэдра магнетита с внешней симметрии вплоть до псевдомоноклинной и псевдотриклинной. Это обусловлено проявлением стресса. В зонах же интенсивного давления возникают простые шпинелевые двойники по $[111]$, обычно уплощенные параллельно (111) , а также полисинтетические двойники. К особым формам искажения следует отнести скалывание вершин октаэдров, а также сглаживание ребер и вершин при растворении. Нередко при этом кристаллы приобретают округлость. Все это в конечном итоге сказывается на доменной структуре минерала, а, как следствие, на магнитных свойствах (магнитной жесткости, коэрцитивной силе и др.). *Весьма важную информацию об особенностях онтогенеза магнетита несет анатомия индивидов.* На рис. 2 показана анатомические срезы зерен магнетита различной степени идиоформизма с включениями кварца.

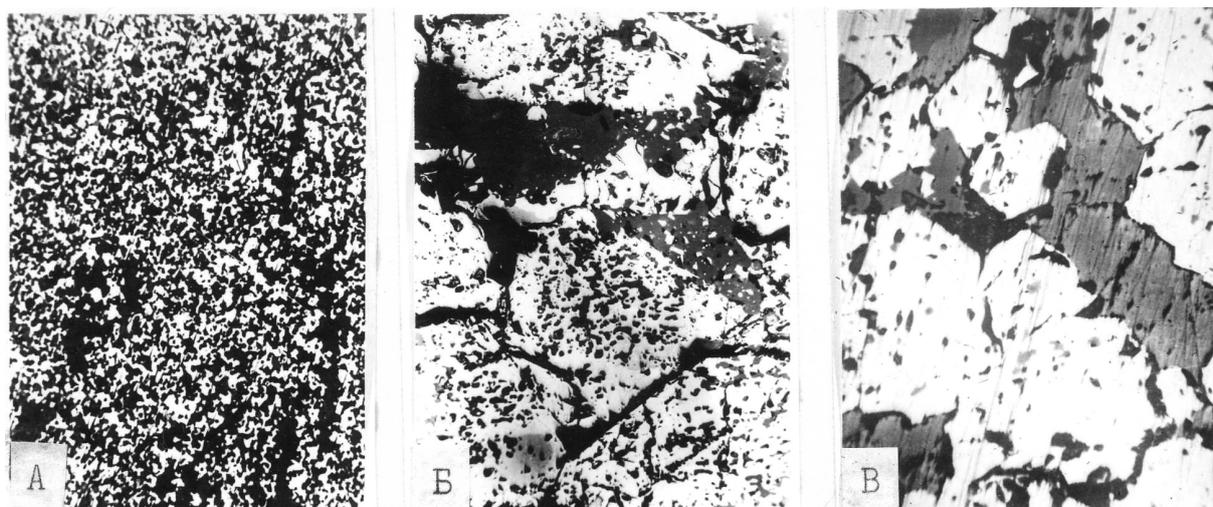


Рис. 2. Анатомические срезы зерен ксено- и идиобластов магнетита железистых кварцитов фации зеленых сланцев Скелеватского месторождения (Кривой Рог, ЮГОК). Свет отраженный: белое – магнетит, черное и серое – кварц, николи II, увеличение 100

Качество концентрата при крупности измельчения руды до 95% класса – 74 мкм изменяется по содержанию Fe в ряду; 58,1% (А)→63,8% (Б) →67,8% (В). Исследование на микроскопическом уровне в слоистых железистых кварцитах по специальной методике [17] текстурных изображений минералов (магнетит, кварц, карбонат, силикат) позволило установить, что выделения индивидов не представляют ярко выраженных слоистых мотивов, фиксируемых при визуальных наблюдениях. Обычно это скопление рудных фаз морфолого-структурных особенностей минералов, трассирующие слоистые структурные мотивы железистых кварцитов, весьма разнообразны по внутреннему строению, обладая симметрией более высоких порядков, чем L2. Заметна агрегатная симметрия (сростки минеральных индивидов) с элементами симметрии L4, L3, L6, L ∞ . В этом же направлении при измельчении ухудшаются показатели раскрытия рудной фазы и снижается содержание Fe в концентрате. Сочетание перекристаллизации и микроскладчатости в условиях анизотропии давления в толщах железистых кварцитов предопределило разнообразие морфолого-структурных особенностей минералов, анизотропию различных физико-механических свойств, связанную с определенной микросредой в каждом слое кварцитов - рудном, смешанном, нерудном. При этом нередко происходило существенное изменение симметрии среды, а в конечном итоге, морфологии индивидов и агрегатов различных минералов, и, как следствие, технологических характеристик. Это хорошо просматривается на анатомическом срезе магнетитовых кварцитов (рис. 3) МГОКа (КМА).

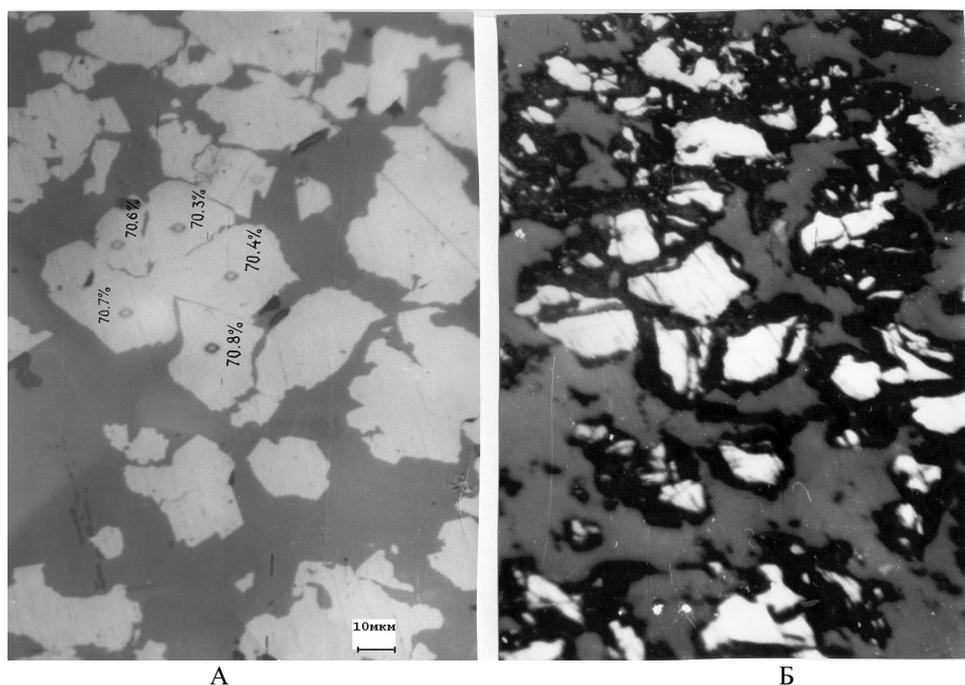


Рис. 3. Разделение индивидов (зерен) магнетита на части в участках микроскладчатости. МГОК, КМА. Свет отраженный. Николи // (белое – магнетит, серое и черное – кварц). А – без травления, Б – протравлено HCl. (Fe=70,3%...по микрондовому анализу)

Здесь проявляется **природная ТО** заключительного этапа кристаллизации при щелочном метасоматозе. Она приводит к существенному изменению магнитных свойств минерала и, прежде всего, его остаточной намагниченности - коэрцитивной силы (НС), которая изменяется с 50-70 до 150-200 единиц, что в условиях обогащения на ОФ достигает 300-370 единиц. Это приводит к повышенной флокулируемости концентратов и хвостов, т.к. при измельчении кварцитов резко увеличивается количество заряженных ОМЧ магнетита, кварца и других минералов, формирующих техногенные агрегаты этих частиц (рис. 4).

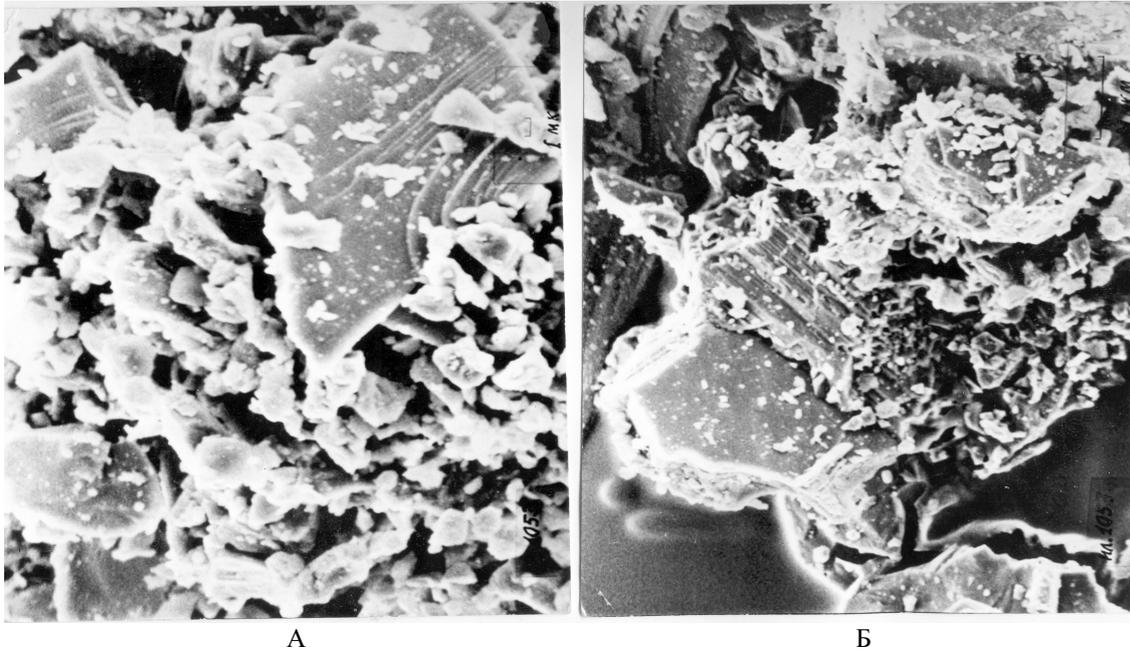


Рис. 4. Флокулы ОМЧ ОФ МГОКа: А – крупные частицы кварца в концентрате размером 30-50 мкм, окруженные мелкими и тонкими частицами (20 -3 мкм) магнетита; Б – частицы гематита и мартитизированного магнетита 20-30 мкм во флокулах хвостов, окруженные короной тонких частиц 3-5 мкм и менее ОМЧ кварца, эгирина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

Разнообразие внешних форм магнетитов в железных рудах различного генезиса по онтогеническим наблюдениям возрастает от карбонатитов к гидротермальным контактово-метасоматическим процессам минералообразования с проявлением плоско - и кривогранных форм. Каждый из таких кристаллов в свою очередь представлен совершенными и скелетно-блоковыми подтипами. Чем крупнее кристаллы, тем чаще на них проявляются элементы растворения. С другой стороны, во всех генетических типах железных руд мелкие (>1-2 мм) октаэдры магнетита плоскогранны, нередко с зеркально-гладкими поверхностями, содержат меньше примесей. На гранях, как правило, отсутствуют скульптуры роста и растворения. Наиболее несовершенны крупные кристаллы, скульптура поверхностей граней сложная, рельеф глубокий и неоднородный даже в одной грани. В разных типах руд магнетит образует простые и сложные двойники срастания и прорастания. Сложные двойники срастания образуют циклические разорванные тройники и пятерники, пирамидальные четверники и пятерники, а также пятерники прорастания. Двойникование - результат скелетного роста кристаллов [14]. 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 срастаний магнетита с гематитом, сульфидами, нерудными минералами, как это рассмотрено нами и другими исследователями ранее [14, 18, 19]. *Выявление на месторождениях руд с интенсивным двойникованием имеет принципиальное значение: осложняются процессы магнитной сепарации измельченных частиц, возрастает их флокулируемость и ухудшается качество концентрата за счет захвата нерудных частиц.*

Чтобы учесть при онтогеническом анализе динамику изменения ТСМ (в целом ПИ) за счет внешнего энергетического воздействия, в том числе направленного на повышение степени их контрастности в технологическом режиме, необходимо учитывать, что ТСМ формируются в широком природно-технологическом гранулометрическом спектре ЕГТС как на стадии рудоподготовки, так и в различных узлах схемы обогащения. Ведущим фактором здесь выступает, прежде всего, крупность измельчения руд. Как отмечал В.И. Ревнивцев [2], 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 мм она увеличивается уже на 4 порядка (преодолевается качественный барьер). Именно эти изменения связаны с вовлечением все большего количества «труднообогатимых руд» с неблагоприятными характеристиками: тонкозернистые со сложными срастаниями минералов и текстурами, обогащаемые с большим количеством шламов (частицы < 20-10 мкм), не имеющих эффективных методов обогащения. И здесь очень важен онтогенический подход к оценке технологических особенностей минералов: «только учет генезиса кристалла, всей эволюции его образования и характера возникающих в ходе этой эволюции несовершенств (дефектов) его структуры может дать объективное представление о его реальных

технологических свойствах. Именно различием генезиса может быть объяснен тот факт, что одни и те же минералы из разных месторождений или даже участков одного и того же месторождения ведут себя при обогащении по-разному» [2]. Он обращает внимание на тот факт, что ТСМ, формирующиеся еще при их зарождении, изменяются на протяжении всего периода существования минералов в соответствии с эволюцией физико-химических и термодинамических условий, характерных для определенных зон рудного тела: характером магматизма, интенсивностью тектонической деятельности, особенностями состава рудообразующих растворов и многими другими геологическими факторами. Существенные изменения связаны с конституцией минералов. Так, наши исследования обогатимости Fe руд различных генетических типов [14] показали, что изменения в структуре связаны, прежде всего, с морфотропными изменениями в ряду: **вюстит Fm3m – магнетит Fd3m – маггемит P42212 – гематит R 3c**. Окислительно-восстановительные процессы перехода магнетита в вюстит или маггемит (далее в гематит – мартит) с существенными объемными изменениями в природных и промышленных условиях проявляются на фоне симметричных преобразований [20]. 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. Оба явления весьма существенно проявлены в железистых кварцитах Михайловского месторождения КМА. Это четко прослеживается в изменении величины полной удельной поверхности (уд. п) магнетитового концентрата по зональности толщи кварцитов (крупность измельчения 95% класса < 44 мкм) - от существенно магнетитовых с силикатами и пиритом до гематит-магнетитовых (1- Fe= 65,8% и уд. п.= 1788 м²/ кг; 2 – 65,3 и 1407; 3 – 66,0 и 1200).

Сегодня, когда объектом изучения становятся все более бедные руды, разнообразные отходы обогащения и металлургии со сложным вещественным составом, возникает потребность в более тонких методах исследований, и принципиально новых технологических решениях. Поэтому в оценке техногенной онтогении ПИ важно иметь данные прямых технологических экспериментов. В связи с этим Ю.С. Кушпаренко предлагает проводить более глубокое изучение руд в рамках развиваемого им **нового научного направления – минералогической технологии** [21]: обеспечивать определение количественных значений параметров вещественного состава технологическими методами (химическими, основными и вспомогательными в различных сочетаниях обогатительными). Это касается сложных, мелко- и тонковкрапленных руд, трудно диагностируемых, прежде всего минералогическими методами. Дополняя прямые минералогические наблюдения, предлагаемая методика позволяет получить полную информацию по раскрываемости тонкодисперсных минералов. В частности, доказано, что с использованием гидравлической классификации минеральной смеси одной крупности (при равенстве и постоянстве плотностей) разделение будет происходить только по плотности зерен и количество осевшего в крупную фракцию каждого минерала при полном раскрытии их взаимных сростаний будет зависеть лишь от его плотности, а при неполном – от плотности и полноты раскрытия. Ю.С. Кушпаренко теоретически обоснованы (на примере технологической оценки обогатимости Sn и Ta-Nb руд) 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. Им доказана эффективность тонкого грохочения в схемах обогащения руд с тяжелыми ценными тонковкрапленными минералами, позволяющего снизить их переизмельчение, нагрузку на мельницы, улучшить процесс обогащения шламowego 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 и исследований по онтогении минералов позволяет более глубоко оценивать эволюцию ТСМ.

В качестве важной проблемы ТМ В.И. Ревнивцев рассматривает [22-23] разнообразные подходы к изменению ТСМ с целью повышения эффективности их извлечения (обжиг при изменении магнитных свойств минералов окисленных железных руд, энергетические воздействия в связи с изменением степени дефектности структур и характера свойств поверхности К-полевых шпатов в связи с эффективностью их флотационного разделения в ассоциации с плагиоклазами и др). Таким образом, учет закономерностей эволюции ТСМ и руд с учетом геологических факторов (обеспечение избирательности измельчения руд) позволил при ГТК не только фиксировать обогатимость различных участков рудного тела, но и прогнозировать их. В конечном итоге, известный принцип обогатителей «не дробить ничего лишнего» превращается в принцип «не обогащать ничего лишнего». Дальнейшее развитие идей В.И. Ревнивцева пошло в направлении разработки методологии и теоретических основ ТМ, выявления минералогических особенностей руд различных генетических типов 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 [14]. 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 характерно для минералов техногенных МПИ [24-25 и др.]. Все эти особенности ПИ необходимо учитывать при их минералого-технологическом изучении.

Исследования эволюции ТСМ и поведения техногенных фаз позволяют говорить о двух основных механизмах изменений, как это уже подчеркивалось выше, - полиморфном и изоморфном [26]. 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, как показано выше для Fe руд. Г.И. Дементьева и Ю.М. Смирнов [26] 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 [27]. 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 (например, магнетитовых концентратов из руд Ковдора и др.). Четко просматривается взаимосвязь явлений полиморфизма и изоморфизма в приведенном выше морфотропном ряду оксидов Fe. Несомненно, оба явления 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 [14,18 и др.]. Например, появление слоистых силикатов (талк, хлорит, слюды) от десятых долей до первых процентов, нередко образующих эпитакаические сростания с основными рудными минералами, отрицательно сказывается на флотационных свойствах рудных минералов из скарных W-Mo руд. В Fe-P рудах появление 0,5-1,5% гипса подавляет флотацию апатита и т.д.

Техногенная онтогенез (ТО) минеральных преобразований четко просматривается еще на заключительной стадии процессов минералообразования, как это можно видеть на рис. 3 по магнетиту Михайловского месторождения МГОКа. Причем несовершенства кристаллической структуры существенно влияют на ТСМ, особенно полупроводников (образование дефектов и др). Это детально исследовалось в работах В.И. Ревнивцева. На примере изучения минералов с совершенной структурой кварца и полевого шпата им было показано, что их ТС являются суперпозицией свойств, определяемых конституцией и характерными дефектами кристаллической решетки. Причем, для некоторых структурно-чувствительных свойств, определяющих их поведение при радиометрическом обогащении, флотации, магнитной и электрической сепарации, последние являются решающими. Им сформулирован феноменологический подход к использованию направленной генерации характерных дефектов для избирательного изменения ТСМ.

Сегодня в ТМ широко используются данные 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 временной кинетике их протекания и реакций [14]. Успешно развиваются новые идеи совершенствования процессов раскрытия минералов; комплексного изучения МС с использованием современных физико-химических методов анализа с выявлением техногенных ОП и ТСМ; возможностями их направленного изменения для управления технологическими процессами. 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 ГТК 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, фазового состава минеральных ассоциаций и микропарагенезисов основных рудных и нерудных минералов, кристалломорфологию, гранулометрию - особенности технологических схем и показатели обогащения ПИ.

В развитии ЕГТС важен учет иерархической систематики дискретного состояния вещества [28-29] в ряду образований: **минерал → микроминерал → квазикристаллы → фуллерены → аморфное вещество → коллоиды → наночастицы → кластеры.** Это позволит по-новому подойти к минералого-технологической оценке комплексности, экологичности ПИ и отходов, разработке нестандартных методов их оценки, технологии добычи и обогащения; обеспечить разработку экономо-экологических технологий получения новых

нетрадиционных видов сырья (цеолиты, сапонит, полевые шпаты, дистен, гранаты и др.), постоянно расширяя области их применения [30 и др.].

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 с 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** [29, 31-33]. Существенно возрастает осознание роли поверхностей или приповерхностной области *S* наноминерального вещества [31-32]. Высокая степень поверхности (площади поверхности) обеспечивает весьма специфические характеристики сепарируемым минералам, которые и обуславливают непредсказуемый потенциал нанотехнологиям, в т.ч. и в процессах обогащения. Это связано с проявлением необычных физических, химических и механических свойств наноминералов, изменяющих кинетические и динамические характеристики. Для нанобъектов характерно другое время протекания процессов и явлений: в силу особых физико-химических и геометрических характеристик возрастает «быстродействие». По мнению О.Б. Котовой [32], временная зависимость параметров системы частиц и случайный характер их образования предполагает наличие дуализма наносистем. 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. Огромные возможности энергии поверхностных процессов просматриваются в адсорбифизических методах сепарации, базирующихся на исследованиях кристаллохимических и кристаллофизических процессов в гетерогенных системах под влиянием различных воздействий. Серия методов направленного изменения технологических свойств обеспечивает повышение эффективности технологий их обогащения, прежде всего, нанотехнологий. Однако, онтогенетические исследования в этом направлении только начинаются. В настоящее время эффективно используются многие приемы ТМ, в т.ч. на онтогенетической основе, при изучении вещественного состава руд и различных нетрадиционных видов МС в связи с разработкой нанотехнологий по извлечению полезных компонентов (Au, Pt, сульфиды, минералы глин, цеолитов и др.).

В заключение необходимо подчеркнуть, что высокий научно-теоретический потенциал учения об онтогении минералов дает геологам, минералогам и технологам новый подход в решении проблемы выявления и оценки ТМС различных видов МС. Оно является ключом не только к пониманию природно-техногенной их характеристики, но и позволяет на минералог-генетической основе того ли иного ПИ, подкрепленной данными прямых технологических экспериментов, проследить изменчивость эволюции системы *МПИ* → *обогажительная фабрика* → *хвостохранилище* → *отвалы*, обеспечивая ее комплексную оценку, управление и прогноз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев Д.П., Жабин А.Г. Онтогения минералов. М., 1975, 340 с.
2. Ревнивцев В.И. Роль технологической минералогии в обогащении полезных ископаемых // ЗВМО. 1982. вып. 4. С. 4-20.
3. Юшкин Н.П. Теория и методы минералогии. Л., 1977. 291 с.
4. Юшкин Н.П. Практическое значение онтогении минералов // ЗВМО, 1980, в. 4, с. 385-395.
5. Юшкин Н.П. Теоретические и методические основы расшифровки генетической информации, содержащейся в минералах. // Новые идеи в генетич. минералог. Л.: Наука, 1983. С. 38-47.
6. Юшкин Н.П., Хомяков А.П., Евзикова Н.З. Принцип наследования в минералогенезисе. Сыктывкар: Препринт, 1984. Вып. 93. 32 с.
7. Павлишин В.И., Юшкин Н.П., Попов В.А. Онтогенетический метод в минералогии. Киев: Наукова Думка, 1988. 120 с.
8. Жабин А.Г. Стадиальный анализ в генетической минералогии // Исследование рудообразующих систем. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1981. С. 45-55.
9. Жабин А.Г. Онтогения минералов. Агрегаты. М.: Наука, 1979. 276 с.
10. Григорьев Д.П. Позиции онтогении минералов // ЗВМО. 1978. Ч. 107. Вып. 4. С. 407-415.
11. Пирогов Б.И. Роль минералогических исследований в обогащении руд // Минерал. Журнал. 1982. №1. С. 81-92.
12. Пирогов Б.И. Онтогенетический метод в познании технологических свойств минералов // Проблемы онтогении минералов. Л.: Наука, 1985. С.22-30
13. Пирогов Б.И., Поротов Г.С., Холошин И.В., Тарасенко В.Н. Технологическая минералогия железных руд. Л.: Наука, 1988. 304 с.
14. Онтогения минералов и технологическая минералогия / отв.ред. Мельник Ю П. Киев: Наук. Думка, 1988. 228 с.
15. Руденко С.А., Иванов М.А., Романов В.А. Метаморфизм минералов – важное явление в истории их формирования // ЗВМО. 1978. № 6. С. 698-710.

16. *Индутный В.В., Пирогов Б.И.* Опыт количественной оценки онтогенической характеристики руд Кривого Рога // ЗВМО. 1990. Ч. 119. Вып. 4. С.94-99.
17. *Изоитко В.М.* Технологическая минералогия и оценка руд. СПб.: Наука, 1997. 582 с.
18. *Ревнивцев В.И.* Рудоподготовка как новое направление горных наук // Основные направления развития техники и технологии обогащения ПИ. Л., 1983. С. 3-22.
19. *Дымкин А.М., Пермьяков А.А.* Онтогения магнетита. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1984. 188 с.
20. *Куштаренко Ю.С.* Минералогическая технология – новое направление изучения вещественного состава минерального сырья. М.: РИЦ «ВИМС»а, 1997. 40 с.
21. *Ревнивцев В.И., Гапонов Г.В., Зарогатский Л.П.* и др. Селективное разрушение минералов. М.: Недра, 1988. 286 с.
22. *Ревнивцев В.И., Доливо-Добровольская Г.И., Владимиров П.С.* Технологическая минералогия обломочных малых частиц. СПб.: Наука, 1993. 248 с.
23. *Шмакин Б.М., Коваль П.В.* Экологическая минералогия: содержание, методы и место в обогатительном процессе. // Роль минералог. исслед. в решении эколог. проблем (теория, практика, перспективы развития). СПб.: Мин. об-во при РАН, 2002. С.195-196.
24. *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.
25. *Дементьева Г.И., Смирнов Ю.М.* Изоморфные и полиморфные превращения минералов в техногенезе // Обогащение руд. 1988. № 3. С. 34-37.
26. *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.
27. *Туресебеков А.Х., Конеев Р.И., Каширский С.А., Ахмедов А.М.* Дискретное состояние вещества в рудных и техногенных системах // Минералогическое общество и минералогическая наука на пороге XXI века. СПб.: Мин. об-во при РАН, 1999. С. 174-175.
28. *Конеев Р.И.* Наноминералогия золота. СПб.: DELTA, 2006. 220 с.
29. *Щитцов В.В.* Технологическая минералогия промышленных минералов Карелии // Минералогия, петрология и минерагения докембрийских комплексов Карелии. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2007. С. 119-123.
30. *Остащенко Б. А.* Направленное изменение технологических свойств минералов // Автореф. докт. дис. Сыктывкар: ИГ Коми науч. Центра УрО РАН, 1998. 43 с.
31. *Котова О.Б.* Поверхностные процессы в тонкодисперсных минеральных системах. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 194 с.
32. Направленное изменение физико-химических свойств минералов в процессах обогащения полезных ископаемых // Плаксинские чтения. М.: Альтекс, 2003. 145 с.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ И МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГОРНЫХ ПОРОД ПОД МИКРОСКОПОМ

Войтеховский Ю.Л.

ГИ КНЦ РАН, г. Апатиты

Знание модального состава горной породы или руды весьма важно для решения петрологических и минералого-технологических вопросов. Некогда велись весьма ожесточенные дискуссии о том, какие виды анализа (геометрические под микроскопом или количественно-минералогические с дроблением горной породы и разделением фаз комплексом методов) быстрее ведут к цели и дают более точный результат [1]. Истина оказалась посередине – у каждого подхода нашлись достоинства и недостатки общего порядка и, в особенности, применительно к конкретным горным породам и рудам с их огромным диапазоном составов и структурно-текстурных характеристик. В данной статье коротко обсуждаются истоки модального анализа горных пород под микроскопом, его математические основания и перспективы.

Сегодня модальный анализ горных пород под микроскопом выполняется с помощью анализаторов изображений, в состав которых входят компьютерные системы. Вот наиболее удачные из них: Magiscan, Quantimet, Videolab, System III, Vids II (Великобритания), Videoplan, IBAS, Leitz TAS Plus (ФРГ), Omnimet (ФРГ-США), Pericolor (Франция), Omega (Польша), Robotron (ГДР). Отечественные производители поставляли анализаторы: Свит (ИКИ РАН – Дезинтегратор), Video-Master (ООО “НВП Центр ЭСТАгео”) и МИУ-5м (ЛОМО ЦКБ). Этот немалый список создает иллюзию благополучия и прогресса. Но в рассматриваемом нами аспекте ситуация мало изменилась со времен создания метода. Еще раз подчеркнем, что имеющиеся компьютерные системы позволяют охарактеризовать изображение различными параметрами, мгновенно выполнить сложные математические пересчеты и вывести результаты на печать. Но фундаментальный вопрос состоит в том, насколько характеристики двумерных или одномерных сечений минеральных зерен соответствуют искомым характеристикам реальных зерен для производной горной породы (рис. 1).