

УДК 549:550.8

## РАЗВИТИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ ИДЕЙ АКАДЕМИКА Е. ЛАЗАРЕНКО В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ

**Б. Пирогов**

*Федеральное государственное унитарное предприятие ВИМС, г. Москва, Россия  
E-mail: pirogov\_boris@inbox.Ru*

На конкретных примерах с использованием генетических идей академика Е. Лазаренко рассмотрено особенности поведения минералов и различных полезных ископаемых в единой геолого-техногенной системе. Учтены современные понятия “минерал”, природа формирования и преобразования его технологических свойств на макро-, микро- и наноуровнях. Акцентировано внимание на будущем технологической минералогии в связи с возможностями разных видов направленного изменения технологических свойств минералов.

*Ключевые слова:* минерал, технологическая минералогия, технологические свойства минерала, единая геолого-техногенная система.

Євген Лазаренко – історична постать.  
Його спадщина – невід’ємна частка золотого фонду  
української науки й культури. Вона потребує вивчення,  
а висловлені ним ідеї – втілення у життя  
і подальшого розвитку.  
*О. Матковський, В. Павлишин, 1998 [8]*

Именно наследие и развитие идей Е. Лазаренко, как справедливо отметили его ближайшие ученики и соратники, – важнейшее дело в развитии современных направлений минералогии. Особый вклад он сделал в теорию и практику минералогии XX ст., опираясь на системное регионально-минералогическое изучение Украины, приравнивая его к геологической съемке. Ученый подчеркивал, что без таких исследований невозможно развитие иных направлений минералогии, прежде всего – генетической и прикладной. В основу минералогического метода познания современной минералогии различных объектов земной коры и Земли в целом, дальнейшего ее развития с учетом решения конкретных прикладных задач, как утверждал Е. Лазаренко, должен быть положен генетический принцип. Вслед за основоположником генетической минералогии академиком В. Вернадским он во всех своих исследованиях активно поддерживал и развивал ее динамическую концепцию. Достаточно широко это обсуждалось на симпозиуме УМО “Основные понятия минералогии” (Керчь, 1978) [12]. В докладе “Схема генетической классификации минералов” Е. Лазаренко подчеркивал, что “генезисом минералов определяются особенности их структуры, морфологии, химического состава и физических свойств” (рис. 1).

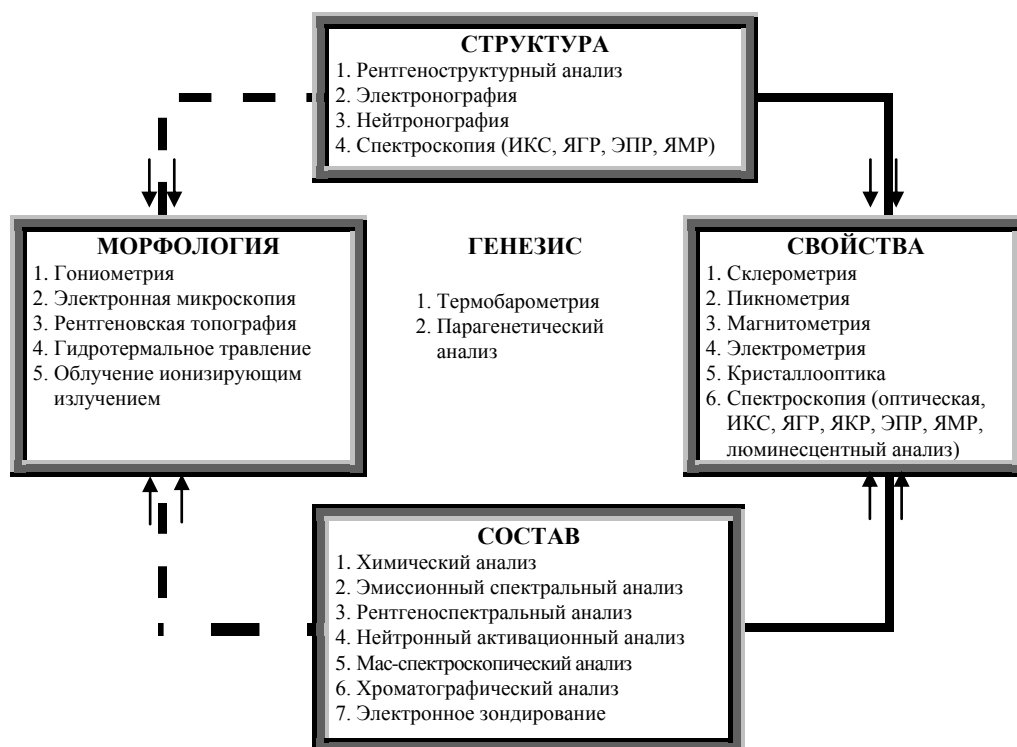


Рис. 1. Соотношение между генезисом минералов и его основными атрибутами [12].

Однако все указанные им атрибуты минерала не являются пассивными по отношению к генезису. «Основные принципы современной минералогии – кристаллохимический и генетический – находятся во взаимодействии и взаимовлиянии. Следовательно, между собой связаны и атрибуты минерала, и его генезис, но все же в этой взаимосвязи и взаимовлиянии главная роль принадлежит генетическим принципам, так как в факторах минералообразования проявляются все кристаллохимические и генетические признаки минералов» [12]. Понимание именно динамики проявления различных атрибутов минерала в связи с его генезисом было положено Евгением Константиновичем в основу генетической классификации.

И, как справедливо он отмечал в более ранней статье (1951), «на генезис минералов следует смотреть не только с позиций общих процессов минералообразования (магматических, эндогенных, гипергенных и т. п.), отражающих не генезис самих минералов, а только условия, в которых они возникают». Ведь генезис следует рассматривать более широко с учетом ряда позиций (как это предлагает Д. Григорьев), характеризующих формирование составных частей любого месторождения – минералов. Широкое представление об условиях формирования минералов лежит в основе генетических представлений Е. Лазаренко – с учетом химического, физического (онтогенетического), физико-химического и геологического (различных процессов и среды минералообразования) типоморфизма минералов. Именно в минералах ученый видел ключ к раскрытию взаимосвязи геологической истории региона и тех их особенностей и минеральных парагенезисов.

незисов, с которыми эта история связана. В конечном итоге это и обусловило развитие им важнейшего направления – регионально-минералогических исследований (топоминералогии) в Украине по определению перспектив и оценки минерально-сырьевой базы страны.

Минералого-технологическое направление в изучении полезных ископаемых (ПИ) Украины получило широкое развитие на основе генетических идей Е. Лазаренко в технологической минералогии (ТМ). Ведь он постоянно подчеркивал, что *будущее минералогии в ее прикладном значении – в увязке с кристаллохимическим и генетическим направлениями*. Методологические основы ТМ руд (в целом ПИ) определены зависимостью технологических свойств минералов (ТСМ) от их конституции и генезиса в единой геолого-техногенной системе (ЕГТС), обуславливающей определенную степень контрастности свойств совместно встречающихся минералов, возможность и целесообразность их изменения под влиянием различных воздействий. Поэтому позиции минералогии в обогащении руд определяются, с одной стороны, зависимостью ТСМ от конституции и генезиса минералов, с другой, – возможностями минералогических, физических и химических методов исследования для их выявления, объяснения, оценки и прогнозирования. Широко применяя аппарат наук о Земле, ТМ неизбежно использует методологию и аппарат физики, химии, физической химии, математики и других естественных наук. При этом особое место отводится технологическому эксперименту в выявлении взаимосвязей с минералогией и генезисом руд (ПИ).

Особо акцентируем, что сегодня среди известных ранее атрибутов в ТМ значимым становится размерный фактор. Это связано с тем, что руды (ПИ) стали более мелко- и тонкозернистыми, а, следовательно, и более труднообогатимыми. В начале XX в., как отмечал В. Ревнивцев [18], верхний предел крупности измельчения составлял 1 мм, в 30-е годы – 100 мкм, сегодня – 50 мкм (для многих руд, так как изменились их текстуры и структуры). Соответственно, изменилась суммарная поверхность измельченной руды: возросла на два порядка при переходе 1 мм–100 мкм, а при снижении линейных размеров зерен измельченной руды до 10 мкм она увеличивается на четыре порядка (преодолевается качественный барьер). Это связано и с вовлечением в эксплуатацию труднообогатимых руд. К сожалению, обогатительная техника пока не успевает за динамикой ухудшения текстурно-структурных особенностей руд.

Среди признаков труднообогатимых руд следует рассматривать такие:

- гетерогенность текстурно-структурных особенностей и собственно минералов;
- недостаточную контрастность физических и (или) физико-химических свойств срастающихся (сосуществующих) минералов, обусловленную их генезисом (это определяет целесообразность и необходимость направленного изменения ТСМ);
- тонину рудной минерализации, обуславливающую необходимость мелкого дробления и тонкого измельчения;
- особую роль обломочных малых частиц (ОМЧ), которые формируются как в случае природных процессов минералообразования, так и при техногенных процессах – дроблении и измельчении (определяет аномальность природных и техногенных свойств минералов);
- избирательность изменчивости ТСМ в процессе рудоподготовки и на разных стадиях технологической схемы обогащения за счет различия разнообразных свойств и ха-

- рактических срастающихся минералов (микротвердость, хрупкость, спайность, магнитность и др.);
- возможность получения готовой продукции рудного и нерудного состава на стадии крупнокускового обогащения, что позволяет улучшить раскрываемость сростаний минералов и эффективность сепарации продуктов дробления (измельчения) в основном цикле обогащения руд и в отдельных узлах технологической схемы.

Несомненно, одним из путей решения проблемы переработки труднообогатимых руд является углубленное изучение особенностей их вещественного состава с привлечением широкого комплекса современных физико-химических методов анализа и творческое использование новых знаний в области кристаллохимии, кристаллофизики и минералогии в целом о природе вещества. “Информация о свойствах минерала, основанная на кристаллохимических параметрах его идеализированной структуры, недостаточна для описания поведения реальных кристаллов в процессах обогащения. Только учет генезиса кристалла, всей эволюции его образования и характера возникающих в ходе этой эволюции несовершенств (дефектов) его структуры может дать объективные представления о его реальных технологических свойствах. Именно отличием генезиса может быть объяснен тот факт, что одни и те же минералы из разных месторождений или различных участков одного и того же месторождения ведут себя при обогащении по-разному” [17]. Эти представления четко отражают генетические идеи Е. Лазаренко.

Эволюционные закономерности развития минерального мира во взаимосвязи с живым веществом (минералы и их ассоциации в целом, состав, текстурно-структурные признаки и свойства ПИ, в том числе технологические) формируются в разных энергетических полях (гравитационных, магнитных, электрических и др.) на макро-, микро- и наноуровнях в динамике ЕГТС. Они определяют основные факторы обогатимости с учетом минералого-геохимической и экологической специализации ПИ, отражая круговорот минерального вещества в Природе и Технологии на разных уровнях его организации: индивид (кристалл, зерно) → агрегат → рудное тело → минералогическая аномалия (отвалы пустых пород и некондиционных ПИ, хвостохранилища – нетрадиционные виды минерального сырья, техногенные МПП) → минералогическое поле...

ЕГТС охватывает физическое, вещественное и энергетическое пространство, в котором минерал развивается во взаимосвязи с природной и технологической средами, эволюционирует под действием внешних и внутренних факторов, распадается на системы “минерал”, два типа “сред” и взаимосвязи между ними. Взаимосвязи между минералом и минералогенетической средой следует считать во многом общими и в технологической системе. Их подразделяют [24] на: энергетические, обеспечивающие обмен энергией при структурных преобразованиях индивида; вещественные, связанные с поступлением из среды в индивид, обеспечивающие его рост или, наоборот, разрушение и удаление вещества из минерала в среду; информационные, обеспечивающие передачу особенностей структурной организации вещества и энергии от среды к минералу и обратно.

Опираясь на особенности вещественного состава, текстурно-структурных признаков, физико-механических и физико-химических свойств ПИ различных генетических типов, законы минералогии–инерции–минералогической “памяти”, резонанса, информационные [25], учитывая взаимосвязи и во многом сходство между процессами минералообразования (преобразования) в Природе и Технологии, данные технологических экспериментов, мы формируем наши представления о ТСМ и особенностях их типоморфизма.

ТСМ – плотностные, магнитные, полупроводниковые, люминесцентные, флотационные и другие – являются функцией конституции и генезиса, а потому “жизнь”, начатая в геологических процессах, продолжается в технологических аппаратах. Это отражает двойную природу ТСМ [14] с локализацией информации на разных уровнях минералогической “памяти” – морфологическом, структурном, изотопном, молекулярном, магнитном и т. д. Различия природных и техногенных условий связаны с масштабностью размера, массой, временем, энергией процессов [4]. Причем длительность природных процессов, которые формируют ТСМ, до установления термодинамического равновесия исчисляется тысячелетиями.

Согласно принципу наследования структурных, вещественных и морфологических признаков минералов [26], их ТС потенциально проявляются в различных эволюционных рядах минералов (ассоциаций), отражающих непрерывное направленное развитие процессов минерагенеза (результат взаимодействия в различных энергетических полях минералов со средой). Этот принцип важно учитывать при разработке технологических процессов переработки и модификации минералов, руд, в управлении ими. Однако природные и технологические процессы генетически существенно отличаются по кинетике и реакциям в связи с пространственно-временными закономерностями проявления. В отличие от естественных, технологические процессы, обусловленные производительностью аппаратов, являются быстро текущими. Интенсивно разрушая природную информационную структуру минерала, они медленнее передают ее новым продуктам процессов в более или менее сохранившемся виде, продолжая минерагенез в ТСМ.

В ТМ сегодня основным объектом исследования стал минеральный индивид и продукты его превращения на макро-, микро- и наноуровнях. И тут “онтогенетический метод” позволяет открывать непрерывную смену событий в истории минералов, а не представлять их в течение миллионов лет застывшими, “мертвыми” [3], как это отражено в принципиальной схеме рис. 2.



Рис. 2. Принципиальная схема, которая объясняет временную структуру онтогенетического цикла конкретного минерального образца (Жабин, 1988).

Важно иметь в виду, что история минерала, “начинаясь обязательно с акта зарождения объекта, далее состоит из полного набора событий, когда-либо состоявшихся в “жизни”... ..минеральных тел, индивидов и агрегатов, и не только в природе, а присо-

единя к естественной истории ее продолжение – технологические события в ходе добычи, обработки и переработки минералов, пока не наступит конец” [3]. Причем поведение минералов в системе минерал–среда “мало знать словесно, надо знать телесно” [2]. Нужно также иметь в виду, что особенности онтогении минералов и их типоморфные признаки формируются и изменяются в природном и технологическом спектрах гранулометрии. В конечном итоге это позволяет определять направленность тех или иных процессов минералообразования и их роль в формировании основных материально-технологических характеристик ПИ различного генезиса, в том числе при техногенезе.

При изучении различных видов МС онтогенический метод с учетом технологического эксперимента обеспечивает получение информации о характере превращения вещества, так как “мир представлений о минералах с идеальной структурой может дать только первое приближение к пониманию взаимосвязи реальных причин и следствий в процессе техногенного онтогенеза” [18]. Как только минерал подвергся взрыву (при добыче), дроблению, измельчению (при переработке) и прошел любые виды сепарации, то в нем уже начались значимые изменения различных природных свойств, морфологии, гранулометрии, конституции (кристаллохимии) и т. д. “Вторичные свойства минерала, претерпевшего различного рода воздействия – механические, химические, температурные, радиационные, формируются в результате влияния среды на конституцию минерала. Основным результатом любых воздействий сводится к искажению идеальной структуры, возникновению большего или меньшего числа дефектов, т. е. к созданию дефектной структуры реального кристалла” [18].

Минералогический подход на онтогенической основе при изучении различных видов минерального сырья с учетом технологического эксперимента обеспечивает [15]:

- оценку гетерогенности особенностей конституции (состава и структуры) минералов;
- выбор оптимальных условий для раскрытия зерен полезного компонента, отражая природу сростаний – гранулометрии, форму зерен сростающихся минералов, особенности границ, физико-механических и физико-химических свойств. Как показывают наши наблюдения [22], Т. Юсупова и других исследователей, 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;
- оптимизацию технологического процесса с учетом контрастности свойств разделения минералов, неоднородности состава и свойств мономинеральных зерен (выявляются при комплексном минералогическом анализе анатомии индивидов и измельченных частиц);
- исследование характера и направленности изменений тех или иных качеств минералов (ПИ в целом);
- определение последовательности технологических операций;
- выделение при геолого(минералого)-технологическом картировании типов и сортов ПИ с получением их минералого-технологической характеристики (с отражением эволюции онтогении и типоморфных признаков как минералов, так и в целом ПИ).

Система рудоподготовки предопределяет дезинтеграцию руд, эффективность различных видов сепарации минералов и степень контрастности их свойств.

При оценке изменчивости ТСМ в системе минерал–среда важен механизм превращения минералов (природный и техногенный) – как факторов развития ЕГТС – в технологии при дроблении и измельчении руд. Внимание исследователей перешло на структурный уровень кристаллической решетки с опорой на особенности кристаллохимии и кристаллофизики минералов, учитывая поведение ОМЧ в технологическом процессе. “Уже при дроблении и измельчении руд сказывается структура и текстура минеральных срощений, т. е. онтогенез агрегатов, а также процессы обогащения или переработки, в которых имеет место смачивание, адсорбция, адгезия, растворение или разложение и т. п., серьезно зависят от распределения химических примесей, включений, дислокаций и деформаций и других особенностей индивидов. Предопределяя физико-химические, технические свойства руд, эти качества минералов возникают при кристаллогенезисе и всех других явлениях онтогенеза” [3]. При этом онтогенез, опираясь на сравнительно-исторический метод, позволяет проследить их эволюцию, в том числе изменения.

Исследование эволюции ТСМ и поведения техногенных фаз дают возможность говорить о двух основных механизмах изменения – полиморфном и изоморфном [18]. Наиболее четко оба механизма проявляются в противопоставлении именно в техногенезе с учетом иерархической систематики дискретного состояния вещества в ряду [5] минерал → микроминерал → квазикристаллы → фуллерен → аморфное вещество → коллоиды → наночастицы → кластеры.

В связи с технологическими преобразованиями В. Ревнивцев с соавт. [18] четко проследили особенности преобразований минеральных индивидов по двум направлениям: полиморфным (структурные изменения) и изоморфным (изменение химизма с фазовыми переходами). При полиморфных превращениях вторичные (производные) свойства меняются дискретно монотонно, хотя ход нарастания скорости монотонного изменения может быть медленным или быстрым, длительным или коротким в зависимости от ширины переходной (запрещенной) зоны на энергетической шкале минерала. Монотонность и дискретность являются следствием различных внешних условий среды, в которой происходят изменения (зарождение того или иного уровня дефектоемкости). Зонная модель энергии кристаллической структуры, учет структурных, размерных и временных характеристик дают возможность прогнозировать технологическое поведение минерала, его возможные преобразования, реакционную способность, степень изменчивости свойств. Кратковременное механическое воздействие (удар), мощное лазерное облучение приводят к возникновению новых полиморфных модификаций. Различные воздействия (кроме температурных) искажают кристаллическую решетку и, как правило, снижают симметрию новой модификации. При тепловых воздействиях происходит релаксация уровня дефектоемкости (отжиг дефектов) с повышением симметрии кристалла. Однако при разрушении кристаллов “в активной фазе ОМЧ также происходит релаксация дефектоемкости, дрейф объемных дефектов на поверхность и аннигиляция поверхностных за счет реакции активных поверхностных центров с компонентами внешней среды”. Главная причина полиморфизма [18] – высокий уровень насыщения дефектоемкости, а не *PT*-условия внешней среды. Именно среда порождает и допускает размножение, сохранение или релаксацию дефектов в кристалле. Прыжок структурного перехода в другую модификацию по симметрии связан со скачком в точке фазового перехода за счет превышения порогового значения критической дефектоемкости при монотонно-дискретном ходе, обуславливая скачкообразное изменение физических свойств.

Экспериментально показано, что фазовые переходы могут сопровождаться еще более резким изменением свойств кристаллов. Например, в сильнолегированных полупроводниках наблюдаются как прыжковый переход, так и перкаляционное изменение полупроводимости. Авторы проводили исследования на монокристаллах  $WO_3$ . Интересны также наблюдения в технологии [18] в связи с образованием аморфной фазы. В частности, апатит, обладая высоким уровнем дефектности, отличается частичной аморфизацией структуры и невозможностью образования другой полиморфной модификации. В отличие от кристаллической, его аморфная фаза не обладает свойством организации, что обуславливает пассивность ее ОМЧ. Это позволило авторам сделать вывод о том, что у минералов с узкой переходной зоной и низким структурным критерием механическое воздействие на кристаллическую структуру должно быть дозированным, не доводящим минерал до критического уровня дефектоемкости.

В то же время для минералов с широкой переходной зоной и высоким значением симметричного критерия в зависимости от той или иной полиморфной модификации могут испытывать большую интенсивность воздействия (механического, теплового, радиационного). На примерах рядов сульфидов и оксидов показано, что полиморфные модификации существенно различаются по своим физическим свойствам: плотности, твердости, оптическим характеристикам. Это позволяет фиксировать при измельчении руд превращения магнетит–гематит, сфалерит–вюртцит и др.

Интересны взаимосвязи механизмов изоморфизма и временных закономерностей формирования ТСМ. Механизм нормального изоморфизма не связан с резким изменением энергетики структур, что предопределяет путь монотонного изменения физических свойств минералов при постепенном изменении их химизма.

Более значимое влияние на изменение ТСМ предоставляет аномальный изоморфизм. 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 наноструктурных аморфных веществ и др. [4]. 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 и др.

Определяя тенденции развития минералогии на современном этапе, Н. Юшкин [25] подчеркнул значение интервенции минералогического познания во все области естественного познания, в микромир, развитие таких направлений, как микро- и наноминералогия [10]. Минералогия активно входит в понятия пограничного минерального мира – структурно-конституционные и пространственно-временные. Этому способствует мощный технический прогресс в развитии прямых методов структурных и морфологических исследований, особенно различных видов микроскопии (электронная, туннельная, атомно-силовая), которые позволяют исследовать отдельные атомы и их мельчайшие закономерные группировки. Микромир стал основным источником открытия новых минералов, особенно сульфидов, простых веществ, а также знаний об особенностях превращения минералов в естественной технологии (при рудообразовании).

На основании работ Н. Юшкина, А. Асхабова, В. Таусона, А. Туресебекова, О. Котовой, Р. Конеева, В. Ревнивцева, А. Чантурии и многих других сегодня сформулированы основные положения наноминералогии. Это позволяет по-новому подойти к минера-



лого-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, кианит, гранаты и т. д.), постоянно расширяя области их применения.

С привлечением к обогащению тонкодисперсных видов минерального сырья изменяется привычное представление о ПИ. В технологических схемах все большую роль начинает играть размерный фактор сосуществующих минералов. Наноразмерные технологии предусматривают изучение и внедрение механизмов извлечения ценных компонентов на молекулярном, атомарном, электронном уровнях, когда появляется возможность управлять процессами на уровне формирования ПИ [7, 9, 11, 21].

Современный этап в развитии ТМ отличается необходимостью глубокого комплексного минералого-аналитического и технологического исследования труднообогатимых руд, “для которых традиционная технология первичной обработки малоэффективна. Формируется новая технология рудоподготовки, и хотя обогатительные операции остаются основной составной частью, но вводятся новые элементы технологии и процессы деления не только на уровне минеральных индивидов, но и на других масштабных уровнях” [2]. Одной из значимых причин здесь есть недостаточный уровень контрастности физических и физико-химических свойств сосуществующих минералов различных генетических типов руд.

“Технологические свойства, приобретенные минералами при различных воздействиях, следует рассматривать как динамический процесс суперпозиции конституционных (стандартных) и вторичных (приведенных) свойств, причем первостепенное значение имеет соотношение между поверхностными и объемными дефектами” [18]. Именно здесь сказывается влияние среды за счет вторичного энергетического воздействия (механического, температурного, химического и др.) на конституцию минерала.

В работе [20] на основании анализа современных способов дробления и измельчения руд с позиций теории селективной дезинтеграции сформулировано концепцию селективной дезинтеграции многофазных твердых тел, применение которой в рудоподготовке обеспечило резкий скачок ее эффективности. Акцентируется, что “задача обогащения заключается в отделении неповрежденных зерен полезных компонентов от минералов пустой породы при избирательном расходе энергии только на разрыв межатомных связей вдоль поверхностей их срастаний”. Исследования свидетельствуют, что наиболее полное разрушение материала происходит, если при грубом дроблении упругие и пластические деформации минимальны, а хрупкое разрушение преобладает. В то же время при доизмельчении, наоборот, желательна пластическая деформация, что создает повышенную концентрацию подвижных дефектов, обеспечивающих реакционную способность минеральной шихте. Как показывают наши и другие исследования [15, 18, 22 и др.], особую роль при этом в технологической онтогении играет характер поверхности срастаний, природа которой чрезвычайно важна (тем более что при раскалывании минералов прослеживаются значительные энергетические изменения на фронте взлома).

По данным Х. Румпф (1961), при больших скоростях разрушения в субмикроскопических зонах протяженностью до 1 нм возникает температура, которая намного превышает температуру плавления вещества, а поверхность излома, разрыхления на разную глубину (до 1 нм) находится в квазиаморфном состоянии. При измельчении в различных минералах и разных типах их природных срастаний индуцирование механиче-

ской энергии в тепловую происходит по-разному и зависит как от структурных дефектов, так и от направления фронта взлома. Часть энергии идет на образование структурных дефектов, часть – на увеличение их плотности. Наибольшая тепловая энергия там, где плотность дефектов минимальна, что и предопределяет раскрытие. Поэтому при рудоподготовке важно обеспечить раскрытие – разделение рудных и нерудных минералов максимально по естественным границам индивидов (зерен) с получением минимального количества сростков и тонко переизмельченных частиц. Именно в срастаниях следует оценивать избирательность измельчения минералов. При этом особенно важно учитывать возможность формирования за счет наложенных вторичных процессов “ложных” типов срастаний, когда на границе рудных и нерудных минералов образуются мелкодисперсные продукты их замещения (они значительно ослабляют сцепление между ними и облегчают процесс раскрытия).

Несомненно, предложенная технология может быть использована и в качестве отдельного завершеного цикла дезинтеграции пород и руд, а также как звено в технологической цепи аппаратов. Совместно с технологами мы провели [19] эксперименты по оценке эффективности магнитного обогащения магнетитовых кварцитов Кривого Рога при различных видах измельчения. Предварительно при минералогическом исследовании кварцитов обнаружено преимущественно субидiomорфные, реже ксеноморфные типы срастаний магнетита с кварцем. Изучение гранулярного состава продуктов магнитной сепарации показало, что бесшаровая мельница сухого обогащения позволяет получить практически любую крупность руды в зависимости от применяемого режима. На установке сухого измельчения получено продукты с содержанием 40–54 % класса –0,074 мм. Сравнение гранулярного состава продуктов сухого обогащения и шарового измельчения свидетельствует, что характер распределения классов крупности в обоих случаях одинаков. Однако в первом случае содержание мелких классов (< 0,05 мм) меньше, то есть при шаровом измельчении четче проявляется избирательность измельчения за счет существенной разницы в твердости хрупкого кварца (на два порядка выше магнетита) и пластического магнетита. Содержание Fe в продуктах самоизмельчения во всех классах выше, кроме класса +0,25 мм, который отсутствует при шаровом измельчении. Крупные классы представлены бедными сростками и открытыми нерудными частицами, которые при магнитной сепарации идут в хвосты. Распределение Fe в магнитном продукте сохраняет ту же закономерность, но только с большим разрывом – до 0,05–0 мм. При этом разницы в содержании Fe нет, так как при этой крупности зерна магнетита предельно раскрыты независимо от вида измельчения. Сравнение степени раскрытия магнетита по мере увеличения выхода класса –0,074 мм возрастает прямолинейно как при шаровом измельчении, так и при дроблении, но в последнем варианте она на 4–6 % выше. Микроскопические наблюдения формы зерен открытых рудных частиц по наиболее характерному классу крупности (рис. 3) различных видов измельчения выявили эффективность дробления руд, так как усилия удара при этом сосредоточиваются, главным образом, на границах срастания зерен (индивидов) – октаэдрических плоскостях отдельно магнетита (111), по спайности хлоритов и карбонатов. В конечном итоге выяснено, что при самоизмельчении качество магнитного продукта повышается на 3–4 % по сравнению с шаровым и на 1,0–1,5 % по сравнению с рудногалечным измельчением. Причем прирост содержания Fe в концентратах не меняется и при обогащении измельченных продуктов в промышленных условиях.

Как показано в работе [18], процессы агрегации ОМЧ связаны со снижением уровня энергии в системе ОМЧ и отражают высокую реакционную способность индивидов в момент их образования, представляя собой начальный этап реакций как внутри системы ОМЧ, так и со средой. Нужно помнить, что насыщенность дефектами и большая их концентрация на поверхности приводят к тому, что ОМЧ в их активном состоянии (до перехода через точку инверсии свойств) постоянно взаимодействуют между собой и с частицами других веществ, образуя агрегаты ОМЧ, или подвергаются адсорбции поверхностями более крупных зерен, оказывая значимое влияние на поведение минералов в ЕГТС.

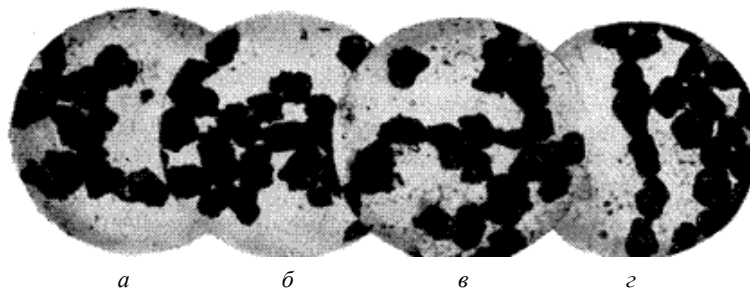


Рис. 3. Морфология открытых частиц магнетита (0,044–0,074 мм), образующихся при различных видах измельчения магнетитовых кварцитов ЦГОК (Глееватское месторождение).

Измельчение: а – шаровое; б – рудногальечное; в – сухое самоизмельчение; г – струйное. Без анализатора,  $\times 110$ .

При этом способность к агрегации и, главное, к их упорядочению коррелирует с ростовыми свойствами минералов – способностью к самоограничению. И, как отмечено в [18], “эта способность связана с наличием в структуре кристаллов цепочек сильных связей – РВС-векторов”.

На рис. 4 показано особенности формирования флокул пироксена и граната с титаномагнетитом в тонких классах различной крупности в магнитном концентрате (Гусевогорское месторождение, Урал). Захват пироксена и граната в магнитную фракцию флокул близок к “октаэдрической” форме. Во флокулах просматривается гранулометрическая дифференциация ОМЧ по классам: более крупные частицы характерны для силикатов (по сравнению с титаномагнетитом). Она отражает, с одной стороны, различный характер микроблоков (за счет мозаичного строения первичных кристаллов) по морфологии и близкий по размеру (0,044–0,074 мм), с другой – различие как в морфологии, так и гранулометрии, особенно титаномагнетита (за счет переизмельчения более крупных микроблоков). Важно подчеркнуть, что в тонких классах концентрата накапливается значительное количество нерудных частиц и очень бедных сростков (25–0 об. %), существенно разубоживая его. Это свидетельствует о целесообразности использования в технологической схеме для повышения качества концентрата размагничивающих гидроциклонов.

В связи с представлениями об эволюции ТСМ в Природе и Технологии основные методы направленного их изменения связаны с “регенерированием” или “залечиванием” дефектов кристаллической решетки на поверхности или в объеме измельченных частиц: 1) механические (особые режимы и приемы измельчения); 2) акустические (ультразвуковая обработка); 3) термические (нагревание и последующее или медленное охлажде-

ние); 4) активация свойств поверхности (блокировка поверхностных центров в физических полях простыми молекулами газовой составляющей, изменение соотношения электронных и дырочных центров различными методами сдвига адсорбционно-десорбционной равновесия, что изменяет условия сепарации частиц за счет поверхностных и объемных изменений [7]); 5) химические изменения (протравливание, обработка реагентами, “легирующими” поверхность примесными ионами); 6) радиационные (облучение рентгеновскими и гамма-лучами, потоками быстрых частиц) [11]; 7) биотехнологические (выявление типов руд различной биотехнологической ориентации на основе исследования тонких особенностей конституции рудных минералов (Яхонтова, 2001)) и др.

*Класс 0,044–0,074 мм*



*Класс –0,044 мм*



Рис. 5. Особенности флокулирования пироксена и граната с титаномагнетитом в классах различной крупности титаномагнетитовых концентратов (Гусевогорское месторождение, Урал): темно-серый – клинопироксен; белый и серый – титаномагнетит (изображение в упругоотраженных электронах). Сканирующий ЭМ JSM-6400, аналитик В.Н.Филиппов (Сыктывкар).

Направленные изменения свойств минералов на макро-, микро- и наноуровнях возможны при воздействии как на сам минерал, так и среду. При различных видах энергетического воздействия с учетом оценки онтогении минералов и типоморфных особенностей ПИ возможно направленно преобразовать их ТС, выбрать оптимальный способ

модификации, целенаправленно изменив контрастность сепарируемых минералов и оптимизировал схему обогащения.

Понимание двойственной природы ТС минералов с учетом их эволюции в гранулометрическом спектре выделений позволяет рассматривать в качестве одного из перспективных направлений обогащения различных видов ПИ с целью повышения эффективности технологических решений *разработку и обоснование способов и методов изменения их природных свойств*. Направленное преобразование свойств минералов может изменять не только обогатимость ПИ, но и создавать новые процессы извлечения как полезных, так и вредных (с позиций экологии) компонентов.

При этом важно учитывать размерные, структурные и временные характеристики минералов в состоянии ОМЧ [18], так как отсутствие такого учета существенно снижает результативность применения многих физико-химических методов анализа минералов, порошковые пробы которых стирают до крупности < 50 мкм. Это же явление имеет принципиальное значение в связи с исследованием поведения ОМЧ минералов в ЕГТС.

Установлено также, что малый объем сильно измельченных частиц обеспечивает низкую работу выхода дефектов из частиц [18]. Поэтому время жизни объемных дефектов невелико, быстро происходит их релаксация и, соответственно, потеря частицами их особых свойств. Через некоторое время после измельчения минерала образовавшихся из него ОМЧ проходят точку инверсии. Их релаксационная способность и другие свойства изменяются от крайне активных до пассивных, по времени – от минут до суток и более. В то же время частицы крупнее 50 мкм не испытывают инверсии свойств, а в частицах менее 10 мкм объемные дефекты исчезают крайне быстро.

Это необходимо учитывать в процессах дробления и переработки руд, чтобы уловить момент перехода через точку инверсии и успеть провести до инверсии свойств максимально возможное количество операций по переработке руды. В частности, весьма показателен тот факт, что сразу после взрыва (до релаксации дефектов) руды в карьере ее дробить легче. Благодаря этому существенно экономится электроэнергия на работу в дробильном цеху [1].

Подвергая минералы различным воздействиям (механическим, температурным, акустическим, химическим, радиационным), можно направленно изменять многие физико-химические свойства минералов, существенно искажать кристаллическую решетку, создавать или уничтожать в них различные дефекты.

Несомненно, задача минералога и технолога оценить вклад как первичных, так и вторичных свойств с целью реализации в той или иной операции технологической схемы на основе технологического прогноза поведения минерала.

На основании данных термоманитного и рентгенодифракционного анализов мы показали [5], что при тонком измельчении различных генетических типов железных руд заметно изменяются физические характеристики минералов: точка Кюри магнетита смещается на 10–20 °С за счет появления новой фазы – маггемита (маггемитизация магнетита), искажаются рентгенодифракционные спектры. Разрушение первичной доменной структуры магнетита приводит к возрастанию коэрцитивной силы (на три–семь порядков), что, в свою очередь, способствует возникновению магнитных флокул и засорению рудных концентратов нерудными минералами. Удельная магнитная восприимчивость ОМЧ магнетита размером менее 20 мкм оказывается заниженной, что приводит к потере рудных компонентов при магнитной сепарации. Это же подтверждено нами во

время исследований тонкодисперсных фракций магнетита методом ИК-спектроскопии [16].

Таким образом, основные закономерности изменчивости вещественного состава руд (ПИ) обусловлены трансформацией геолого-структурной и минералого-генетической информации ЕГТС (с перераспределением вещества) о процессах формирования в ее массиве на макро-, микро- и наноуровнях последовательных стадий минералообразования. В конечном итоге это отражается на химизме, текстурно-структурных признаках руд, гранулярном составе, морфологии, конституции и свойствах минералов, характере взаимоотношений друг с другом, в целом – на особенностях их поведения в системе рудоподготовки (характер раскрытия по классам крупности) и эффективности различных видов сепарации.

В технологических схемах существенно возрастает осознание роли поверхности или приповерхностной области “S” наноминерального вещества [6]. Высокая степень поверхности (площади поверхности) обеспечивает сепарируемым минералам достаточно специфические характеристики, которые и обуславливают непредсказуемый потенциал нанотехнологий, в том числе и при обогащении. Это связано с проявлением необычных физических, химических и механических свойств наноминералов, изменяющих их кинетические и динамические характеристики. Для нанобъектов характерно другое время протекания процессов и явлений: в силу особых физико-химических и геометрических характеристик возрастает “быстродействие”. Прослеживается временная зависимость параметров системы частиц и случайный характер их образования. Известно, что ТС диспергированных минералов значительно отличаются от стандартных свойств индивидов того же состава в природном образце, поскольку механические воздействия могут существенно изменить их первичную кристалломорфологию и кристаллическую решетку. В исследованиях И. Плаксина, В. Глембоцкого, Р. Шафеева и ряда зарубежных технологов показано, что несовершенства кристаллической структуры могут оказывать значительное влияние на ТСМ, особенно с полупроводниковыми свойствами. Наиболее детально этот вопрос исследовал В. Ревнивцев для минералов с совершенной структурой: на примере кварца и полевых шпатов он показал, что ТС являются их суперпозицией, которая, в свою очередь, определяется конституцией минералов и характерными дефектами кристаллической решетки. Причем для некоторых текстурно-структурных свойств эти дефекты являются решающими, определяя поведение минералов при радиометрическом обогащении, флотации, магнитной и электрической сепарации. Ученый сформулировал феноменологический подход к использованию направленной генерации характерных дефектов для избирательного изменения ТС исследованных минералов.

Внедрение в практику методов селективного выделения минералов связано с использованием новых систем рудоподготовки и обогащения ПИ. Разработка и обоснование способов и методов направленного изменения природных свойств минералов с учетом размерного фактора позволяют изменять не только обогатимость различных видов ПИ и отходов, но и создавать новые процессы извлечения компонентов, получать новые материалы. Уже созданы новые технологии извлечения тонкого золота на основе нанотехнологий [6, 13].

Сегодня становятся составной частью технологии комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья методы получения наноминералов: плазменный; осаждения из газовой фазы (включая диссоциативную фотосорбцию); синтез из гелевых растворов; электроосаждения; ударное и электроимпульсное измельчение; при-

родное образование. Здесь особую роль играет энергетика. Огромные возможности энергии поверхностных процессов просматриваются в адсорбифизических методах сепарации, основанных на исследовании кристаллохимических и кристаллофизических процессов в гетерогенных системах под влиянием различных воздействий [7]. Технологи также предлагают: различные направленные изменения физико-химических свойств минералов в процессах обогащения ПИ; методы вибромеханической активации руд перед обогащением, обеспечивающие селективность раскрытия руд преимущественно по границам сростаний минералов или отдельных кристаллических блоков (в частности, 20 мкм); гидрофобный метод выделения минералов (на стыке флотации и полиградиентной магнитной сепарации), что позволяет эффективно извлекать в магнитную фракцию магнитные и слабомагнитные минералы; использование мощных электромагнитных импульсных воздействий (МЭМИ) при переработке упорных золотосодержащих сульфидных руд и продуктов обогащения [11, 21].

На примере индустриальных минералов Карелии (гранат, амфибол, ставролит, кианит и др.) сотрудники Института геологии Петрозаводска разработали [23] серию методов направленного изменения их технологических свойств (магнитных, люминесцентных, свойств поверхности, ультразвуковых и др.), которые обеспечили повышение эффективности технологий обогащения, прежде всего нанотехнологий. С позиций ТМ оценено влияние на процесс обогащения силикатов СВЧ-излучения, воздействия мощных электромагнитных импульсов и радиационного излучения, удаления газовой-жидких включений при термообработке. При различных видах энергетического воздействия можно преобразовать ТСМ, выбрать оптимальный способ модификации, целенаправленно изменив контрастность сепарируемых минералов и оптимизировав схему обогащения.

Высокий научно-теоретический потенциал учения об онтогении минералов в сочетании с технологическими исследованиями обуславливает новый подход в решении проблем выявления и оценки ТСМ разных видов минерального сырья. Он позволяет проследить их геолого-технологическую эволюцию в системе МПИ → обогатительная фабрика → хвостохранилище → отвалы и обеспечить их комплексную оценку, прогноз и переработку. На основе синтеза углубленных знаний о веществе и развития новых экспериментальных направлений в технологии значительно повышается эффективность системы рудоподготовки и обогащения полезных ископаемых в целом. И здесь в значительной степени обеспечивается сохранение и преобразование минералогическо-технологической информации в системе природно-техногенной эволюции минерального вещества.

Сегодня эффективно используют многие приемы ТМ при изучении вещественного состава руд и различных нетрадиционных видов минерального сырья в связи с разработкой нанотехнологий по извлечению полезных компонентов (золото, платина, сульфиды, минералы глин, цеолиты и др.). Преобразование качеств минералов реализуется в ряду минералогия → технологическая минералогия → технология → материаловедение. И хотя многие нанотехнологические решения еще имеют лабораторный характер – за ними будущее нашей науки и практики.

Завершая рассмотрение проблемы, особо акцентируем на возможности использовать сегодня генетические идеи Евгения Константиновича Лазаренко в развитии технологической минералогии. Ведь он умел глубоко сочетать теорию и практику в решении различных аспектов минералогии, в том числе и прикладной. Благодаря его усилиям и ра-

ботам минералогия стоит сейчас на очень высоком уровне развития. Ученики, соратники и последователи Е. Лазаренко успешно продолжают начатое им дело. Энциклопедические знания и высокая гражданская позиция определили весь жизненный путь Евгения Константиновича – великого ученого и прекрасного человека, учителя и коллегу, общение с которым осталось в памяти на всю жизнь.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Булах А. Г. Общая минералогия : [Учебник] / А. Г. Булах. – СПб. : Изд-во СПб. ун-та, 1999. – 356 с.
2. Григорьев Д. П. Соотношение технологической минералогии с сопредельными отраслями знания / Д. П. Григорьев // Онтогенез минералов и технологическая минералогия. – Киев : Наук. думка, 1988. – С. 11–15.
3. Григорьев Д. П. Онтогенез минералов / Д. П. Григорьев, А. Г. Жабин. – М., 1975. – 340 с.
4. Дементьева Г. И. Изоморфные и полиморфные превращения минералов в техногенезе / Г. И. Дементьева, Ю. М. Смирнов // Обогащение руд. – 1988. – № 3. – С. 34–37.
5. Дискретное состояние вещества в рудных и техногенных системах / А. Х. Туресебеков, Р. И. Конеев, С. А. Каширский, А. М. Ахмедов // Минералогическое общество и минералогическая наука на пороге XXI века. – СПб. : Минерал. общество при РАН, 1999. – С. 174–175.
6. Конеев Р. И. Наноминералогия золота / Р. И. Конеев. – СПб. : DELTA, 2006. – 220 с.
7. Котова О. Б. Поверхностные процессы в тонкодисперсных минеральных системах / О. Б. Котова. – Екатеринбург : УрО РАН, 2004. – 194 с.
8. Матковський О. Стан і перспективи розвитку регіонально-мінералогічних досліджень в Україні / О. Матковський, В. Павлишин. – Львів: Вид-во Львів. ун-ту, 1998. – 76 с.
9. Молчанов В. И. Физические и химические свойства тонкодиспергированных минералов / В. И. Молчанов, Т. С. Юсупов. – М. : Недра, 1981. – 161 с.
10. Наноминералогия. Ультра- и микродисперсное состояние минерального вещества. – СПб. : Наука, 2005. – 581 с.
11. Направленное изменение физико-химических свойств минералов в процессах обогащения полезных ископаемых : [Плаксинские чтения]. – М. : Альтекс, 2003. – 145 с.
12. Основные понятия минералогии : [Сб. науч. трудов] / [Отв. ред. Е. К. Лазаренко]. – Киев : Наук. думка, 1978. – 138 с.
13. Остащенко Б. А. Направленное изменение технологических свойств минералов : Автореф. дисс. ... д-ра геол.-мин. наук. – Сыктывкар, 1998.
14. Пирогов Б. И. Роль минералогических исследований в обогащении руд / Б. И. Пирогов // Минерал. журн. – 1982. – № 1. – С. 81–92.
15. Пирогов Б. И. Онтогенетический анализ полезных ископаемых – основа выявления и оценки технологических свойств минералов / Б. И. Пирогов // Новые методы технологической минералогии при оценке руд металлов и промышленных минералов. – Петрозаводск, 2009. – С. 7–16.
16. Пирогов Б. И. Инфракрасные спектры поглощения магнетита и их прикладное значение / Б. И. Пирогов, И. В. Холошин // Минерал. журн. – 1989. – № 2. – С. 73–80.



17. Ревнивцев В. И. Роль технологической минералогии в обогащении полезных ископаемых / В. И. Ревнивцев // Зап. Всесоюз. минерал. об-ва. – 1982. – Вып. 4. – С. 4–20.
18. Ревнивцев В. И. Технологическая минералогия обломочных малых частиц / В. И. Ревнивцев, Г. И. Доливо-Добровольская, П. С. Владимиров. – СПб. : Наука, 1993. – 248 с.
19. Рукасова Е. Н. Особенности обогащения магнетитовых роговиков ЦГОКа при различных методах измельчения / Е. Н. Рукасова, Б. И. Пирогов // Обогащение полезных ископаемых. – Киев : Техника, 1967. – Вып. 2. – С. 27–33.
20. Селективное разрушение минералов / В. И. Ревнивцев, Г. В. Гапонов, Л. П. Загоратский [и др.]. – М. : Недра. – 286 с.
21. Современные методы оценки технологических свойств труднообогатимого и нетрадиционного минерального сырья благородных металлов и алмазов и прогрессивные технологии их переработки : [Плаксинские чтения (Иркутск)]. – М. : Альтекс, 2004. – 232 с.
22. Технологическая минералогия железных руд / Б. И. Пирогов, Г. С. Поротов, И. В. Холошин, В. Н. Тарасенко. – Л. : Наука, 1988. – 304 с.
23. Щипцов В. В. Технологическая минералогия промышленных минералов Карелии / В. В. Щипцов // Минералогия, петрология и минерагения докембрийских комплексов Карелии. – Петрозаводск : Карел. науч. центр РАН, 2007. – С. 119–123.
24. Юшкин Н. П. Теория и методы минералогии / Н. П. Юшкин. – Л. : Наука, 1977. – 291 с.
25. Юшкин Н. П. Современная минералогия и новые тенденции ее развития / Н. П. Юшкин // Новые идеи и концепции в минералогии. – Сыктывкар, 2002. – С. 8–9.
26. Юшкин Н. П. Принцип наследования в минералогенезисе / Н. П. Юшкин, А. П. Хомяков, Н. З. Евзикова. – Сыктывкар, 1984. – 32 с.

*Стаття: надійшла до редакції 10.04.2012  
прийнята до друку 29.05.2012*

## **DEVELOPMENT OF ACADEMICIAN Ye. LAZARENKO'S IDEAS IN TECHNOLOGICAL MINERALOGY**

**B. Pyrohov**

*Federal State Unitary Enterprise “All-Russian Institute of Mineral Products”,  
Moscow, Russian Federation  
E-mail: pirogov\_boris@inbox.Ru*

The features of various minerals' and useful minerals' behaviour in the united geologic-technogenic system have been analyzed on the concrete examples using the genetic ideas of academician Ye Lazarenko. The modern concepts of mineral as well as the nature of formation and transformation of its technological properties on the macro-, micro- and nanolevels have been accepted into account. The attention is focused on the future of technological mineralogy in connection with possibilities of different kind directional changes of minerals technological properties.

*Key words:* mineral, technological mineralogy, technological properties of mineral, united geological-technogenic system.

## **РОЗВИТОК ГЕНЕТИЧНИХ ІДЕЙ АКАДЕМІКА Є. ЛАЗАРЕНКА В ТЕХНОЛОГІЧНІЙ МІНЕРАЛОГІЇ**

**Б. Пирогов**

*Федеральне державне унітарне підприємство ВІМС, м. Москва, Росія*

*E-mail: pirogov\_boris@inbox.Ru*

На конкретних прикладах проаналізовано особливості поведінки мінералів та різних корисних копалин в єдиній геолого-техногенній системі з використанням генетичних ідей акад. Є. Лазаренка. Взято до уваги сучасні поняття мінералу та природу формування й перетворення його технологічних властивостей на макро-, мікро і нанорівнях. Акцентовано увагу на майбутньому технологічної мінералогії у зв'язку з можливостями різного виду спрямованої зміни технологічних властивостей мінералів.

*Ключові слова:* мінерал, технологічна мінералогія, технологічні властивості мінералу, єдина геолого-техногенна система.