

УДК 549

## ОНТОГЕНІЧНИЙ АНАЛІЗ КОРИСНИХ КОПАЛИН – ОСНОВА ВИЯВЛЕННЯ Й ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МІНЕРАЛІВ

**Б. Пирогов**

*Всеросійський інститут мінеральної сировини, м. Москва, Росія  
E-mail: mineralogy@vims-geo.ru*

Проаналізовано різноманітні аспекти використання онтогенічного аналізу для виявлення й оцінювання технологічних властивостей мінералів на прикладі різних видів корисних копалин.

*Ключові слова:* мінерал, технологічна мінералогія, онтогенічний аналіз, мінералого-технологічні дослідження, єдина геолого-техногенна система.

“Генезис мінералів – це не що інше, як історія утворення їх самих, починаючи від акту зародження і до завершальних подій їхнього “життя”. “Біографія” мінералів, під час якої формуються всі їхні якості, включно з практично використовуваними, – це і є справжній генезис” [2]. Технологічна мінералогія дає змогу з єдиних позицій генезису корисних копалин (КК) на онтогенічних засадах простежити весь процес змін мінеральної речовини літосфери через технологію обробки й переробки до накопичення в літосфері [20].

Досвід засвідчує, що під час розробки технологічних схем для КК (руд) добре вивчених одноступінних родовищ кожного разу доводиться стикатися з великими труднощами, оскільки технологічні властивості мінералів суттєво можуть варіювати в межах навіть одного родовища. Це зумовлено, передусім, широким спектром природної гранулометрії індивідів і агрегатів мінералів, що містять включення та домішки або покриті різними за складом плівками, які зазнають під час розкриття (у разі дроблення й подрібнення) певних механічних дій. Тому під час мінералого-технологічних досліджень украй важливе використання прийомів і методів технологічної мінералогії на онтогенічних засадах, що дає змогу виявити й оцінити технологічні властивості мінералів [8 та ін.].

Досягнення мінералогічної науки у ХХ ст. (розвиток таких напрямів, як кристалохімія і фізика мінералів, онтогенія та філогенія, впровадження нових методів аналізу речовини, топомінералогія) сприяли поглибленню й розвитку теоретичних і практичних принципів технологічної мінералогії. Вони дають змогу брати до уваги еволюційні закономірності розвитку мінерального світу у взаємозв'язку з живою речовиною – мінерали та їхні асоціації. Загалом склад, текстурно-структурні ознаки і властивості (у тім числі технологічні) КК формуються на макро-, мікро- і нанорівні в різних енергетичних полях (гравітаційних, магнітних, електричних тощо) єдиної геолого-техногенної системи. Ці принципи визначають головні геолого-мінералогічні чинники збагачення різних КК з урахуванням їхньої мінералого-геохімічної й екологічної спеціалізації [26 та ін.] та відображенням колообігу мінеральної речовини у Природі і Технології на різних рівнях її організації: індивід (кристал, зерно, частинка) → агрегат (агрегат техногенних малих

частинок) → рудне тіло → мінералогічна аномалія (відвали “пустих” порід і некондиційні КК, хвостосховища – техногенні родовища КК) → мінералогічне поле.

Єдина геолого-техногенна система охоплює фізичний, речовинний і енергетичний простір, у якому мінерал динамічно розвивається у взаємозв'язку з середовищем (природним і технологічним), еволюціонуючи під дією зовнішніх і внутрішніх чинників, розпадаючись на системи “мінерал”, два типи “середовищ” і взаємозв'язки між ними. Розвиваючи ідеї М. Юшкіна [29] про взаємозв'язок між мінералом і мінералогенетичним середовищем у технологічній мінералогії, доцільно трактувати їх як багато в чому загальні й у технологічній системі. Це такі взаємозв'язки: енергетичні – забезпечують обмін енергією під час структурних перетворень індивіда; речовинні – пов'язані з надходженням із середовища в мінеральний індивід, забезпечують його ріст або, навпаки, руйнування індивіда і видалення речовини з мінералу в середовище; інформаційні – забезпечують передавання особливостей структурної організації речовини та енергії від середовища до мінералу і назад. Такий підхід найбільш значущий у разі використання онтогенічного методу в пізнанні технологічних властивостей мінералів.

Онтогенічний аналіз ґрунтується на порівняльно-історичних реконструкціях еволюції об'єктів різного рівня (індивідів, агрегатів, мінеральних тіл і родовищ КК). Онтогенічний метод спирається на фундаментальні еволюційні закономірності мінералогенезису [5, 6, 15, 29–31, 33]:

1) закон проходження мінерального індивіда через етапи зародження, росту і до завершальних подій його “життя” – зміни і руйнування, історія яких відбивається в явному або прихованому вигляді у морфології, анатомії, у взаємовідносинях індивідів та інших їхніх особливостях. Для складніших, ніж індивід і агрегат (мінеральне тіло, родовище КК), систем цей закон відомий як закон стадіального розвитку – стадіальний аналіз [6], який містить стадії сингенезу, діагенезу і метаморфізму;

2) принцип спадкоємства у мінералогенезисі певних ознак мінералів (речовинних, структурних, морфологічних, якісних) – у ланцюзі послідовної зміни поколінь мінералів кожне подальше покоління успадковує певні ознаки мінералів попереднього покоління. У мінеральному світі спадкоємність виявляється на всіх структурних рівнях – від окремого індивіда (навіть від окремих конституційних або анатомічних елементів) до мінеральних агрегатів, парагенезисів, асоціацій, комплексів;

3) закон інерції – мінералогічної “пам'яті”: під час зміни мінеральних систем первинна генетична інформація інерційно зберігається, локалізуючись на якомусь рівні пам'яті – морфологічному, структурному, ізотопному, молекулярному, магнітному тощо. Під час дослідження анатомії кристалів удається простежити в еволюції як особливості механізму їхньої кристалізації, так і роль у них різних твердих, рідких і газорідких включень;

4) закон мінералогічного резонансу – “у процесі онтогенії мінералу, який є продуктом еволюції мінералоутворювального середовища і відображає у своїй структурі всі її параметри, будь-яку зміну середовища спричиняє певна зміна мінералу, і, природно, будь-яка зміна мінералу виражається в мінералогічному середовищі”. Звідси випливають два постулати [1]. Перший: “генезис фіксований у сукупності якостей мінералів”. Функціонування структурних та інформаційних взаємозв'язків разом з речовинними й енергетичними дає змогу вивчати процеси мінералоутворення з кібернетичного погляду. Другий: “пізнання генезису мінералів – це пізнання його якостей”, що визначає потенційну можливість розшифрування мінералогічної інформації внаслідок цілеспрямовано-

го дослідження. Виділяють декілька типів резонансу мінералів у зміні середовища: конституційний (морфологічний, структурний, хімічний) та якісний, або резонанс властивостей (гравітаційних, електричних, магнітних, оптичних, механічних тощо);

5) спеціальні закони для вивчення мінералогічної інформації, що відображають “зміст” інформації і тривалість (геологічну) часу її функціонування: а) мінералогічного резонансу; б) обов’язкової наявності генетичної інформації в мінералі; в) різноманіття форм запису генетичної інформації; г) складання генетичної інформації; д) витіснення первинної інформації інформацією з накладених процесів; е) інерції в додатку до інформації. Ці закони визначають суть і зміст генетико-інформаційної мінералогії, яка забезпечує онтогенічний аналіз об’єкта досліджень [31], у тім числі з огляду на технологію переробки КК. Безпосередньо спостерігати процес мінералоутворення неможливо [1], проте за його результатами (завдяки виявленню генетичної інформації за тими або іншими ознаками мінералів) можна побудувати ретроспективну модель з виявленням матеріальних ознак генетичних подій у тимчасовій послідовності. Індивіди як реальні фізичні тіла геологічних утворень відрізняються специфічними особливостями кристалохімії, строго індивідуальною морфологією, анатомією, реакцією на зміни зовнішнього середовища, здатністю до саморегулювання структури. Специфічність і динамічність структури індивіда, складність та різноманітність його функцій дають підстави трактувати його як складний організм [16].

Теоретичні основи вчення про онтогенію припускають, що генезис КК (руд) виявляється в якостях мінералів – мінерагенетичних ознаках, “записаних у конституції, морфології і властивостях мінеральних індивідів і агрегатів” [2]. Розшифрування його полягає в пізнанні цих якостей – тілесному втіленні генезису мінералів [1]. Пізнаючи генезис мінералів, потрібно брати до уваги сукупність трьох позицій: власне утворення (зародження → ріст → зміни аж до знищення), спосіб утворення (фізико-хімічний механізм генезису: вільна кристалізація, перекристалізація, метасоматичне утворення, розкристалізація гелів тощо) і геологічний процес (магматичний, гідротермальний та ін.).

Запровадження у практику мінералого-технологічного оцінювання КК вчення Д. Григор’єва про онтогенію мінералів дало змогу глибше зрозуміти природу становлення та зміни технологічних властивостей мінералів. Саме онтогенічний підхід з урахуванням даних технологічного експерименту забезпечує [13, 17–19], по-перше, оцінювання гетерогенності особливостей конституції (складу і структури) мінералів; по-друге, вибір оптимальних умов розкриття зерен корисного компонента з відображенням природи зрощень – гранулометрію, форму зерен мінералів, що зростаються, особливості їхніх меж і фізико-механічних властивостей. Зрештою особливості розкриття мінералів характеризують шляхи підвищення вилучень цінних компонентів руд на підставі керування селективністю подрібнення зі збереженням геометричної цілісності розкриваних мінералів та їхніх структурно-хімічних характеристик; по-третє, оптимізацію технологічного процесу з урахуванням контрастності властивостей розділення мінералів – особливостей неоднорідності складу і властивостей мономінеральних зерен (виявляють під час комплексного мінералогічного аналізу анатомії індивідів і подрібнених частинок), дослідженням характеру і спрямованості змін тих або інших якостей мінералів (КК загалом); по-четверте, визначення послідовності технологічних операцій з метою досягнення найефективніших умов розділення мінералів, з урахуванням розмірного чинника і морфолого-структурних характеристик малих частинок, що знову формуються; по-п’яте, виділення під час геолого(мінералого)-технологічного картування типів і сортів

КК, їхню всебічну мінералого-технологічну характеристику. Це дає змогу визначати спрямованість природних процесів мінералоутворення та їхню роль у формуванні головних речовинно-технологічних характеристик КК різного генезису.

Отже, на підставі досліджень особливостей речовинного складу, текстурно-структурних ознак, фізико-механічних та фізико-хімічних властивостей КК різних генетичних типів, законів мінералогії (інформаційних, резонансу, інерції), з урахуванням взаємозв'язків і певної подібності між процесами мінералоутворення (перетворення) в Природі і Технології, а також даних технологічних експериментів ми формуємо наші уявлення про технологічні властивості мінералів. У цьому разі потрібно брати до уваги, що "життя", розпочате в геологічних процесах, триває в технологічних апаратах. Це відображає двояку природу технологічних властивостей мінералів [17]: з одного боку, вони зумовлені взаємозв'язком з генезисом, конституцією і морфологією, з іншого, – змінами морфології, конституції мінералів і, як наслідок, їхніх природних властивостей під час рудопідготовки і збагачення (у ланцюзі родовища КК → збагачувальна фабрика → хвостосховище). Тут і з'являється можливість отримати пряму інформацію про технологічну онтогенію – генезис технологічного "життя" мінералів – мінеральних уламкових малих частинок за даними мінливості первинної морфології та особливостей їхньої кристалохімії. Причому треба мати на увазі, що тривалість природних процесів, які формують технологічні властивості мінералів, до усталення термодинамічної рівноваги обчислюють тисячоліттями. "Швидкісні" технологічні процеси, зумовлені продуктивністю апаратів, інтенсивно руйнують природну інформаційну структуру мінералу, повільніше передають її новим продуктам процесів у більш-менш збереженому вигляді. Згідно з принципом спадкоємності структурних, речовинних і морфологічних ознак мінералів, їхні технологічні властивості (густинні, магнітні, напівпровідникові, люмінесцентні, флотаційні тощо) потенційно виявляються в різних еволюційних рядах мінералів (асоціацій), які відображають безперервний спрямований розвиток процесів мінералогенезису (результат взаємодії мінералів у різних енергетичних полях з середовищем). Цей принцип важливо брати до уваги під час розробки технологічних схем, управління ними і модифікування мінералів.

Відомо, що в процесах мінералоутворення і перетворення завжди фізика керує хімією. Тому Д. Григор'єв [2] зазначав, що, пізнаючи генезис мінералів у природі та технології, ми можемо підійти до можливого раціонального використання властивостей мінералів. Досліджуючи морфологію, особливості конституції індивідів і агрегатів рудних мінералів, зрощень з іншими мінералами, важливо виразити тілесно мінливість та еволюцію їхніх технологічних властивостей і ознак з використанням комплексу таких сучасних методів аналізу: візуалізація зображень, рентгенівська обчислювальна мікροтомографія (під час пошарового сканування об'єкта виявляють особливості розподілу мінеральних фаз: форму і розміри, характер зрощень тощо), електронна мікроскопія та растрова електронна мікроскопія, інфрачервона мікроскопія, методи ядерного гамма-резонансу, ядерного парамагнітного резонансу, електронного парамагнітного резонансу, визначення термоелектрорушійної сили, термохімічний, люмінесцентний, радіографічний, рентгеноспектральний, мікрозондовий (протонний), термобарогеохімічний та інші методи аналізу. Це дасть змогу, зрештою, глибше проникнути в природу цих властивостей, визначити ступінь їхньої контрастності під час сепарації, можливості керування процесами збагачення, запропонувати методи селективного виділення мінералів з використанням нових систем рудопідготовки і збагачення КК. Опрацювання отриманої ін-

формації за допомогою комп'ютера в разі виявлення тонких особливостей конституції мінералів, а також детальне вивчення мінеральних асоціацій, закономірностей мінливості мінералів у морфолого-структурному ряду з урахуванням технологічних даних, отримання інформації про онтогенію, типоморфні ознаки і властивості мінералів дають змогу коректно оцінювати збагачуваність рудних і нерудних КК.

У разі розгляду конституції мінералів як взаємопов'язані хімічний склад і структуру важливо надати поняттю разом з хімічним чіткий фізичний сенс [2]. Це дасть змогу виразити ті або інші особливості неоднорідності хімічного складу і кристалічної структури мінералів різних порядків в анатомії реальних кристалів і частинок (зональність, секторіальність і мозаїчність), подробицях конституції другого і третього порядків (полісинтетична, доменна будова, епітаксійні прошарки), деталях атомного і молекулярного масштабу (різноманітні дефекти кристалічної структури), в ізотопному складі, ядерній, електронній і магнітній структурах. Важливо в цьому випадку залучати різні за складом включення, пори, тріщини, покриття індивідів адсорбційним шаром, різноманітні плівки, синтаксію, епітаксію та інші особливості. Потрібно також брати до уваги, що конституція відображає історію їхнього росту, неодноразову зміну габітусу, трансформацію скелетного росту в повногранний і навпаки. Важливо виявити і простежити особливості змін, пов'язані з етапами син- і епігенетичного метаморфізму мінералів [24]. Анатомія може бути суттєво перетворена в процесі їхньої зміни і руйнування завдяки зовнішній енергетичній дії.

Технологічні властивості мінералів, які є фізичною основою процесів сепарації в разі збагачення, тісно пов'язані з генезисом руд (додаються нові якості завдяки техногенним перетворенням), проте в одному випадку ця залежність пряма, а в іншому – за допомогою конституції [2]. Такий взаємозв'язок простежується постійно на всіх стадіях збагачення руд: текстурі і структури мінеральних зрощень (онтогенія агрегатів), характер зрощення рудних і нерудних мінералів (взаємні проникнення, морфологія і характер меж зрощення, значення сил зчеплення) зумовлюють ефективність дроблення й подрібнення руд, а такі процеси збагачення, як флотація, суттєво залежать від морфології, розподілу хімічних домішок, включень, дислокацій, деформацій, електрофізичних властивостей індивідів (тип провідності, концентрація електронів та ін.). Важливо брати до уваги, які ознаки і як виявлять себе на різних стадіях схем і під час технологічних процесів загалом, відображаючи характер перетворень. Особливе місце в оцінюванні технологічних властивостей КК посідають завершальні етапи мінерагенезу, які фрагментарно “заморожують” інформацію в морфолого-структурних і конституційних кількісних параметрах (передусім, у зрощеннях мінералів, які дають змогу оцінювати ефективність їхнього розкриття в разі подрібнення).

В організації системи рудопідготовки і вибору найефективніших методів сепарації КК важливим є оцінювання морфолого-структурних ознак і властивостей мінералів, які визначають мінералого-технологічні особливості типів і сортів руд за глибиною та економічність їхньої переробки. Наприклад, вивчення кристалів (зерен) магнетиту в рудах різних генетичних типів дає змогу виявити особливості їхньої морфології й анатомії. Передусім, необхідно простежити мінливість головних габітусних форм. Коливання фізико-хімічних умов приводить до неодноразової зміни габітусу мінералу [13, 18].

Зазвичай, у межах одного й того ж родовища магнетит наявний у вигляді декількох генерацій: це зернисті різного вигляду й розміру індивіди, псевдоморфози, суцільні, стрічкові, пойкилітові (завдяки включенням інших мінералів), мірмекітові та мірмекіто-

подібні, радіально-променисті агрегати, паралельні зростки, складні епітаксійні наростання слюди, хлориту на магнетит тощо. У магнетитових різновидах залізистих кварцитів морфологія магнетиту визначена, головню, динамікою процесів метаморфізму: поєднанням перекристалізації з катаклазом – з проявом плікативної і диз'юнктивної тектоніки (рис. 1). На контактах кристалів чітко видно щілину (шов), яка полегшує розкриття мінералів у разі подрібнення і яку взято до уваги під час оцінювання зрощень мінералів [13]. Залежно від генезису зрощень (послідовності формування, симетрії, морфології меж, неоднорідності, мікротвердості мінералів, що співіснують) ширина шва змінюється для різних типів зрощень у широких межах, зумовлюючи характер розкриття. Еволюція форм від фації зелених сланців до амфіболітової і гранулітової пов'язана з переходом від форм октаедра  $\{111\}$  до комбінацій з кубом  $\{100\}$ , ромбододекаедром  $\{110\}$  і навіть куба з ромбододекаедром. У фації зелених сланців нерідко наявне спотворення октаедра магнетиту із зовнішньої симетрії аж до псевдомоноклінної і псевдотриклінної. Це зумовлено проявом стресу. У зонах же інтенсивного тиску виникають прості шпінелеві двійники по  $[111]$ , зазвичай сплюснені паралельно до  $(111)$ , а також полісинтетичні двійники. До особливих форм спотворення належать сколювання вершин октаєдрів та згладжування ребер і вершин унаслідок розчинення. Нерідко в цьому разі кристали набувають округлості. Зрештою, усе це позначається на доменній структурі мінералу і, як наслідок, – на магнітних властивостях (магнітній жорсткості, коерцитивній силі та ін.).

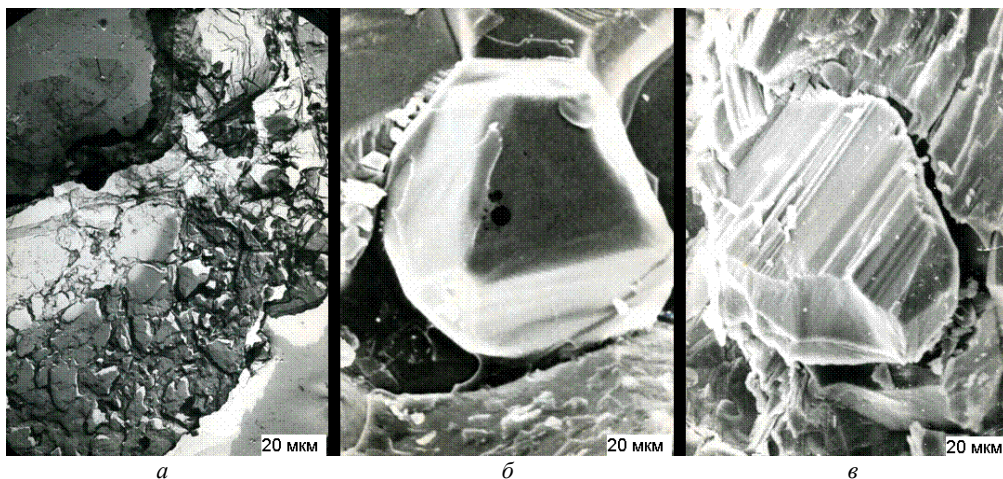


Рис. 1. Морфолого-структурні особливості магнетиту кварцитів за даними растрової електронної мікроскопії:

*a* – роздроблений кристал на контакті з кварцом (Південний гірничозбагачувальний комбінат (ГЗК), Кривий Ріг); *b*, *в* – по-різному спотворені кристали на контакті з кварцом і амфіболом (*b* – Лебединський ГЗК, Курська магнітна аномалія (КМА); *в* – Інгuleцький ГЗК, Кривий Ріг).

Досить важливу інформацію про особливості онтогенії магнетиту “постачає” анатомія індивідів. На рис. 2 показано анатомічні зрізи зерен магнетиту різного ступеня ідіоморфізму з включеннями кварцу. Якість концентрату в разі великого подрібнення руди до 95 % класу –74 мкм змінюється із вмістом заліза в ряду 58,1 % (*a*)→63,8 % (*b*)→67,8 % (*в*). Дослідження на мікроскопічному рівні в шаруватих залізистих кварцитах за спеціальною методикою [7] текстурованих зображень мінералів (магнетит, кварц, кар-

бонат, силікат) дали змогу виявити: виділення індивідів не виглядають як яскраво виражені шаруваті мотиви, що їх фіксують у разі візуальних спостережень.

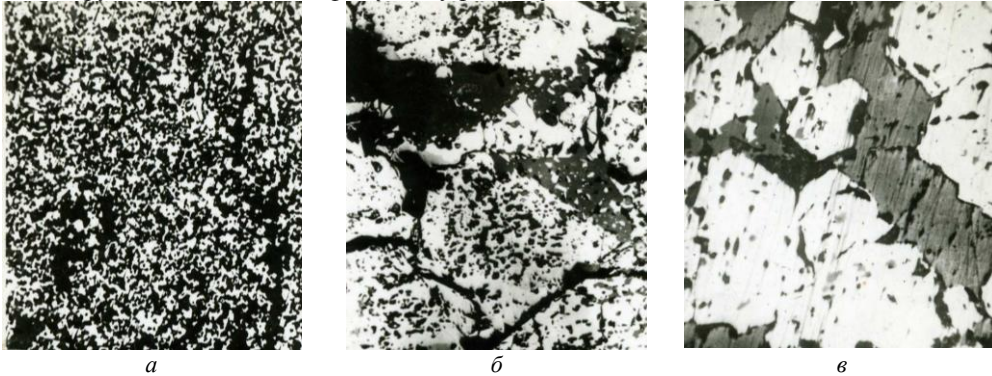


Рис. 2. Анатомічні зрізи зерен ксено- та ідіобластів магнетиту залізистих кварцитів фації зелених сланців Скелеватського родовища (ПівдГЗК, Кривий Ріг) у відбитому світлі: біле – магнетит, чорне і сіре – кварц. Ніколі  $\parallel$ ,  $\times 100$ .

Звичайно це скупчення рудних фаз, морфолого-структурних особливостей мінералів, які трасують шаруваті структурні мотиви залізистих кварцитів, вельми різноманітні за внутрішньою будовою і з симетрією вищих, ніж  $L_2$ , порядків. Помітна агрегатна симетрія (зростки мінеральних індивідів) з елементами симетрії  $L_4$ ,  $L_3$ ,  $L_6$ ,  $L_\infty$ . У цьому ж напрямі погіршуються показники розкриття рудної фази під час подрібнення і знижується вміст Fe в концентраті. Поєднання перекристалізації і мікроскладчастості за умов анізотропії тиску в товщах залізистих кварцитів зумовило різноманітність морфолого-структурних особливостей мінералів, анізотропію різних фізико-механічних властивостей, пов'язану з певним мікросередовищем у кожному шарі кварцитів (рудному, змішаному, нерудному). Нерідко фіксують суттєву зміну симетрії середовища і, зрештою, морфології індивідів і агрегатів різних мінералів (як наслідок – і технологічних характеристик). Це добре видно на анатомічному зрізі магнетитових кварцитів (рис. 3).

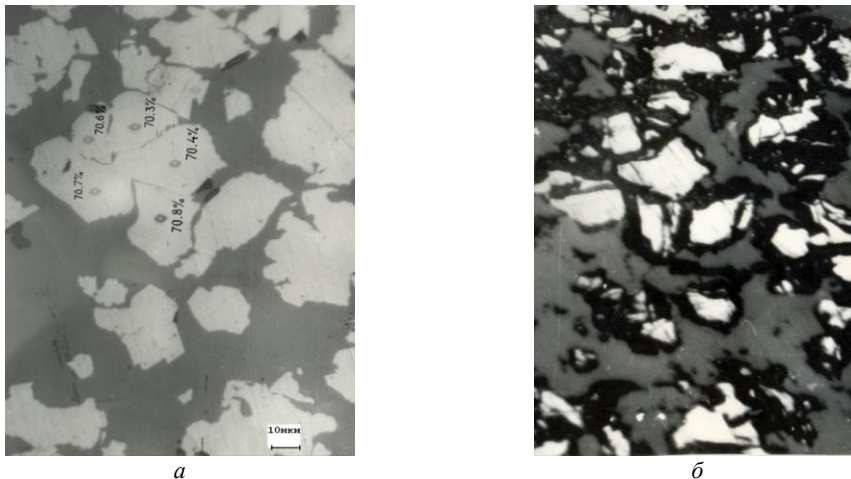


Рис. 3. Розділення індивідів (зерен) магнетиту на частини в ділянках мікроскладчастості у відбитому світлі:

*a* – без протравлення; *b* – протравлене HCl (за даними мікрозондового аналізу вміст Fe становить 70,3 %). Ніколи ||. Біле – магнетит, сіре і чорне – кварц. Михайлівський ГЗК, КМА.

Тут виявляється природна технологічна онтогенія завершального етапу кристалізації під час лужного метасоматозу. Вона приводить до суттєвої зміни магнітних властивостей мінералу, передусім, його залишкової намагніченості – коерцитивної сили  $H_C$ , яка змінюється від 50–70 до 150–200 одиниць, а за певних умов збагачення досягає 300–370 одиниць. Це приводить до підвищеної флокульованості концентратів і хвостів, оскільки під час подрібнення кварцитів різко збільшується кількість заряджених уламкових малих частинок магнетиту, кварцу й інших мінералів, що формують техногенні агрегати цих частинок (рис. 4).

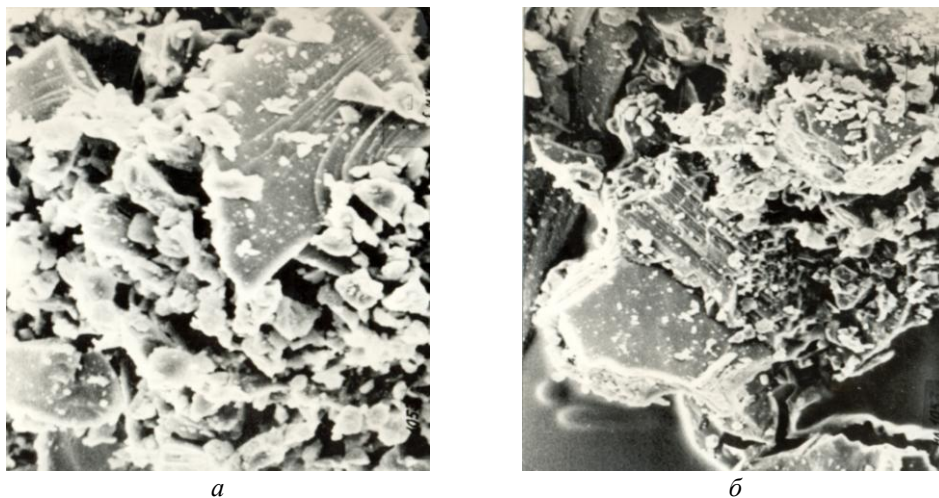


Рис. 4. Флокули уламкових малих частинок (Михайлівський ГЗК, КМА):

*a* – великі частинки кварцу в концентраті розміром 30–50 мкм, оточені дрібними й тонкими частинками (20–30 мкм) магнетиту; *b* – частинки гематиту і мартитизованого магнетиту розміром 20–30 мкм у флокулах хвостів, оточені короною тонких (3–5 мкм і менше) уламкових малих частинок кварцу, егірину і рудних сильно переподрібнених частинок.  $\times 700$ .

Різноманітність зовнішніх форм магнетиту в залізнях різного генезису, згідно з онтогенічними спостереженнями, зростає від карбонатитів до гідротермальних контактово-метасоматичних процесів мінералоутворення з проявом плоско- і кривогранних форм. Кожен з таких кристалів, відповідно, представлений довершеними і скелетно-блоковими підтипами. Чим більші кристали, тим частіше на них виявляються елементи розчинення. З іншого боку, в усіх генетичних типах залізняку дрібні (>1–2 мм) октаедри магнетиту плоскогранні, нерідко з дзеркально-гладкими поверхнями, містять менше домішок. На гранях, зазвичай, нема скульптур росту і розчинення. Найбільш недосконалі великі кристали: скульптура поверхонь граней складна, рельєф глибокий і неоднорідний навіть на одній грані. У різних типах руд магнетит утворює прості та складні двійники зростання й проростання. Складні двійники зростання формують циклічні розірвані трійники і п'ятірники, пірамідальні четвірки й п'ятірники, а також п'ятірники проростання. Двійникування – результат скелетного росту кристалів [13]. Під час подрібнення кристали мінералу розколюються по певних кристалографічних площинах, і їх фіксують у широкому технологічному гранулометричному спектрі різних класів круп-



ності (зі своєю кристалохімією і здатністю поверхні адсорбувати як певні хімічні елементи й групи, так і переподрібнені частинки інших мінералів, що утрудняють їхню сепарацію, зокрема, у разі флотації). Дуже важливо виявити природу меж типів зрощень магнетиту з гематитом, сульфідами, нерудними мінералами, як це розглянули ми та інші дослідники раніше [4, 13, 21]. Виявлення на родовищах руд з інтенсивним двійникуванням має принципове значення: ускладнюються процеси магнітної сепарації подрібнених частинок, зростає їхня флокульованість і погіршується якість концентрату завдяки захопленню нерудних частинок.

Під час онтогенічного аналізу потрібно брати до уваги динаміку зміни технологічних властивостей мінералів (загалом КК) завдяки зовнішній енергетичній дії, у тім числі спрямованій на підвищення ступеня їхньої контрастності за технологічного режиму. Для цього важливо розуміти, що технологічні властивості мінералів формуються в широкому природно-технологічному гранулометричному спектрі єдиної геолого-техногенної системи як на стадії рудопідготовки, так і в різних вузлах схеми збагачення. Провідним чинником тут є, передусім, крупність подрібнення руд. Як зазначив В. Ревнівцев [20], на початку ХХ ст. вона становила 1 мм, у 30-ті роки для всіх типів руд була знижена на порядок – до 100 мкм, а нині багато руд подрібнюють до 50 мкм, оскільки суттєво погіршали їхні текстурно-структурні ознаки. Сумарна поверхня подрібненої руди під час переходу 1 мм → 100 мкм зростає на два порядки, а в разі зменшення лінійних розмірів до 50 мкм вона збільшується вже на чотири порядки (долається якісний бар'єр). Саме ці зміни пов'язані з залученням щораз більшої кількості “важкозбагачуваних руд” з несприятливими характеристиками: тонкозернистих зі складними зрощеннями мінералів і текстурами, що збагачуються з великою кількістю шламів (частинки <20–10 мкм), для яких нема ефективних методів збагачення. І тут дуже важливий онтогенічний підхід до оцінювання технологічних особливостей мінералів: “Тільки облікування генезису кристала, всієї еволюції його формування і характеру недосконалості (дефектів) його структури, які виникають під час цієї еволюції, може дати об'єктивне уявлення про його реальні технологічні властивості. Саме відмінністю генезису можна пояснити той факт, що ті самі мінерали з різних родовищ або навіть ділянок одного й того ж родовища поведуться під час збагачення по-різному” [20]. В. Ревнівцев звертає увагу на той факт, що технологічні властивості мінералів, які формуються ще під час їхнього зародження, змінюються впродовж усього періоду існування мінералів відповідно до еволюції фізико-хімічних і термодинамічних умов, характерних для певних зон рудного тіла: характеру магматизму, інтенсивності тектонічної діяльності, особливостей складу рудоутворювальних розчинів і багатьох інших геологічних чинників. Суттєві зміни пов'язані з конституцією мінералів.

Зокрема, наші дослідження збагачуваності залізних руд різних генетичних типів засвідчили [13], що зміни в структурі пов'язані, передусім, з морфотропними змінами в ряду вюстит  $Fm3m$  – магнетит  $Fd3m$  – магхеміт  $P4_22_12$  – гематит  $R\bar{3}c$ . Окиснювально-відновлювальні процеси переходу магнетиту у вюстит або магхеміт (далі у гематит–мартит) з суттєвими об'ємними змінами за природних і промислових умов виявляються на тлі симетрійних перетворень [11]. Наприклад, під час окиснення магнетиту до магхеміту об'єм рудної фази збільшується на 9 %, у разі відновлення до вюститу – зменшується на 21 %, що приводить до значної деформації як окремих зерен, так і агрегатів. Вони провокують процеси псевдоморфізації магнетиту й гематиту (мартитизацію та мушкетовітизацію), які досить суттєво позначаються на зміні таких технологічних влас-

тивостей перетворених мінералів, як характер і значення питомої поверхні, коерцитивна сила та ін. За природних умов ці процеси посилюються завдяки виникненню численних вторинних мікротріщин у мінералах. Обидва явища чітко виявлені у залізистих кварцитах Михайлівського родовища КМА: простежують зміну значення повної питомої поверхні магнетитового концентрату за зональністю товщі кварцитів (крупність подрібнення 95 % класу –44 мкм) – від суттєво магнетитових з силікатами і піритом до гематит-магнетитових (вміст заліза становить, відповідно, 65,8 та 65,3 %, а значення питомої поверхні – 1 788 та 1 200 м<sup>2</sup>/кг).

Нині, коли об'єктом вивчення стають щораз бідніші руди, різноманітні відходи збагачення й металургії складного речовинного складу потребують тонших методів дослідження і принципово нових технологічних рішень. Тому під час оцінювання техногенної онтогенії КК важливо мати дані прямих технологічних експериментів. З огляду на це Ю. Кушпаренко вважає за доцільне глибше вивчати руди в рамках запропонованого ним нового наукового напрямку – мінералогічної технології [23]: важливо забезпечувати визначення кількісних значень параметрів речовинного складу технологічними методами (хімічними, основними й допоміжними в різних поєднаннях збагачувальними). Це стосується складних, дрібно- і тонковкраплених руд, які важко діагностувати, передусім, мінералогічними методами. Доповнюючи прямі мінералогічні спостереження, запропонована методика дає змогу отримати повну інформацію щодо розкриття тонкодисперсних мінералів. Зокрема, доведено, що з використанням гідравлічної класифікації мінеральної суміші однієї крупності (за однаковості і сталості густини) розділення відбуватиметься тільки за густиною зерен, а кількість кожного мінералу, що осів у крупну фракцію, у разі повного розкриття їхніх взаємних зрощень залежатиме лише від його густини, у разі неповного – від густини і повноти розкриття. Також Ю. Кушпаренко теоретично обґрунтував (на прикладі технологічної оцінки збагачуваності Sn і Ta-Nb руд) умови гравітаційного розділення мінеральних сумішей і запропонував межі розділення руд різної крупності на гравітаційних апаратах, способи прогнозування можливості розділення мінеральних частинок, зростків важких і легких мінералів. Учений довів ефективність тонкого грохотіння у схемах збагачення руд з цінними тонковкрапленими важкими мінералами, що дає змогу знизити їхнє переподрібнення, навантаження на млини, поліпшити процес збагачення шламового матеріалу і флотацію дрібних частинок (>40 мкм), виділених за допомогою гідравлічної класифікації. Визначені умови реалізації тонкого грохотіння (від 0,5 до 0,07 мм) на підставі відсадження: досягнуто збільшення питомої продуктивності в півтора–два рази порівняно з вібраційними грохотами, на порядок зменшилося зношування сітки, у три–чотири рази – витрати електроенергії, на 25–30 % – води, а також рівень шуму й вібрації. Зрештою, контроль за зміною кількісних значень мінералого-технологічних параметрів збагачення з огляду на використання методу мінералогічної технології і досліджень з онтогенії мінералів дає змогу глибше оцінювати еволюцію технологічних властивостей мінералів.

Важливою проблемою технологічної мінералогії В. Ревнивцев вважає [22, 23] різноманітні підходи до зміни технологічних властивостей мінералів для підвищення ефективності їхнього вилучення (випалювання в разі зміни магнітних властивостей мінералів окисненого залізняку; енергетичні дії через зміну ступеня дефектності структури і характеру властивостей поверхні калішпатів в асоціації з плагіоклазами у зв'язку з ефективністю їхнього флотаційного розділення тощо). Отже, облік закономірностей еволюції технологічних властивостей мінералів і руд з урахуванням геологічних чинників (забез-

печення вибірковості подрібнення руд) дав змогу під час геолого-технологічного картування не тільки фіксувати збагачуваність різних ділянок рудного тіла, а й прогнозувати їх. Зрештою, відомий принцип збагачувачів “не дробити нічого зайвого” перетворюється на принцип “не збагачувати нічого зайвого”.

Далі В. Ревнивцев розвиває свої ідеї в напрямі розроблення методології і теоретичних основ технологічної мінералогії, виявлення мінералого-технологічних особливостей руд різних генетичних типів. Виявилось, що під час тонкого подрібнення (< 44 мкм) можуть значно змінюватися природні ознаки КК – морфологія, гранулометрія і конституція мінералів аж до появи новоутворених фаз, явищ аморфізації, псевдоморфізації, поліморфізму [13]. Перетворення мінералів у разі подрібнення звичайно починається і завершується під впливом навантажень (тектонічних у природі та механічних у подрібнювальних апаратах). Це зумовлює різний ступінь диспергування і подальше формування технологічного, знову сформованого агрегатного стану речовини (флокули та ін.). У цьому разі по деформованих ділянках, особливо вздовж зон крихкого розриву, інтенсивніше відбуваються процеси розкладання, окиснення та інші фізико-хімічні перетворення системи мінерал–середовище, що характерно для мінералів техногенних родовищ КК [3, 28 та ін.]. Усі ці особливості КК потрібно брати до уваги під час їхнього мінералого-технологічного вивчення.

Дослідження еволюції технологічних властивостей мінералів і поведінки техногенних фаз дають змогу припускати два головні механізми змін, як зазначено вище, – поліморфний та ізоморфний [32]. Найчіткіше обидва механізми перетворень протиставлені за умов техногенезу. У цьому разі поліморфний механізм перетворень полягає не в хімічних, а в симетрійних реакціях мінералів. У разі формування технологічних властивостей мінералів завдяки поліморфним перетворенням енергія витрачається на розупорядкування ґратки, і структура перетворюється на низькосиметрійну фазу, як показано вище для залізних руд. У праці [3] Г. Дементьєва та Ю. Смирнов зазначили, що зі зниженням симетрії зростають домішкова місткість структури і реакційна активність поліморфних фаз. На прикладах рядів сульфідів і оксидів дослідники продемонстрували, що поліморфні модифікації суттєво розрізняються за фізичними властивостями (густина, твердість) та оптичними характеристиками. Це дає змогу під час подрібнення руд на ГЗК фіксувати перетворення магнетит–гематит, сфалерит–вюртцит та ін. Механізм нормального ізоморфізму не пов’язаний з різкою зміною енергетики структур, він зумовлює шлях монотонної зміни фізичних властивостей мінералів.

Нерідко в макрокристалах розвинений наноблоковий ізоморфізм [25]. Він формує новий світ структур і морфологічно впорядкованих об’єктів, які є в дальньому порядку структуроутворювальних частинок (наноіндивіди, механічно захоплені в процесі зростання; у вигляді структур розпаду твердих розчинів; у міжзерновому просторі й межах субіндивідів; в агрегатах і наноструктурах надмолекулярної впорядкованості аморфних речовин тощо). Конституція і форма наноіндивідів визначена тільки внутрішніми чинниками і практично не залежить від зовнішніх дій. Цей вид ізоморфізму важливий у разі вирішення проблем повного вилучення корисних компонентів із руд, отримання нових видів мінеральної сировини, під час оцінювання показників збагачення руд різних генетичних типів (наприклад, магнетитових концентратів із руд Ковдора та ін.). Чітко помітний взаємозв’язок явищ поліморфізму й ізоморфізму в наведеному вище морфотропному ряду оксидів заліза. Поза сумнівом, обидва явища зумовлюють вибір режимів збагачення руд різних генетичних типів.

Практика роботи ГЗК також засвідчує, що на ефективність процесів сепарації багатьох руд може негативно впливати будь-який мінерал (або група мінералів) навіть у незначній кількості – погіршуються показники збагачення [13, 21 та ін.]. Наприклад, поява шаруватих силікатів – тальку, хлориту, слюд – у кількості від десятих часток до перших відсотків (вони нерідко формують епітаксійні зрощення з головними рудними мінералами) негативно позначається на флотаційних властивостях рудних мінералів зі скарнових W-Mo руд. У залізо-фосфорних рудах поява 0,5–1,5 % гіпсу пригнічує флотацію апатиту.

Техногенна онтогенія мінеральних перетворень чітко помітна ще на завершальній стадії процесів мінералоутворення (див. рис. 3). Причому недосконалості кристалічної структури суттєво впливають на технологічні властивості мінералів, особливо напівпровідників (утворення дефектів та ін.), що детально дослідив В. Ревнівцев. На прикладі мінералів з досконалою структурою (кварцу і польового шпату) він довів, що їхні технологічні властивості є суперпозицією властивостей, визначуваних конституцією й характерними дефектами кристалічної ґратки. Причому для деяких структурно-чутливих властивостей, що визначають їхню поведінку під час радіометричного збагачення, флотації, магнітної та електричної сепарації, такі дефекти є вирішальними. Вчений сформулював феноменологічний підхід до використання напрямленого генерування характерних дефектів для вибіркової зміни технологічних властивостей мінералів.

Нині в технологічній мінералогії широко використовують матеріали з вивчення процесів концентрації мінералів у природних родовищах для вдосконалення процесів їхньої технологічної концентрації шляхом, по-перше, створення процесів-аналогів, по-друге, – термодинамічного оцінювання напряму перебігу відповідних процесів з метою зрушення рівноваги в певному напрямі для посилення концентрації тих або інших елементів чи мінералів, по-третє, – сумісного розгляду і вдосконалення загальної “технологічної схеми” концентрації елементів (природні і техногенні процеси). Однак треба зважати на те, що геологічні процеси суттєво відрізняються за часовою кінетикою їхнього перебігу і реакціями [13].

Успішно розвиваються нові ідеї вдосконалення процесів розкриття мінералів, комплексного вивчення властивостей мінералів з використанням сучасних фізико-хімічних методів аналізу та з виявленням технологічних властивостей мінералів, можливостей їхньої спрямованої зміни для керування технологічними процесами. Технологічна мінералогія дає змогу не тільки виявити й оцінити технологічні особливості КК і мінералів, а й отримати зворотну інформацію для розуміння їхнього генезису. Під час геолого-технологічного картування родовища на підставі геолого-технологічної моделі закономірностей мінливості речовинного складу, текстурно-структурних ознак, фізико-механічних і фізико-хімічних властивостей типів і сортів рудних та нерудних КК на тлі мінералого-геохімічної зональності рудних тіл (товщ) можна виявити характер їхньої геохімічної та екологічної спеціалізації, фазовий склад мінеральних асоціацій і мікропарагенезисів головних рудних і нерудних мінералів, кристаломорфологію, гранулометрію, що сприяє визначенню особливостей технологічних схем і показників збагачення КК.

У розвитку єдиної геолого-техногенної системи важливо брати до уваги ієрархічну систематику дискретного стану речовини [9, 27] у ряді утворень мінерал→мікромінерал→квазікристали→фулерени→аморфна речовина→колоїди→наночастинки→кластери. Це дасть змогу по-новому підійти до мінералого-технологічного оцінювання комплексності, екологічності КК і відходів, розроблення нестандартних методів їхнього оцінювання,

технології видобутку і збагачення, а також забезпечити розробку економо-екологічних технологій отримання нового нетрадиційного вигляду сировини (цеоліти, сапоніт, польові шпати, кіаніт, гранати тощо) для розширення галузей її застосування [14, 26 та ін.].

Із залученням до збагачення тонкодисперсних видів мінеральної сировини (важкозбагачувані руди, нерудні КК, індустриальні мінерали, різноманітні відходи) змінюється звичне уявлення про КК. У технологічних схемах щораз важливішу роль починає відігравати розмірний чинник мінералів, які співіснують. З одного боку, в цьому разі зростають вимоги до рівня мінералогенетичної інформації з виявлення мінеральних фаз, характеру їхніх взаємин з комплексом високороздільних методів, з іншого, – до вибору систем рудопідготовки і раціональних способів сепарації тонкого матеріалу, передусім, наночастинок. Нанорозмірні технології припускають вивчення і впровадження механізмів вилучення цінних компонентів на молекулярному, атомарному, електронному рівнях, коли з'являється можливість керувати процесами на рівні формування КК [10, 12, 27 та ін.]. Суттєво зростає усвідомлення ролі поверхні або приповерхневої ділянки  $S$  наномінеральної речовини [10, 12]. Високий ступінь поверхні (площі поверхні) забезпечує вельми специфічні характеристики мінералам, які сепарують, що і зумовлює непередбачуваний потенціал нанотехнологій, у тім числі й під час процесів збагачення. Це пов'язано з виявом незвичайних фізичних, хімічних і механічних властивостей наномінералів, які змінюють кінетичні й динамічні характеристики. Нанооб'єктам притаманний інший термін перебігу процесів і явищ: через особливі фізико-хімічні й геометричні характеристики зростає "швидкодія". На думку О. Котової [10], часова залежність параметрів системи частинок і випадковий характер їхнього формування припускають наявність дуалізму наносистем. Розроблені методи отримання наномінералів (плазмовий; осадження з газової фази, включно з дисоціативною фотосорбцією; синтезування з розчинів гелів; електроосадження; ударне й електроімпульсне подрібнення; природне формування) нині стають складовою частиною технології комплексної переробки природної і техногенної мінеральної сировини. Величезні можливості енергії поверхневих процесів приховують у собі адсорбційні методи сепарації, які ґрунтуються на дослідженнях кристалохімічних і кристалофізичних процесів у гетерогенних системах під впливом різних дій. Серія методів спрямованої зміни технологічних властивостей забезпечує підвищення ефективності технологій їхнього збагачення, передусім, нанотехнологій.

Проте онтогенічні дослідження в цьому напрямі тільки розпочато. Нині ефективно використовують багато прийомів технологічної мінералогії, у тім числі на онтогенічних засадах, під час вивчення речовинного складу руд і різних нетрадиційних видів мінеральної сировини у зв'язку з розробкою нанотехнологій з вилучення корисних компонентів (Au, Pt, сульфідів, мінерали глини, цеоліти та ін.).

На завершення зазначимо, що високий науково-теоретичний потенціал учення про онтогенію мінералів надає геологам, мінералогам і технологам новий підхід у вирішенні проблеми виявлення й оцінювання технологічних властивостей мінералів з різних видів сировини. Це вчення не тільки є ключем до розуміння їхньої природно-техногенної характеристики. Воно дає змогу на мінералого-генетичній основі тієї чи іншої КК, підкріплений даними прямих технологічних експериментів, простежити мінливість еволюції системи родовище КК → збагачувальна фабрика → хвостосховище → відвали і так забезпечити її комплексне оцінювання, подальше керування і прогнозування.

1. Григорьев Д.П. Позиции онтогении минералов // Зап. Всесоюз. минерал. об-ва. 1978. Ч. 107. Вып. 4. С. 407–415.
2. Григорьев Д.П., Жабин А.Г. Онтогения минералов. М., 1975. 340 с.
3. Дементьева Г.И., Смирнов Ю.М. Изоморфные и полиморфные превращения минералов в техногенезе // Обогащение руд. 1988. № 3. С. 34–37.
4. Дымкин А.М., Пермьяков А.А. Онтогения магнетита. Свердловск, 1984. 188 с.
5. Жабин А.Г. Онтогения минералов. Агрегаты. М., 1979. 276 с.
6. Жабин А.Г. Стадиальный анализ в генетической минералогии // Исследование рудообразующих систем. Свердловск, 1981. С. 45–55.
7. Изюмко В.М. Технологическая минералогия и оценка руд. СПб., 1997. 582 с.
8. Индутный В.В., Пирогов Б.И. Опыт количественной оценки онтогенических характеристик руд Кривого Рога // Зап. Всесоюз. минерал. об-ва. 1990. Ч. 119. Вып. 4. С. 94–99.
9. Конеев Р.И. Наноминералогия золота. СПб., 2006. 220 с.
10. Котова О.Б. Поверхностные процессы в тонкодисперсных минеральных системах. Екатеринбург, 2004. 194 с.
11. Кушпаренко Ю.С. Минералогическая технология – новое направление изучения вещественного состава минерального сырья. М., 1997. 40 с.
12. Направленное изменение физико-химических свойств минералов в процессах обогащения полезных ископаемых: Плаксинские чтения. М., 2003. 145 с.
13. Онтогения минералов и технологическая минералогия / Отв. ред. Ю.П. Мельник. Киев, 1988. 228 с.
14. Остащенко Б.А. Направленное изменение технологических свойств минералов: Автореф. дисс. ... д-ра геол.-мин. наук. Сыктывкар, 1998. 43 с.
15. Павлишин В.И., Юшкин Н.П., Попов В.А. Онтогенический метод в минералогии. Киев, 1988. 120 с.
16. Пирогов Б.И. Роль минералогических исследований в обогащении руд // Минерал. журн. 1982. № 1. С. 81–92.
17. Пирогов Б.И. Онтогенический метод в познании технологических свойств минералов // Проблемы онтогении минералов. Л., 1985. С. 22–30.
18. Пирогов Б. Методологія технологічної мінералогії та природа технологічних властивостей мінералів // Мінерал. зб. 2007. № 57. Вип. 2. С. 17–34.
19. Пирогов Б.И., Поротов Г.С., Холошин И.В., Тарасенко В.Н. Технологическая минералогия железных руд. Л., 1988. 304 с.
20. Ревнивцев В.И. Роль технологической минералогии в обогащении полезных ископаемых // Зап. Всесоюз. минерал. об-ва. 1982. Вып. 4. С. 4–20.
21. Ревнивцев В.И. Рудоподготовка как новое направление горных наук // Основные направления развития техники и технологии обогащения полезных ископаемых. Л., 1983. С. 3–22.
22. Ревнивцев В.И., Доливо-Добровольская Г.И., Владимиров П.С. Технологическая минералогия обломочных малых частиц. СПб., 1993. 248 с.
23. Ревнивцев В.И., Гапонов Г.В., Зарогатский Л.П. и др. Селективное разрушение минералов. М., 1988. 286 с.
24. Руденко С.А., Иванов М.А., Романов В.А. Метаморфизм минералов – важное явление в истории их формирования // Зап. Всесоюз. минерал. об-ва. 1978. Вып. 6. С. 698–710.

25. 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., 1999. С. 174–175.
26. Шмакин Б.М., Коваль П.В. Экологическая минералогия: содержание, методы и место в обогащительном процессе // Роль минералогических исследований в решении экологических проблем (теория, практика, перспективы развития). СПб., 2002. С. 195–196.
27. Щипцов В.В. Технологическая минералогия промышленных минералов Карелии // Минералогия, петрология и минерагения докембрийских комплексов Карелии. Петрозаводск, 2007. С. 119–123.
28. Юргенсон Г.А. Проблемы минералогии геотехногенеза // Роль минералогических исследований в решении экологических проблем (теория, практика, перспективы развития). СПб., 2002. С. 200–203.
29. Юшкин Н.П. Теория и методы минералогии. Л., 1977. 291 с.
30. Юшкин Н.П. Практическое значение онтогенеза минералов // Зап. Всесоюз. минерал. об-ва. 1980. Вып. 4. С. 385–395.
31. Юшкин Н.П. Теоретические и методические основы расшифровки генетической информации, содержащейся в минералах. // Новые идеи в генетической минералогии. Л., 1983. С. 38–47.
32. Юшкин Н.П. Наноминералогия: объекты, функции, перспективы // Минералогическое общество и минералогическая наука на пороге XXI века. СПб., 1999. С. 20.
33. Юшкин Н.П., Хомяков А.П., Евзикова Н.З. Принцип наследования в минералогенезе. Сыктывкар, 1984. 32 с.

**ONTOGENETIC ANALYSIS OF USEFUL MINERALS –  
THE BASIS OF DISCOVERING AND VALUATION  
OF MINERALS TECHNOLOGICAL PROPERTIES**

**B. Pyrogov**

*Russian Institute of Mineral Raw Material, Moscow, Russian Federation  
E-mail: mineralogy@vims-geo.ru*

The various aspects of the ontogenetic analysis employment for discovering and valuation of minerals technological properties on the example of different types of useful minerals have been analysed.

*Key words:* mineral, technological mineralogy, ontogenetic analysis, mineral-technological researches, integrated geological-technogenetic system.

**ОНТОГЕНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ – ОСНОВА  
ВЫЯВЛЕНИЯ И ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МИНЕРАЛОВ****Б. Пирогов***ФГУП “ВИМС”, г. Москва, Россия**E-mail: mineralogy@vims-geo.ru*

Проанализированы различные аспекты использования онтогенического анализа для выявления и оценки технологических свойств минералов на примере разных видов полезных ископаемых.

*Ключевые слова:* минерал, технологическая минералогия, онтогенический анализ, минералого-технологические исследования, единая геолого-техногенная система.

Стаття надійшла до редколегії 14.10.2010

Прийнята до друку 09.11.2010