

УДК 549

ПОЗИЦІЇ МІНЕРАЛОГІЇ У ЗБАГАЧЕННІ КОРИСНИХ КОПАЛИН

Б. Пирогов

*Московський державний геологорозвідувальний університет
117873 Російська Федерація, м. Москва, вул. Миклухо-Маклая, 23
E-mail: gigia@rol.ru*

Розглянуто головні позиції мінералогії у збагаченні корисних копалин. Доведено, що речовинний склад, текстурно-структурні ознаки і властивості мінералів (у тім числі технологічні) формуються в єдиній природно-техногенній системі. Побудована на цій підставі документація дає змогу вміло керувати технологією процесів збагачення і прогнозувати їхні показники.

Ключові слова: технологічна мінералогія, речовинний склад, корисні копалини, онтогенія, властивості, оцінка, прогнозування, картування.

Мінералогія відіграє нині провідну роль у розробці наукових основ формування, розширення та раціонального використання мінерально-сировинної бази. Головні методологічні позиції мінералогії у збагаченні корисних копалин такі.

1. Речовинний склад, текстурно-структурні ознаки і технологічні властивості мінералів корисних копалин формуються у єдиній геолого-технологічній (природно-техногенній) системі, що визначає особливості кругообігу речовини у природі.

Технологічна мінералогія дає змогу з єдиних позицій дослідити увесь шлях зміни мінеральної речовини літосфери в загальному кругообігу використання корисних копалин у практичній діяльності людини, починаючи з генетичної передісторії мінералу та видобутку мінеральної речовини із літосфери через технологію обробки та переробки до накопичення у літосфері відходів [9].

Одним з найефективніших методів пізнання технологічних особливостей і властивостей мінералів є онтогенічний підхід [6]. З урахуванням еволюції генезису мінералу можна об'єктивно уявити його реальні (природні) технологічні властивості. Такі властивості як основа процесів розділення в разі збагачення тісно пов'язані з генезисом руд, проте в одному випадку ця залежність пряма, в іншому – опосередкована конституцією. Цей взаємозв'язок простежується постійно на всіх стадіях збагачення руд.

Використовуючи онтогенічний метод у пізнанні технологічних властивостей мінералів руд, можна визначити таке:

оптимальні умови розкриття зерен корисного компонента, вивчаючи морфологію, гранулометрію, характер і природу меж зростання рудних та нерудних мінералів;

контрастність властивостей розділення мінералів з урахуванням особливостей конституції (анатомія індивідів, ступінь неоднорідності складу та властивості зерен) для оптимізації технологічного процесу;

головні типи і різновиди руд, які можуть бути виділені під час мінералого-технологічного картування родовищ.

Розглянемо можливості вирішення цих питань на прикладі баделеїт-апатит-магнетитових руд Ковдорського родовища, яке збагачують комплексно з отриманням концентратів усіх трьох мінералів. Схема фабрики має чотири стадії дроблення: двостадійне дроблення до 55 % класу $-0,074$ мм і три стадії мокрої магнітної сепарації, хвості якої є сировиною для отримання флотаційного апатитового і гравітаційного баделеїтового концентратів.

На підставі всебічного мінералогічного аналізу парагенетичних асоціацій, закономірностей розподілу мінералів у просторі родовища, типоморфних особливостей (морфологія, конституція, властивості) мінералів руд з позиції онтогенічних та інших генетичних ознак розроблено просторово-часову модель формування комплексних руд родовищ [3]. Природа його формування складна і полігенна, що позначилося на значній неоднорідності речовинного складу руд родовища і, як наслідок, їхній технологічній неоднорідності. Це зумовило потребу розробки таких інформативних мінералого-технологічних ознак, які б дали змогу максимально стабілізувати рудопідготовку і збагачуваність руд з урахуванням одержання концентратів.

Технологічні властивості магнетиту під час магнітної сепарації та апатиту з їхніх хвостів визначені головними генетичними особливостями мінералів. Технологічні ж показники переробки баделеїту суттєво завуальовані з огляду на його природні властивості й визначені головню технологічними чинниками. Магнетиту притаманні різноманітність макро- і мікроморфології, неоднорідність гранулометрії, гетерогенність і багатофазність, складний баланс елементів-домішок. За коефіцієнтом неоднорідності ($K_n = \text{Fe}_2\text{O}_3:\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO}$) виділяють (табл. 1) магнетит трьох категорій неоднорідності (відповідно, й три сорти руд). Коефіцієнт K_n у сукупності з даними про вміст загального Fe в руді дає змогу з високою точністю прогнозувати всі технологічні параметри.

Таблиця 1

Середній склад Fe у магнетиті та концентратах магнітної сепарації, мас. %

Індекс	Категорії неоднорідності магнетиту K_n	Склад заліза	
		у магнетиті	у концентраті
I	До 0,71	66,4	65,1
II	0,71–0,74	65,2	63,8
III	Понад 0,74	64,7	63,5

Малооб'ємне технологічне випробування засвідчило, що морфологічні типи апатиту суттєво відрізняються за складом і властивостями, утім числі й технологічними (табл. 2). Низький показник виводу апатиту-I зумовлений його вибірко-вим переподрібненням у зростах з твердішим форстеритом-I і втратами під час знешламування хвостів магнітної сепарації. Переробка руд з апатитом-II також забезпечує одержання кондиційного концентрату. В цілому руди з апатитом-I та апатитом-II належать до першого технологічного сорту. Карбонатизовані руди з апатитом-III дають найнестабільніші показники флотації, що пов'язано із втягуванням у концентрат вільних зерен карбонатів.

Таблиця 2

Технологічні показники переробки різних морфологічних типів апатиту

Тип	Склад концентратів, %			Видобуток	Вихід
	P ₂ O ₅	CO ₂	MgO	P ₂ O ₅	
I: дрібні ксеноморфні виділення	$\frac{37.6 - 41.2}{39.9}$	$\frac{0.6 - 3.9}{1.9}$	$\frac{0.7 - 6.8}{1}$	$\frac{23.5 - 72.5}{40.6}$	$\frac{4.5 - 12}{8}$
II: великі ізометричні виділення	$\frac{35.6 - 41.8}{39}$	$\frac{0.6 - 18.4}{2.8}$	$\frac{0.4 - 5.3}{1.8}$	$\frac{21.9 - 93.6}{53.4}$	$\frac{2.9 - 39}{19.5}$
III: еліпсоїдальні та стовпчасті індивіди	$\frac{15.1 - 41.6}{29.8}$	$\frac{0.6 - 28.4}{11.5}$	$\frac{0.4 - 48}{4}$	$\frac{16.9 - 93.6}{50}$	$\frac{3.5 - 28.6}{16.9}$

Дослідження фізико-хімічних особливостей апатиту довело, що чим вищий вміст карбонат-іона в мінералі, тим інтенсивніша смуга 870 см⁻¹ (за методом інфрачервоної спектроскопії). Зниження якості апатитового концентрату пов'язано зі збільшенням співвідношення інтенсивності смуги 870 із реперною смугою 460. Це пов'язано з тим, що в разі входження карбонат-іона в структуру апатиту збільшується дефіцит активних іонів Ca²⁺, які взаємодіють із флотореагентами, і флотоактивність його різко знижується, а в концентрат переважно втягується карбонат. Власне це дало критерій для виділення “важкозбагачувальних” апатитових руд з якістю концентрату до 22 % (третій сорт) у разі співвідношення I_{v870} : I_{v460} > 0,8 в ІЧ-спектрі і середньозбагачуваних (другий сорт) при I_{v870} : I_{v460} < 0,8.

Технологія баделеїту складна, оскільки неможливо зіставити дані детального мінералогічного аналізу з якісними й експериментальними характеристиками малооб'ємного технологічного випробування. Ми запропонували використовувати як індикаторний геолого-технологічний критерій оцінки гравітаційного збагачення руд вміст ZrO₂ у класі –44 мкм у пробі технологічного розміру подрібнення (44–48 % класу –200 меш). До першого сорту зачислено найпридатніші для одержання баделеїту руди (кальцит-форстерит-магнетитові, апатит-кальцит-магнетитові, апатит-форстерит-магнетитові) зі вмістом ZrO₂ понад 12 відносних одиниць і баделеїту у клас –44 мкм понад 21 %. Для другого і третього сортів характерний низький вміст ZrO₂ (менше 12 відносних одиниць) і видобуток мінералу в клас –44 мкм у продуктах технологічного збагачення. До другого сорту належать руди з видобутком понад 21 % (apatит-кальцитові, кальцит-форстерит-магнетитові, апатит-кальцит-магнетитові й апатит-силікатні), а до третього – з видобутком до 21 % (apatит-силікатні, апатит-форстерит-магнетитові). Отже, на підставі розроблених індикаторів геолого-технологічної оцінки руд Ковдора можливий прогноз їхньої збагачуваності по кожному з видів сировини.

Перспективним є впровадження онтогенічного підходу в інші галузі технології мінеральної сировини [5]. Для таких мінералів, які є цінними як монокристал, фізичне тіло (кварц, кальцит, слюди, азбест, алмаз, каменесамоцвітна сировина та ін.), онтогенія стала фундаментом раціональної технології видобутку і збагачення. Наприклад, сортування індивідів кварцу за формою кристалів та скульптурою граней дає змогу відбирати монокристали кварцу для подальшого отримання цитринового

забарвлення після опромінення. Різко підвищило якість та економіку п'єзовиробів "онтогенічне" розпилювання кристалів ісландського шпату за методом О.В. Скропишева. Отже, генетичний підхід в оцінці речовинного складу, текстурно-структурних ознак і властивостей корисних копалин дає змогу планувати найоптимальнішу їхню технологію.

2. *Технологічні властивості мінералів мають двояку природу з локалізацією інформації на різних рівнях мінералогічної "пам'яті" – морфологічному, ізотопному, молекулярному, структурному, магнітному тощо.* Оцінюючи технологічні властивості мінералів, потрібно пам'ятати, що їхнє існування, розпочате в природних процесах, продовжується в технологічних апаратах. Технологічні властивості мінералів формуються на різних рівнях [10]: атомно-молекулярному рівні кристалічної комірки; макрорівні окремих кристалів; макрорівні полімінеральних гірських порід; у межах природного типу руд як постійної в просторі мінеральної асоціації; в об'ємі родовища з урахуванням усього комплексу геолого-структурних та генетичних чинників. Важливе значення має надання поняттю генезис мінералів фізичного змісту [1]. Це дає змогу виявити ті чи інші особливості неоднорідності хімічного складу і кристалічної структури в анатомії реальних кристалів (зональність, секторіальність та мозаїчність), деталях конституції другого і третього порядків (поліситетичне двійникування, доменний склад, епітаксійні прошарки), деталях атомного і молекулярного масштабу (різноманітні дефекти кристалічної структури), в ізотопному складі, ядерній, електронній та магнітній структурах. Важливо брати до уваги різноманітні за складом включення, пори, тріщини, покриття індивідів адсорбційним шаром та інші особливості. Під час розшифровування анатомії індивідів необхідно пам'ятати, що вона відображає історію їхнього росту, неодноразову зміну габітусів, трансформацію скелетного росту в повногранний та навпаки. Вона може бути суттєво перетворена в процесі зміни і руйнування мінералів завдяки зовнішній енергетичній дії [9].

Властивості формуються в широкому спектрі природної та технологічної гранулометрії, тому дуже важливий розмір подрібнених руд. На початку ХХ ст. верхня межа подрібнення становила 1 мм, у 30-ті роки для всіх типів руд її знизили на порядок – до 100 мм, а сьогодні багато подрібнюють до 50 мкм, оскільки суттєво погіршилися їхні текстурно-структурні ознаки. Сумарна поверхня подрібненої руди в разі переходу розміру від 1 мм до 100 мкм збільшується на два порядки, а в разі зниження лінійних розмірів зерен до 10 мкм – уже на чотири порядки (долається якісний бар'єр). Такі зміни в системі збагачення пов'язані з залученням більшої кількості "тяжкозбагачуваних руд" із несприятливими характеристиками (тонкозернисті зі складними зростаннями мінералів і текстурами); вони збагачуються великою кількістю шламу (частинки до 10–20 мкм) і не мають ефективних методів збагачення. В цих рудах асоціації мінералів нерідко мають подібні властивості (механічні, сорбційні та ін.), що приводить до зниження їхньої контрастності під час сепарації. Наприклад, асоціація хризоколи, польових шпатів і кварцу утруднює флотування оксидів і сульфідів деяких мідних руд. Усе це потребує глибокого вивчення як речовинного складу таких руд, так і зміни властивостей мінералів у технологічному процесі. Для врахування особливостей зміни властивостей мінералів у динаміці, у тім числі спрямованих на підвищення ступеня їхньої контрастності в технологічному режимі, потрібно пам'ятати, що вони формуються на різноманітних дискретних рівнях (макро-мікро-нанорівні) і виявляються в широкому спектрі

гранулометрії. У разі тонкого подрібнення (до 44 мкм) можуть значно змінюватися природні властивості (морфологія, гранулометрія, конституція) мінералів аж до появи новостворених фаз, явищ аморфізації, поліморфізму, псевдоморфоз мінералів [8, 9]. Часто суттєво перетворюються розміри і властивості поверхні мінералів [2], величина і характер заряду, адсорбція і десорбція груп елементів, виявлених кристалографічними перерізами мінеральних частинок.

Перетворення мінералів у разі подрібнення зазвичай починається і закінчується під впливом навантажень (тектонічного в природі та механічного в подрібнювальних апаратах), що зумовлює диспергування і наступне формування технологічного, новоутвореного агрегатного стану речовини (флокули та ін.). За деформованими ділянками, особливо вздовж зон крихкого розриву, інтенсивно відбуваються процеси розкладання, окиснення та інші фізико-хімічні перетворення системи мінерал-середовище. Це дає змогу в разі спрямованої зміни властивостей мінералів на макро-мікро-нанорівнях діяти як на власне мінерал, так і на середовище, забезпечуючи достатню контрастність під час сепарації мінералів.

Вивчаючи індивіди й агрегати рудних мінералів, зростки їх з іншими мінералами, важливо показати тілесно змінність та еволюцію їхніх технологічних ознак (властивостей) з використанням онто- і філогенічного підходів, комплексу сучасних методів аналізу (візуалізація зображення, рентгеноструктурний, термомагнітний аналізи, ІЧС, рентгенопопграфія тощо) поряд із класичними методами дослідження речовини (оптичний, травлення, магнітометрія та ін.) і тонкої мікрофотографії. Нові головні методи спрямованої зміни властивостей мінералів пов'язані з "регенеруванням" або "заліковуванням" дефектів ґратки на поверхні чи в об'ємі подрібнених частинок. До них належать: механічні (особливі режими та методи подрібнення); акустичні (ультразвукова обробка); термічні (нагрівання і наступне швидке чи повільне охолодження); активація властивостей поверхні (блокування поверхневих центрів у фізичних полях простими молекулами газової складової); зміна співвідношення електронних і діркових центрів різноманітними методами зміщення адсорбційно-десорбційної рівноваги, що змінює умови сепарації частинок завдяки поверхневим і об'ємним змінам; хімічні зміни – протравлення, обробка реагентами, що легують поверхню домішковими іонами; радіаційні (опромінення рентгенівськими і гамма-променями, потоками швидких частинок); біохімічні перетворення (бактеріальне вилугування та ін.). Зокрема, у праці [4], на відміну від традиційного технологічного підходу, обґрунтовано можливість створення поверхневого заряду мінералів, супутніх золоту в концентраті, що слугує основою для розробки способу термоелектричної сепарації Au. Експерименти засвідчили, що витягнення частинок мінералу розміром 1–5 мкм дрібних і тонких класів концентрату становить 99–100 %. Отже, на підставі розуміння двоякої природи технологічних властивостей мінералів з урахуванням їхньої зміни для підвищення ступеня контрастності під час сепарації з'являється змога керувати процесами збагачення корисних копалин у системі мінеральний індивід (агрегат) природної гранулометрії–мінеральна частинка (агрегат) технологічного гранулометричного спектра–середовище єдиного процесу (природного і технологічного). Все це відбувається на тлі природних і технологічних мінеральних асоціацій, у яких будь-який мінерал може впливати на контрастність технологічних властивостей подрібнених частинок та ефективність процесів сепарації.

3. На підставі геолого-технологічної моделі родовища можна керувати технологією процесу збагачення з урахуванням раціонального і комплексного використання корисних копалин. Геолого-технологічна модель родовища, як доводить наш досвід із дослідження руд Ковдора [6–8], ґрунтується на системі ретроспективного комплексного мінералогічного дослідження й експериментальних технологічних даних. В основі геолого-технологічної оцінки руд є такі принципи:

- усі мінерали – продукт єдиних, взаємопов’язаних процесів, тому їх вивчають комплексно з урахуванням головних мінеральних асоціацій;
- зміни у фізико-хімічному стані мінерало-генетичної системи фіксують і вивчають на різних рівнях: родовище (зональність)–руда (рудне тіло)–мінерал (агрегат, індивід);
- просторовий розподіл парагенетичних асоціацій найперше контрольований структурними чинниками;
- онтогенічний підхід до мінерало-технологічної оцінки руд дає змогу визначити послідовність і характер взаємовідносин мінералів, дослідити закономірності розвитку процесів мінералоутворення, як наслідок – оцінити ефективність розкриття мінералів під час збагачення та схарактеризувати контрастність їхніх технологічних властивостей;
- критеріями для геолого-технологічного картування родовища є типоморфні мінерало-генетичні чинники, що визначають збагачуваність руд;
- під час рудопідготовки і збагачення природно зумовлені технологічні властивості мінералів (руд) суттєво змінюються, тому, вникаючи в суть закономірностей, що формують технологічні властивості руд, і в їхній зв’язок із конституцією мінералів, дуже важливо надати їм чіткий фізичний зміст.

Складна і багатостадійна генетична природа руд, а також суттєва зміна властивостей під час рудопідготовки і збагачення зумовили в цілому незбіжність меж геолого-технологічних сортів за трьома компонентами, що ускладнює усереднення руди, технологічний прогноз і систему контролю за процесами підготовки і збагачення. Впровадження ЕОМ (див. рисунок) забезпечує об’єднання погоризонтних геолого-технологічних планів у єдину геолого-технологічну модель із залученням необхідних додаткових характеристик руди: вміст Fe, P₂O₅, S та ін. Плани для кожного виду сировини в сукупності з додатковою інформацією щодо руди становлять допоміжний важливий інформативний модуль (базу даних), за яким ЕОМ створює образ цифрової геолого-технологічної моделі родовища [3]. Інші модулі та блоки є допоміжними, обслуговувальними на підставі розрахункових показників. Зокрема, модуль прогнозу й управління технологічними процесами забезпечує обчислення співвідношення технологічних сортів руд з урахуванням промислово важливих компонентів для усереднення руди в циклі кар’єр–усереднений склад, усереднення на збагачувальній фабриці з метою досягнення раціонального режиму роботи технологічного обладнання та стабілізації показників переробки. Модуль контролю за процесами рудопідготовки і збагачення фіксує й коригує порушення технологічного процесу, зумовлені об’єктивними чинниками (порушення технологічних режимів, недотримання напрямів видобувних робіт та ін.).

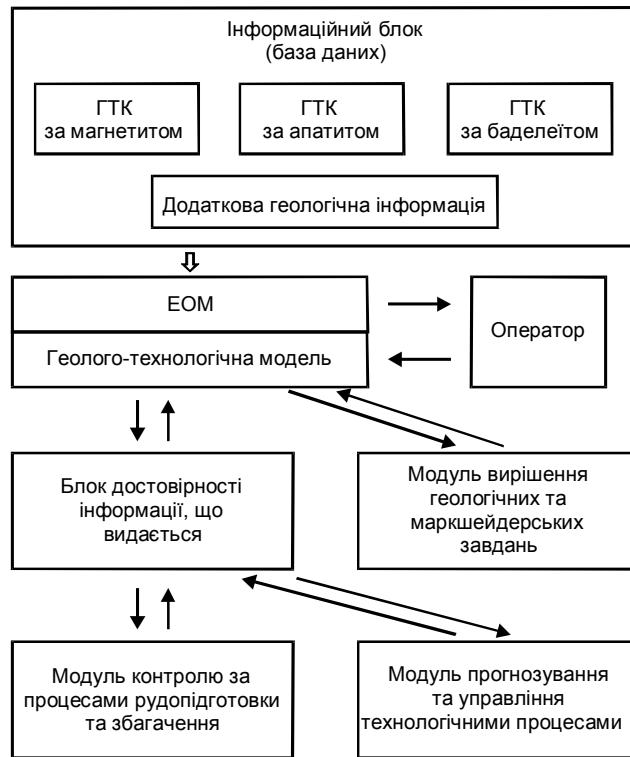


Схема автоматизованого опрацювання даних

Модуль вирішення геологічних завдань забезпечує автоматизоване виконання рутинної роботи: підрахунок запасів, побудову погоризонтних геолого-маркшейдерських планів, ведення геологічної документації та ін. Уся цифрова розрахункова інформація проходить через блок оцінки її достовірності, що допомагає оператору оцінити її значущість і ввести необхідні корективи.

Важливо зазначити, що результати геолого-технологічного картування родовищ сьогодні використовують для вирішення широкого кола питань: раціоналізації роботи гірничих, геологічних і технологічних служб гірничо-збагачувальних комбінатів під час усереднення руд перед подачею на збагачувальні фабрики, оцінки сировинної бази комбінатів (у тому числі його комплексності), розробки автоматизованих систем управління виробництвом (АСУВ).

У системі АСУВ за допомогою геолого-технологічної карти можна проводити різні види оперативного і перспективного планування, контролювати роботи гірничо-збагачувальних комбінатів.

1. Григорьев Д.П. Позиции онтогении минералов // Зап. Всесоюз. минерал. об-ва. 1978. Вып. 4. С. 407–415.

2. *Котова О.Б.* Адсорбифизические методы обогащения тонкодисперсного минерального сырья. СПб., 1999.
3. *Матковський О.І., Пирогов Б.І.* Технологічна мінералогія руд. Львів, 1999.
4. *Остащенко Б.А.* Направленное изменение технологических свойств минералов: Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Сыктывкар, 1998.
5. *Павлишин В.И., Юшкин Н.П., Попов В.А.* Онтогенический метод в минералогии. К., 1988.
6. *Пирогов Б.И.* Онтогенический метод в познании технологических свойств минералов // Проблемы онтогении минералов. Л., 1985.
7. *Пирогов Б.И., Холошин И.В.* Геолого-технологическое моделирование комплексных железорудных месторождений // Геолого-технологическое моделирование рудных месторождений: Сб. науч. тр. СПб., 1993.
8. *Пирогов Б.И., Поротов Г.С., Холошин И.В., Тарасенко В.Н.* Технологическая минералогия железных руд. Л., 1988.
9. Проблемы направленного изменения технологических и технических свойств минералов / Под ред. В.И. Ревнивцева. Л., 1985.
10. *Ревнивцев В.И.* Роль технологической минералогии в обогащении полезных ископаемых // Зап. Всесоюз. минерал. об-ва. 1982. Вып. 4. С. 443–449.

POSITIONS OF MINERALOGY IN MINERALS' ENRICHMENT

B. Pyrogov

*Moscow State Geological-Research University
Mikluho-Maklaya St. 23, RU – 117873 Moscow, Russian Federation
E-mail: gigia@rol.ru*

Main mineralogical positions in useful minerals enrichment have been considered. Composition, texture-structural and minerals peculiarities (including technological) of the useful minerals form in the united natural-technogenous system. The documentation worked out on this basis makes possible to direct skilfully by enrichment processes technology with forecasting of its indexes.

Key words: technological mineralogy, composition, useful minerals, ontogeny, peculiarities, valuation, forecast, mapping.

Стаття надійшла до редколегії 15.01.2002

Прийнята до друку 19.09.2002