

Міністерство освіти і науки України
Львівський національний університет імені Івана Франка

С. Бекеша, Є. Сливко, Н. Білик

МЕТОДИ МІНЕРАЛОГІЧ- НИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Цикл лекцій
Частина 1

Львів
ЛНУ імені Івана Франка
2013

УДК 549.08(075.8)
ББК Д33я73
Б42

Рецензенти:

д-р геол.-мін. наук, проф. *О. Матковський*
(Львів, Львівський національний університет
імені Івана Франка);

д-р геол. наук, зав. відділу *І. Наумко*
(Львів, Інститут геології і геохімії горючих копалин
НАН України)

*Рекомендовано до друку Вченою радою
геологічного факультету Львівського національного університету
імені Івана Франка
Протокол №95/3 від 6 березня 2013 р.*

Бекеша С.

Б42 Методи мінералогічних досліджень : Текст лекцій / С. Бекеша, Є. Сливко, Н. Білик. – Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2013. – 192 с.

Висвітлено головні аспекти мінералогічного аналізу, пов'язані з відбиранням, обробкою мінералогічних проб та діагностикою мінералів. Переважна частина матеріалу присвячена фізичним методам дослідження мінералів: рентгеноструктурному, мікрозондовому, оптико-спектроскопічному, люмінесцентному, термічному та електронній мікроскопії.

Для студентів геологічних факультетів вищих навчальних закладів.

**УДК 549.08(075.8)
ББК Д33я73**

© Бекеша С., Сливко Є., Білик Н., 2013
©Львівський національний університет імені
Івана Франка, 2013

ПЕРЕДМОВА

Мінералогічні дослідження є важливою складовою геологоровідувального процесу. Від їхнього методичного рівня залежить детальність вивчення речовинного складу родовищ корисних копалин, якість розшукових робіт, визначення нових видів мінеральної сировини, підвищення комплексності використання надр, розвиток нових, прогресивних технологічних схем і підвищення ступеня вилучення корисного компонента.

Запропонований посібник є деталізованим доповненням україномовного навчального видання Є. Сливко “Мінералогічний аналіз. Текст лекцій” (2004). Основа його – монографії, підручники та методичні рекомендації з різних аспектів мінералогічного аналізу й фізичних методів дослідження мінералів відомих учених і дослідників, прізвища яких наведено в зазначеному тексті лекцій, а також інші наукові праці відомих учених у галузі фізики мінералів: В. Гараніна, Б. Горобця, Г. Кудрявцевої, А. Марфуніна, С. Мацюка, О. Платонова, І. Плюсніної, А. Таращана та інших дослідників.

Крім головних аспектів мінералогічного аналізу, у посібнику детально розглянуто рентгенівські методи дослідження мінеральної сировини. Особливу увагу приділено рентгенометрії глинистих мінералів – складних шаруватих силікатів, інтерпретація яких досить часто є проблематичною не тільки для студентів, а й для фахівців. Описано й інші фізичні методи дослідження мінералів: електронно-зондовий рентгеноспектральний мікроаналіз, електронну та оптичну мікроскопію, люмінесцентний і термічний аналіз. Зроблено акцент на практичному застосуванні зазначених методів.

Посібник призначений для студентів напряму 6.040103 – геологія, освітньо-кваліфікаційний рівень – бакалавр. Дисципліну викладають за вибором вищого навчального закладу.

МІНЕРАЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ

Тема 1. МІНЕРАЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ, ТЕНДЕНЦІЇ ЇХНЬОГО РОЗВИТКУ ТА СУЧАСНІ ЗАВДАННЯ

Мінерал – важливий геологічний документ,
без якого неможливо відтворити історію Землі
і зрозуміти процеси, що в ній відбуваються.

Акад. Є. Лазаренко

Мінералогія посідає одне з провідних місць у підготовці фахівців геологічного профілю, оскільки, на думку таких видатних учених, як Д. Коржинський, Є. Лазаренко, О. Поваренних та інших, вона є фундаментом геологічних наук. Фундаментальність мінералогії зумовлена тим, що вона тісно взаємопов'язана з класичними фундаментальними науками, зокрема, хімією та фізикою, а об'єкт мінералогії – мінерал – це головне джерело генетичної інформації. Нині мінералогія є багатопрофільною структурованою наукою, яка охоплює значну кількість напрямів. Серед них чільне місце посідають методи мінералогічних досліджень. Під час мінералогічних досліджень учений використовує напрацьовані в мінералогії й суміжних науках методи вивчення речовини.

Акад. В. Вернадський наголошував на тому, що “лише на спостереженні мінералог зупинитися не може”. Після спостережень у природі настає час точних лабораторних досліджень. Завдяки результатам різноманітних досліджень мінеральної речовини вчений отримує вагому мінералогічну інформацію – первісні мінералогічні знання, які є підґрунтям для подальших мінералогічних побудов, узагальнень, теорій і, врешті-решт, для поєднання мінералогії з геологічною практикою.

Зазначимо, що використання мінералогічних методів для вирішення прикладних завдань розшуково-оцінного спрямування набуло особливого розвитку останніми десятиріччями, чому сприяли дві обставини: по-перше, суттєвий прогрес у вивченні конституції та загалом усіх властивостей мінералів, а також у вдоскона-

ленні методів їхнього дослідження; по-друге, значні масштаби топомінералогічних досліджень і мінералогічного картування, за допомогою яких визначають просторово-часові особливості поширення мінералізації. У підсумку накопичено значний фактичний матеріал, який підтверджує високу ефективність застосування мінералогічних методів під час розшуків та оцінювання родовищ корисних копалин.

Досвід використання мінералогічних ознак і критеріїв під час розшуків руд має багатовікову історію. За шліхами, валунами, іншими уламковими ореолами, за виходами навколорудних змінених порід на денну поверхню рудознавці та професіонали гірничої справи здавна відкривали джерела мінеральної сировини. За такими очевидними розшуковими ознаками в минулому відкрито багато відомих, проте нині вже відпрацьованих родовищ.

Суттєві досягнення прикладної мінералогії дають змогу повному оцінити запас інформації, який міститься в мінералі – продукті складних багатоактних природних процесів. Численні дослідження засвідчують, що в мінералі та мінеральних асоціаціях (парагенезисах) зафіксована вся історія їхнього утворення й перетворення, дані про джерело зруденіння, роль вмісних порід, тривалість і характер власне процесу рудогенезу, його фізико-хімічні параметри та ін. Виявлено стійкий зв'язок між складом, іншими властивостями мінералів, їхніми парагенезисами, з одного боку, та умовами їхнього утворення, – з іншого. Вивчення таких зв'язків є основою вчення про типоморфізм мінералів.

З погляду історії розвитку різноманітних методів мінералогічних досліджень заслуговує на увагу період, який припав на 50–70-ті роки ХХ ст. Саме тоді в Україні розпочали систематичні мінералогічні дослідження, спрямовані на вивчення мінерального складу різних типів гірських порід і руд. Важливе значення надавали виявленню особливостей конституції мінералів, їхньої морфології та фізичних властивостей. Дослідники зосередили увагу на властивостях реальних мінеральних індивідів – їхньому хімічному складі, дефектності кристалічної структури, анатомії, розподілі в агрегаті й геологічному тілі. Активно почали вивчати включення в мінералах – джерело об'єктивної інформації про фізико-хімічні умови середовища мінералоутворення. Розпочато дослідження в

галузі фізики мінералів (інтерпретація спектрів, побудова відповідних кристалохімічних моделей, відкриття й систематизація електронно-діркових центрів, з'ясування можливостей спектроскопічних методів для уточнення механізмів і схем ізоморфних заміщень, катіонного розподілу, природи дегідроксилізації, радіаційного й термічного впливу на мінерали). Паралельно провадили роботи з дослідження природи фізичних властивостей мінералів.

З середини 70-х років ХХ ст. в Україні інтенсивно розвивають методи мінералогічної кристалографії, кристалохімії, структурної мінералогії та фізико-мінералогічні дослідження, спрямовані на поглиблене вивчення мінералів. Особливе досягнення фізики мінералів цього періоду – розробки спектроскопічних характеристик мінералів як елементів мінералогічного картування. Важливі результати отримано в процесі радіоспектроскопічного дослідження кварцу й польових шпатів. Реалізовано нові можливості радіоспектроскопії стосовно задач геохронології і рудоносності мінеральних комплексів, обґрунтовано нові моделі перенесення й концентрації золота і рідкісних металів. Усе це відкрило нові шляхи пізнання природи мінеральної речовини та закономірностей мінерало-, породо- й рудоутворення на засадах подальшого розвитку уявлень про типоморфне значення тонких конституційних особливостей і фізичних властивостей мінералів. Особливо це стосується досліджень з оптичної спектроскопії, люмінесценції та радіоспектроскопії. З'ясовано кристалохімічну природу інфрачервоних спектрів мінералів, зокрема водневмісних, уточнено структури багатьох мінералів.

Нижче наведено систему методів, за допомогою яких студент зможе навчитися “зчитувати” з мінералу інформацію, яку вклала в нього Природа у вигляді певних зовнішніх ознак (морфологія, форма, забарвлення, блиск та ін.), особливостей хімічного складу, внутрішньої будови тощо. Наприклад, для відтворення історії мінерального індивіда використовують морфолого-анатомічний та морфологічний аналіз. Досить різноманітні методи виявлення прихованої анатомії кристалів. Для вивчення поверхонь стику (зрощення) індивідів ефективні як візуальні спостереження, так і методи гоніометрії, фотогоніометрії, растрової електронної й світлової мікроскопії. Загалом процес дослідження мінералу охоплює такі

види аналізу, як мікродослідження під бінокулярним і поляризаційним мікроскопом, хімічний аналіз, рентгеноструктурне вивчення (діагностика мінералу, поліморфних і політипних модифікацій, з'ясування чи уточнення кристалічної структури, визначення параметрів елементарної комірки тощо), виявлення природи забарвлення, люмінесценція мінералів та ін. Сучасні досягнення в мінералогії пов'язані з широкомасштабним застосуванням низки нових методів дослідження: електронної мікроскопії та електронографії, рентгеноспектрального мікрозондування, ІЧ-спектроскопії, месбауерівської спектроскопії, електронного парамагнітного резонансу (ЕПР), ядерного магнітного резонансу (ЯМР), ядерноквадрупольного резонансу (ЯКР), а також дифрактометричних, електростатичних, магнітостатичних, квантово-оптичних та інших методів. Дослідження, особливо із застосуванням високолокальних методів, допомогли проникнути в надзвичайно тонкі деталі будови, складу та властивостей мінералів і відкрити перед нами світ нових явищ.

Удосконалення методів мінералогічних досліджень дало змогу розвинути вчення про типоморфізм мінералів, виявити головні особливості прояву типоморфних властивостей, за допомогою яких можна вирішувати важливі розшуково-оцінні задачі. Наведено декілька прикладів.

1. Виявлено, що специфічні фізико-хімічні умови утворення геологічних формацій і родовищ зумовлюють появу певних мінеральних парагенезисів, а інколи – окремих мінералів, мінералів-індикаторів, які трапляються лише в якихось певних типах порід або на родовищах конкретного формаційного типу. Це дає змогу корелювати ідентичні за генезисом формації, визначати формаційну належність родовищ, використовуючи як індикатор (або репери) типоморфні мінеральні асоціації чи окремі мінерали.

2. Достатньо часто виявляється, що мінерал формувався в широкому діапазоні термодинамічних параметрів і, по суті, є полігенним. Однак, визначаючи тонкі особливості складу та низку інших властивостей таких мінералів, удається визначити відмінності не тільки для взірців з різних за умовами утворення родовищ, а й для мінералів, відібраних з різних рівнів вертикального розрізу одного й того ж рудного тіла (вони формувалися на різних етапах і стадіях становлення родовища). У цьому випадку типоморфним

стає вже не сам мінерал, а його властивості. Найголовніші з них такі:

1) морфологія і габітус виділень мінералів, кристалографічно оформлених або ксенобластових, підпорядкованих геометрії середовища мінералоутворення;

2) інші зовнішні ознаки мінералу: розмір виділень, скульптура поверхні граней кристалів, характер зростань, забарвлення, блиск, ступінь збереженості та ін.;

3) співвідношення головних (конституційних) елементів хімічного складу мінералу, а також склад і співвідношення елементів-домішок, кристалохімічно пов'язаних з його структурою;

4) специфічні “механічні”, твердофазові мікродомішки в матриці мінералу, а також різноманітні включення мінералоутворювального середовища;

5) кристалічна структура мінералу, ступінь її досконалості;

6) наявність мікродефектів, тонких особливостей кристалічної структури мінералу, які виявляються в нестехіометрії складу, появі структурних вакансій, різноманітних “центрів”, які можна фіксувати різними методами аналізу (ЯМР, ЕПР, ЯГР, люмінесцентна спектроскопія тощо);

7) інші фізичні властивості мінералів: теплофізичні, електромагнітні, механічні, оптичні та інші, які відображають особливості складу і структури конкретного взірця; отже, вони є індикаторами певних термодинамічних параметрів умов його утворення;

8) співвідношення низки ізотопів елементів, які наявні в складі мінералу; вони також є індикаторними як для визначення температурних умов його утворення, так і для уявлень про джерело рудної речовини (мантієне, корове, змішане).

Список використаної та рекомендованої літератури

1. Лазаренко Е. К. Опыт генетической классификации минералов / Е. К. Лазаренко. – Киев, 1979.
2. Вернадский В. И. История минералов земной коры : [Избр. соч. : В 5 т.] / В. И. Вернадский. – М., 1959. – Т. 4, кн. 1.

3. Матковський О. Основи мінералогії України : [Підручник] / О. Матковський, В. Павлишин, Є. Сливко. – Львів, 2009.
4. Павлишин В. І. Генетична мінералогія: історія та сучасний стан / В. І. Павлишин // Зап. Укр. мінерал. т-ва. – 2004. – Т. 1.
5. Павлишин В. І. Генезис мінералів : [Підручник] / В. І. Павлишин, О. І. Матковський, С. О. Довгий. – К., 2003.
6. Павлишин В. И. Очерк истории минералогических исследований на Украине / В. И. Павлишин // История минералогических исследований на Украине : [Сб. науч. тр.]. – Киев, 1991.

Тема 2. МІНЕРАЛОГІЧНЕ ОПРОБУВАННЯ

Мінералогічна інформація щодо окремого родовища чи рудопрояву, виявлення мінералогічних ознак і критеріїв під час розшуково-оцінних робіт різного масштабу ґрунтуються на дослідженні малої кількості матеріалу, відібраного з великого його об'єму на родовищі, збагачувальній фабриці, у шахті або за польових умов. Таку малу кількість речовини, відібрану з великого її об'єму, називають *пробою*, а процедуру відбирання проб – *пробовідбиранням*. Мета пробовідбирання – одержати малі частки цілого, за якими можна було б судити про характер цілого.

Пробовідбирання – винятково важливий чинник будь-якого аналізу. Наприклад, геолог відбирає проби зі звітрілого зовнішнього шару породи для того, щоб мінералогічно схарактеризувати свіжі підстильні породи. У цьому разі дуже важливо, щоби проба містила не одні лише легкодоступні верхні звітрілі часточки досліджуваного виходу. У пробі повинен бути корінний, незвітрілий матеріал, який звичайно важко відколювати (тому його часто не відбирають).

Представницька проба – це невелика частина, яка в середньому має ті ж характеристики, що й весь об'єм матеріалу, з якого її взяли. Часто це суміш деякої кількості дрібніших проб (взірців), узятих із множини. Наприклад, представницькою пробою може слугувати як увесь kern, так і деяка кількість проб, відібраних із цього kern. Середній результат, отриманий за

великою кількістю представницьких проб, наближається до результату, що його могли б отримати в разі дослідження всього об'єму матеріалу.

Схема пробовідбирання – це набір інструкцій з відбирання проб. Наприклад, схемою пробовідбирання може слугувати мітка буріння, яку використовують для визначення місця розташування свердловин, або розрахункова сітка, яку використовують під час оптичних досліджень. Схема не завжди, проте досить часто представлена сіткою.

У разі *простого випадкового пробовідбирання* необхідно, щоб у пробі з однаковою вірогідністю можна було виявити всі можливі ознаки досліджуваного матеріалу.

У разі *систематичного пробовідбирання* беруть множини зрізів з певною періодичністю. Ця періодичність не повинна збігатися з періодичністю якоїсь властивості матеріалу, який випробовують. Наприклад, можна періодично випробовувати продукт, що його отримують під час переробки на фабриці, проте період пробовідбирання не повинен збігатися з періодами якихось коливань у виході продукту.

У разі *послідовного пробовідбирання* множини (тобто масу матеріалу) ділять на відповідні підмножини. Наприклад, множини частинок різного розміру спочатку ділять на зручну кількість підмножин. Кожну підмножину випробовують і вимірюють окремо, після чого роблять висновок стосовно всієї множини.

Головною вимогою під час відбирання проб є досягнення оптимального представництва їх за масою. Мінеральний склад руд найчастіше вивчають за *штуфними* і *валовими* пробами, рідше – за *точковими*, *борозневими* або *задирковими*. Під час розвідування родовищ бурінням руди вивчають за даними *кернового* пробовідбирання, хоча маса кернових проб, особливо у разі вкрай нерівномірного розподілу корисних компонентів, часто виявляється недостатньою для необхідного представництва проб. У таких випадках аналізують *кернові проби з куца свердловин*, пробурених на одній ділянці родовища. Зазвичай ці об'єднані кернові проби куца свердловин використовують і для попередніх лабораторних технологічних випробувань руд.

Дуже важливе значення має *маса проби*. Надійну масу проби Q (кг), яка відповідає її представництву за найбільшого діаметра складових частинок або зерен мінералів d (мм), визначають за формулою Річардса–Чеччота:

$$Q = Kd^2,$$

або за загальною формулою Демонда–Хальфердаля:

$$Q = Kd^n,$$

де K – емпіричний коефіцієнт, що має значення від 0,02 до 1,0 залежно від вмісту корисних компонентів, крупності зерен мінералів та їхньої концентрації; n – емпіричний показник ступеня, значення якого коливається від 1,5 (для крихких і м'яких порід) до 2,7 (для щільних і в'язких порід). Коефіцієнти K і n змінюються незалежно один від одного, їх визначають дослідним способом. У практиці звичайно застосовують першу формулу.

Способи пробовідбирання

Первинне пробовідбирання часто виконують у польових умовах. За наявності потенційно рудного тіла його проводять за допомогою буріння, шурфів (пробитих вузьких і неглибоких отворів), канав, прокладених у рудному тілі, або підземних гірничих виробок.

З твердих щільних порід проби звичайно відбирають методом *колонкового буріння*. Його виконують за допомогою кільцевого бурильного наконечника (коронки), прикріпленого до вертикальної металевої труби, що обертається (бурильної колони). Наконечник покритий твердим матеріалом – карбідом вольфраму або алмазом. Головною перевагою цього методу є те, що в керні зберігаються просторові взаємовідношення мінералів у породі.

М'які, недостатньо щільні та пористі породи випробовують з використанням бурів, які працюють за ударним або обертальним принципом, з шаровими, а не керновими коронками (*ударно-канатне буріння*). Під дією бурильного інструмента породу розбивають на дрібні фрагменти. Ці фрагменти на поверхню виносить сильний потік води, що циркулює по свердловині. Дроблені породи, отримані з такої свердловини, часто достатньо

адекватно відображають деякі загальні характеристики перебуваної породи, однак у таких уламках не зберігаються просторові взаємовідношення мінералів. Також може змінюватися природний розмір зерен окремих мінералів. Отже, такі проби завжди мають меншу мінералогічну цінність, ніж повний kern, що його отримують у разі алмазного колонкового буріння.

Методи *шурфування* та *риття каналів* часто використовують під час пробовідбирання м'яких, недостатньо щільних порід до глибини близько 20 м. У разі потреби матеріал, отриманий з шурфу або каналу, можна використовувати як єдину первинну пробу. Зрозуміло, що в ньому губляться первинні структури й текстури породи. Водночас текстури в стінках шурфу (або каналу) зберігаються, і такі породи можна самостійно відбирати й досліджувати.

Надзвичайно важливим є *шліхове пробовідбирання*. Зазвичай, його проводять уздовж гідрографічної мережі. Шліхи потрібно брати в місцях накопичення важких мінералів – на ділянках сповільненої течії, у заглибинах русел річок, на косах, у нижніх частинах бортів річок, особливо в приплотикових ділянках. *Шліхом* називають концентрат важких мінералів, який отримують під час промивання пухких відкладів. Якщо концентрат важких мінералів отримують з дроблених корінних порід, то шліх називають *штучним*.

Пробовідбиранню підлягає алювій усієї гідромережі. Головне значення для шліхового пробовідбирання мають дрібні бокові допливи, яри, а також берегові, озерні й морські алювіальні відклади.

Руслові проби відбирають безпосередньо з косових відкладів річок і потічків. У косі проби треба відбирати по всій її довжині. Найліпшим середовищем для пробовідбирання є піщано-гальковий матеріал з домішкою глини. Руслові проби відбирають із шурфів, невеликих гірничих виробок, розчисток. Залежно від масштабу знімання, завдання, геоморфологічних умов шліхові проби відбирають через певні інтервали.

Паралельно з пробовідбиранням руслових відкладів відбирають проби з бортів долини, підніжжя схилів і сучасних пухких уламкових утворень. Бортове пробовідбирання потрібно проводити з урахуванням рельєфу місцевості. Найліпше проби

відбирати за маршрутами, що прокладені паралельно до ізогіпс рельєфу. У цьому випадку проби будуть розміщені перпендикулярно до потоку розсіювання цінних мінералів.

У корінних породах і рудах проби відбирають точковим або штуфним методом. Початкову пробу масою 8 кг дроблять до 1 мм і потім промивають до сірого шліху. Так з'ясовують джерела винесення цінних мінералів.

Відстань між шліховими пробами залежить від геологічної будови району, поставленої мети, а також низки інших чинників. Чим дрібніший масштаб геологічного та шліхового знімання, тим більша відстань між пробами, і навпаки.

Місце взяття шліхової проби фіксують на плані або карті відповідного масштабу. У польовому щоденнику наводять стислий опис геоморфології досліджуваної ділянки, а також розріз, який розкрили шурфом. Доцільно робити зарисовки відслонення в точках опробування корінних порід.

Для отримання коректних результатів шліхового пробовідбирання під час розшукових і особливо розшуково-оцінних робіт необхідно, передусім, дбати про те, щоб маса вихідної проби була незмінною, щоб її стандартний об'єм не змінювався не тільки впродовж польового сезону, а й протягом усіх робіт на заданій території. Досвід виконання шліхових робіт свідчить, що мінімальна маса початкової проби для промивання повинна бути 32 кг, що відповідає $0,02 \text{ м}^3$ об'єму породи. Звичайно стандартну масу вихідної шліхової проби визначають за допомогою спеціального коритоподібного ящика. Стандартизацію маси вихідної проби можна забезпечити, використовуючи таровані брезентові мішки, у яких проби транспортують до місця промивання. Місткість такого мішка визначають попереднім зважуванням.

Глибина відбору проб у руслових відкладах залежить від складу й потужності відкладів. Найчастіше глибина відбору становить 0,30–0,50 м, в окремих випадках – 0,70–1,0 м. Цього цілком достатньо для виявлення потоків розсіювання цінних мінералів в алювії та перспективного оцінювання досліджуваного району. Проби з бортових відслонень алювію й терас відбирають під час проходження неглибоких шурфів і розчисток. У цьому разі

глибина відбору залежить від потужності відкладів, які перекривають приплотикову частину бортів річок; вона може змінюватися від 0,5 до 1,5–2,0 м.

Для відбирання шліхових проб з елювію й делювію використовують неглибокі ямки (0,3–0,5 м), зрідка – шурфи завглибшки 1,0–1,5 м.

Відібрані проби промивають у воді для одержання важкого залишку – шліху. Для промивання за польових умов найчастіше застосовують спеціальні лотки або ковші. Якщо потрібна підвищена точність виділення цінних мінералів і наявні великооб’ємні проби, то промивання виконують за допомогою продуктивніших механізмів і пристроїв: гвинтових сепараторів, бутар, вашгердів та інших збагачувальних установок.

У польових умовах проби промивають біля річок і потічків з повільною течією, а якщо водотоку нема – то на березі ставка або інших дрібних водних басейнів.

Лоткове промивання проб виконують у три етапи: 1) пробурка проби (відмулювання від глинистих частинок і вивільнення від великоуламкового матеріалу); 2) власне промивання (змивання піщаної фракції); 3) доведення шліху.

Доведення шліху – найвідповідальніший етап підготовки проби. Звичайно шліхову пробу промивають до “сірого” шліху. Як тільки з лотка почнуть змиватися зерна гранату (якщо їх нема, то зерна титаніту й піроксенів), промивання закінчене. У цьому випадку в шліху зберігаються зерна таких цінних мінералів середньої густини, як діамант, монацит, титаносилікати, мінерали групи турмаліну і багато типоморфних супутників зруденіння. Промивання проб до “чорного” шліху виконують тільки під час розшукових робіт на мінерали з високою густиною (самородні золото і платина, вольфрам, каситерит тощо). У всіх методичних рекомендаціях зі шліхового пробовідбирання наголошено, що шліх ліпше не домити, ніж перемити і втратити частину цінних мінералів з порівняно невеликою густиною.

Отримані під час промивання шліхи висушують і зсипають у пакети з цупкого паперу, на яких пишуть номери проби та вихідні дані стосовно заgonу, партії, експедиції тощо, які відбирали пробу. Всередину пакета кладуть етикетку з написаними олівцем даними

про пробу: номер проби, місце відбору, найменування організації, прізвище геолога, під керівництвом якого відібрано пробу.

Шліхове пробовідбирання передбачає обов'язкову документацію. На карті олівцем наносять точку, яка відповідає місцю взяття проби, а поряд зазначають номер проби. Результати пробовідбирання фіксують у польовому журналі, де повинні бути такі дані: дата, номер шліхової проби, глибина відбору проби, генетичний тип відкладів, літологічні особливості порід, маса (або об'єм) проби, маса шліху (г).

Вторинне пробовідбирання. Первинна проба, відібрана з рудного тіла, може мати масу в десятки, а іноді в сотні кілограмів. Детальне дослідження потребує попереднього суттєвого зменшення маси проби. Кількість матеріалу, необхідна для хорошої проби, є функцією розміру частинок.

Ефективність пробовідбирання є функцією головно кількості частинок: чим більше частинок у первинній пробі, тим легше отримати з неї представницьку вторинну пробу. Кількість частинок можна збільшити, зменшивши їхній розмір: наприклад, зменшення лінійних розмірів на 50 % приводить до збільшення кількості частинок у вісім разів. Отже, якщо вторинна проба у вісім разів менша від первинної, то вона міститиме ту саму (дуже велику) кількість частинок за умови, що їхній розмір зменшиться удвічі (наприклад, від 2 до 1 см).

За вторинне пробовідбирання первинних проб, підготовку робочих проб і кінцеві заміри відповідає мінералог.

Мінералогові перед процедурою вимірювання завжди доводиться зменшувати масу первинної проби. Одним із оптимальних способів зменшення маси грубих матеріалів (з розміром зерен до декількох сантиметрів) є *метод конування і квартування*.

Матеріал згрібають у правильний конус (досипаючи потрошку зверху). У правильно підготовленому конусі чітко виявлена сегрегація частинок – більші, округлі й важкі концентруються на периферії конуса, а дрібніші, плоскі й легкі – поблизу його центральної частини. Потім конус сплющують зверху, щоб отримати “пиріг” завтовшки декілька сантиметрів; для цього до вершини конуса притискають плоску пластинку. “Пиріг”

розрізають на чотири однакові сегменти: пару протилежних сегментів вилучають (або зберігають для наступних аналізів), а інша пара – це вторинна проба з меншою масою. У разі потреби операцію повторюють на вторинній пробі.

Ще одним методом відбору проб є *розсіювання* за допомогою пристрою для розділення сухого сипкого матеріалу. Застосування його звичайно обмежене матеріалом, складеним з частинок малого розміру – діаметром менше декількох міліметрів. Пристрій – це металевий конвектор, поділений на парну кількість (16 або 8) рівновеликих відділень. Відділення попарно коливаються у протилежних напрямках. Матеріал кладуть на спеціальну лопатку, ширина якої дорівнює ширині контейнера розсіювача, на ній матеріал розподіляється однорідним шаром. Потім його поступово подають у розсіювач, де він розділяється на однакові половини, кожну з яких збирають у коритця, розташовані по обох боках пристрою. Одну половину (наприклад, ту, яка надходить у переднє коритце), викидають або зберігають для наступних потреб; інша половина – це вторинна проба.

Більшу частину проб для аналізу отримують послідовними операціями, причому кожна така операція є власним джерелом помилок. Помилки можна звести до мінімуму, застосовуючи адекватні методики пробовідбирання і приготування проб.

З мінералогічного матеріалу важко відбирати проби, тому що:

- 1) маса матеріалу часто вкрай велика;
- 2) розмір частинок матеріалу часто коливається в широких межах;
- 3) частинки можуть суттєво відрізнятися за формою, густиною, масою і мінеральним складом;
- 4) компоненти, що цікавлять дослідника, можуть траплятися у вкрай низьких концентраціях;
- 5) потрібно визначити не єдине середнє значення, а розподіл значень.

Методи оцінки похибки аналізу на підставі статистичного опрацювання результатів конкретних вимірювань добре описані в літературі. Менше розроблені питання зниження похибки аналізу завдяки методично правильному відбиранню проб та їхній

підготовці до досліджень. Похибка елементного аналізу мінеральної сировини зазвичай не перевищує 8–10 %, тоді як решта сумарної похибки дослідження (до 90 %) пов'язана зі стадіями відбирання й підготовки проб, причому відносно похибку внаслідок операцій підготовки проб оцінюють у 30 %.

Варіації помилок (проте не самі помилки) на кожній стадії опробування кумулятивні, тому бажано, щоб усі стадії дослідники виконували з однаковою ретельністю й уважністю. Під час відбирання проб не можна допускати зміни характеристик матеріалу. Особливо трудомістким є пробовідбирання мінералогічного матеріалу, проте результати його завжди можна поліпшити в разі ретельного відбирання проб з урахуванням поставленого завдання.

Процес пробовідбирання має бути пристосований до кожного типу матеріалу, причому за потреби для вдосконалення методики пробовідбирання можна використовувати дані, отримані під час попереднього дослідження матеріалу.

Погане пробовідбирання може призвести до спотворення результатів, яке не вдасться виправити за допомогою збільшення кількості вимірювань.

Мінералогу необхідна велика кількість оперативно отримуваних і точних мінералогічних даних. Хороші результати можна отримати тільки на хороших пробах; хороші проби зазвичай вартісні, однак погане пробовідбирання може призвести до повної невдачі.

Список використаної та рекомендованої літератури

1. Джонс М. П. Прикладная минералогия / М. П. Джонс. – М., 1991.
2. Матковський О. І. Шліховий аналіз : Програма, методичні вказівки і контрольні завдання / О. І. Матковський. – Львів, 1977.
3. Методы минералогических исследований : [Справочник] / [под ред. А. И. Гинзбурга]. – М., 1985.
4. Сливко Є. М. Мінералогічний аналіз : [Текст лекцій] / Є. М. Сливко. – Львів, 2004.

Тема 3. МЕТОДИ РОЗКРИТТЯ МІНЕРАЛІВ. ГРАНУЛОМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ

Для отримання високоякісного концентрату (“штучного” шліху) з твердої мінеральної суміші частину відібраного матеріалу треба повністю звільнити від супутніх мінералів (виконати *розкриття*). У пісках, ґрунтах, алювіальних відкладах мінерали розкриті під дією природних агентів. Проте кристалічні породи досить міцні, тому потрібно розкрити породну матрицю й вивільнити потрібний мінерал. Звичайно цього досягають дробленням породи на дрібні частинки. Повного розкриття таким способом досягають зрідка і на практиці продовжують дробити породу до 90–95 % розкриття цінного мінералу.

Зазвичай розробляють певні схеми підготовки проб для мінералогічних досліджень. Важливо правильно вибрати початкову та кінцеву крупність подрібнення, щоб забезпечити найповніше вивільнення великих зерен корисних мінералів зі зростків і розкриття тонко вкраплених мінералів за умов мінімального переподрібнення проби. Крупність подрібнення суттєво залежить від текстурно-структурних особливостей матеріалу, який досліджують. Важливе значення для розкриття полімінеральних зростків мають форма і розмір головних рудоутворювальних мінералів, характер їхніх зрощень, наявність у мінералах спайності, тріщинуватості, поява вторинних мінералів тощо. Тільки з урахуванням усього комплексу мінералого-петрографічних особливостей проби можна з'ясувати необхідний ступінь подрібнення матеріалу і правильно пояснити поведінку мінералів під час пробопідготовки. На підставі цих чинників визначають найефективніший спосіб руйнування матеріалу і розробляють раціональну схему пробопідготовки.

Рекомендовано таку послідовність різних операцій під час підготовки проб:

- виявлення мінералого-петрографічних особливостей матеріалу проби на підставі макро- і мікроскопічних досліджень;
- обґрунтування початкової крупності дроблення і кінцевої крупності подрібнення проби;

- вибирання способу дезінтеграції (або раціонального поєднання різних способів);
- дезінтеграція матеріалу з послідовною класифікацією за заданими класами крупності та скороченням матеріалу;
- відбирання аналітичної проби або наважки для виділення мономінеральних фракцій.

Дроблення

Під час мінералогічних досліджень дотримуються принципу послідовної дезінтеграції проби за багатостадійними схемами, які охоплюють крупне (від 100 до 10 мм) і середнє (від 10 до 1 мм) дроблення та тонке подрібнення (від 1 мм і менше) матеріалу проби.

Для крупного дроблення проб звичайно використовують щоківі дробарки. Середнє дроблення виконують головню у валкових дробарках, рідше – у молоткових.

Щоківі дробарки діють за принципом роздавлювання матеріалу між двома металевими “щокими”, які гойдаються; вони бувають гладкі або рифлені. Чинником регулювання режиму дроблення є розмір розвантажувальної щілини між щокими. Режим дроблення оцінюють за фактичними характеристиками гранулометричного складу продуктів дроблення і розподілом у них вільних мінералів і зростків. Щоб уникнути передрібнення проби і корисних мінералів, дроблення виконують у декілька прийомів з послідовним зменшенням розміру розвантажувальної щілини і безперервним повним завантаженням живильника дробарки вихідною пробою. Такий спосіб живлення порівняно з покусковим завантаженням суттєво поліпшує характеристику гранулометричного складу дробленого продукту, вдвічі збільшуючи вихід заданого робочого класу. Погіршення показників у разі покускового завантаження пов’язане зі швидким прослизанням окремих плоскіших кусків породи у розвантажувальну щілину в той момент, коли в зоні дроблення міститься незначна кількість дрібного матеріалу. У разі повного завантаження живильника (бункера) дрібний матеріал, перебуваючи в зоні дроблення, сприяє захопленню, гальмуванню та повнішому руйнуванню великих кусків породи.

Розмір вихідних кусків руди – 50–80 мм, кінцевих – 2–8 мм, продуктивність – 100–650 кг/год, втрати великі. Проте шокові дробарки прості, їх нескладно експлуатувати. Марки шокових дробарок: ДЩ 100×60, ДЩ 150×80, ДЩ 150×100 (цифри – це розмір приймального отвору, довжина × ширина, мм). Куски породи, які можуть, не застряючи, надходити у шокову дробарку, повинні мати максимальний розмір на 15–20 % менший від розміру приймального отвору.

Руйнування кусків породи у *валкових дробарках* відбувається внаслідок роздавлювання матеріалу проби між циліндричними валками, які обертаються назустріч один одному. Валки звичайно виготовляють з чавуну, а робочі поверхні футерують змінними бандажми з манганової або хромистої сталі. Крупність дроблення матеріалу регульована щілиною між валками і силою, з якою валки притискаються один до одного. Подрібнюваний матеріал потрібно завантажувати у валкову дробарку рівномірно за всією довжиною робочої поверхні валків, оскільки нерівномірність живлення механізму утруднює одержання дробленого матеріалу заданої гранулометричної характеристики, а також призводить до зношення бандажів.

Розмір кусків матеріалу, що завантажуються, повинен бути в 20 разів менший від діаметра валків.

Розмір вихідних кусків руди – 5–10 мм, кінцевих – 0,5–3 мм, продуктивність – 30–150 кг/год, втрати значні. Проте валкові дробарки також прості, їх нескладно експлуатувати.

Для тоншого подрібнення дроблених проб промисловість випускає велику кількість різноманітних *млиноків* та *стирачів*. Для подрібнення проб у водному середовищі використовують стрижневі (МЛ 48; МЛ 84) та кульові (МЛ 52; МЛ 40; МЛ 75^а; МЛ 85^а) млини. Ступінь подрібнення в них залежить від часу обробки проби, а також від розміру й матеріалу, з якого виготовлені розмелювальні кулі або стрижні. Стрижневі млини забезпечують досить тонкий помел і однорідність матеріалу за гранулометричним складом. Проведення операції у водному середовищі вносить певні обмеження під час підготовки проб до подальших досліджень.

Для сухого подрібнення проб масою до декількох сотень грамів використовують дискові стирачі ЛДИ-60 або ЛДИ-209, вібраційний стирач ІВ-2, а також механічні ступки СМБ та СМБМ конструкції ВІМС. Широко застосовують у пробопідготовчих цехах і дискові агреговані стирачі типу ИДА-175 та ИДА-250. У деяких лабораторіях використовують кулачкові стирачі ЦИ-02 та 05, у яких стиральні елементи – кільце і два кулачки – зроблені з високостійкого керамічного матеріалу інертного складу. Це унеможлиблює зараження проби металом і підвищує опірність стиральних елементів до абразивного зношування. Ступінь подрібнення матеріалу в стирачі ЦИ-05 регулюють за допомогою реле часу.

Крихіті проби подрібнюють на багатопозиційних напівавтоматичних вібростирачах карусельного типу ПВИ-2. Час роботи агрегату регулюють залежно від механічних властивостей матеріалу, який подрібнюють. Елементи автоматизації полегшують розвантаження й очищення механізму.

Для тонкого стирання малих наважок мінералів у разі підготовки проб до елементного аналізу придатні ручні яшмові або агатові ступки. Для підготовки проб масою від 20 до 2 000 мг застосовують механічні мікростирачі “Мікрон”.

Проте вади всіх цих механічних методів очевидні. Усі механічні системи для дезінтеграції матеріалів досить енергоємні, не забезпечують вибіркового подрібнення проб з максимальним розкриттям зростків мінералів, спричиняють значне переподрібнення матеріалу, його забруднення матеріалом робочих деталей механізмів і, нарешті, впливають на склад і фізичні властивості окремих мінералів, спотворюючи їхні вихідні значення. Тому щораз активніше застосовують нові методи подрібнення матеріалів, вільні від зазначених недоліків.

Нині застосовують такі методи руйнування порід, як аеродинамічний, пневмо- і термомеханічний, ультразвуковий, електрогидравлічний, електроімпульсний та ін. За різниці фізичних ефектів, які є в основі кожного з цих способів, усі вони зводяться до створення в матеріалі, що руйнується, полів напружень, спрямованих на розрив міжмолекулярних зв'язків і утворення нових меж поділу. У кожному конкретному випадку поля

напружень суттєво відрізняються за видом деформацій, які вони спричиняють (розтягнення, стиснення, зсування, розривання), а також за швидкістю їхнього перебігу. Саме ці характеристики докорінно впливають на ефективність того чи іншого способу руйнування матеріалу. Важливу роль у забезпеченні процесу руйнування проби відіграє також середовище, у якому відбувається дезінтеграція матеріалу, оскільки воно безпосередньо пов'язує джерело виділення й перетворення енергії з матеріалом, що зазнає руйнування. Таким енергоносієм може бути тверде тіло, рідина, газ, плазма або електромагнітне поле.

Наприклад, *аеродинамічний спосіб дезінтеграції* реалізований у відцентрово-відбивному млині (ЦОМ). Окремі куски породи, завантажені в агрегат, потрапляють у канали ротора, який швидко обертається, і зазнають у ньому значного прискорення. Із ротора матеріал викидається в напрямі до відбивних пластин. У разі колективного вилітання частинок проби з каналів ротора відбувається їхнє перегрупування у краплі суспензії (або пульпи), що летить; це зумовлене гальмуванням фронту краплі зустрічним потоком повітря. Залежно від густини і розміру частинок матеріалу важчі та щільніші з них переміщуються в передню частину краплі, а легкі збираються в задній частині. Під час удару краплі у відбивну пластину руйнуються, передусім, “фронтальні”, важкі частинки, а легші, амортизуючись об цю фронтальну частину, руйнуються менше. Завдяки цьому досягають підвищеної селективності подрібнення проб, ліпшого розкриття зростків і меншого зашламування проб. Вадою методу є вологий режим дроблення.

У лабораторних умовах реалізований також *електроімпульсний спосіб* руйнування матеріалу. В його основі – явище проникнення імпульсу електроіскрового заряду переважно в мікротріщини, порожнини й ослаблені зони в куску гірської породи, які створюють напруження розтягнення на межах зрощення різних мінеральних фаз. У момент електричного розряду відбувається вибіркоче руйнування мінеральних зростків по тріщинах, приурочених звичайно до меж зрощення зерен окремих мінералів.

Оскільки повне розкриття є таким важливим для отримання мономінеральних фракцій, і сепарацію в лабораторних умовах виконують на малих кількостях матеріалу (не більше декількох десятків кілограмів), то можна використовувати *вартісні методи розкриття*, які економічно не прийнятні у промислових масштабах. Наприклад, хімічно інертні мінерали типу турмаліну, циркону й каситериту можна вивільнювати з кварцових пегматитів розчиненням кварцу у плавиковій кислоті. Цю процедуру в жодному разі не можна проводити без відповідних захисних засобів (рукавички, наруківники, фартухи), кислоту потрібно зберігати у спеціальних поліетиленових посудинах, процес розчинення проводити у витяжній шафі.

Несульфідні мінерали можна вивільнювати з багатої на пірит вмісної породи високотемпературним окисненням піриту з утворенням водорозчинного сульфату. Мінерали, що містяться в карбонатах (наприклад, у кальциті), можна розкрити або розчиненням кальциту соляною кислотою, або кальцинацією породи з утворенням оксиду кальцію (CaCO_3 нагрівають, він розкладається на CaO та CO_2) і подальшим розкладанням (гідратацією) CaO до гідроксиду кальцію ($\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca(OH)}_2$); оксид Ca , який відрізняється тонкозернистістю, можна декантувати від нерозчинних мінералів.

Інколи трапляються і піски розсипів, які треба дезінтегрувати. Наприклад, цементовані глиною важкопромивні піски дезінтегрують у закритих циліндрах на рольгангах (нім. *роль* – коток, *ганг* – хід: пристрій, роликовий конвеєр, по роликах якого, закріплених на рамі на невеликій відстані один від одного, переміщують вантажі). Якщо вміст щебеню або гальки в пробі малий, то для поліпшення відтирання цементувального матеріалу в ці апарати доцільно додавати великокусковий матеріал. Дезінтегровані піски направляють на просіювання й отримують дрібний клас (звичайно до 2 мм) з відмитою глиною і крупний клас (+2 мм), у якому зрідка є корисні мінерали розсипів. Крупний клас найчастіше представлений кварцом. Глину з дрібного класу видаляють відмулюванням або іншими методами.

Легкопромивні піски, складені дрібно- й тонкозернистим матеріалом, дезінтегрують у чанах з мішалками з подальшим

відділенням глини. Часто достатньо ефективного протирання вихідних пісків через сито в 1 мм з додаванням промивної води та видаленням глини відмулюванням.

Гранулометричний аналіз

Будь-яку уламкову породу можна схарактеризувати як агрегат моно- або полімінеральних уламків з зернами певного складу, розміру та форми. Розмір частинок, що формують уламкову частину породи, є важливою класифікаційною й діагностичною ознакою.

Гранулометричний аналіз – це прийоми, за допомогою яких визначають кількісний вміст частинок різної крупності в породі або осаді. Об'єктом гранулометричного аналізу під час лабораторних досліджень є піщані та піщано-алевритові породи. Гранулометричний склад грубоуламкових порід вивчають безпосередньо в польових умовах.

Залежно від складу цементу і ступеня консолідації породи для вивільнення уламкових компонентів застосовують механічну дезінтеграцію, дезагрегацію із застосуванням хімічних реактивів та ультразвук.

Сучасні методи гранулометричного аналізу розділяють на три основні групи: 1) ситовий аналіз; 2) гідравлічні методи; 3) оптичні й телевізійно-оптичні методи.

Ситовий аналіз ґрунтується на просіюванні породи через набір сит, які складають у колонку так, щоб верхнє сито мало отвори найбільшого розміру; під ним поміщають сита з отворами меншого розміру. Аналіз необхідний у випадку дуже нерівномірнозернистого матеріалу, оскільки розділяти мінерали, які відрізняються за розміром зерен, важко. Крім того, ситовий аналіз дає змогу визначати відсоткове співвідношення мінералів у класах різної крупності. Розсіювання виконують на стандартних ситах зі штампованими круглими отворами або на плетених. Розмір отворів сит вимірюють у міліметрах або мешах (у США та Великій Британії). Кількість мешів дорівнює кількості отворів у лінійному дюймі (25,4 мм) і збільшується зі зменшенням розміру отворів. Зазвичай під час гранулометричного аналізу використовують сита з розміром отворів 2,0, 1,0, 0,5 і 0,25 мм.

Просіювання може бути “сухим” або “мокрим” (у потоці води), що забезпечує ліпшу дезінтеграцію дрібнодисперсної частини породи.

Під час ситового аналізу піщано-алевритового матеріалу оптимальна маса вихідної наважки повинна становити 100 г. Якщо в породі є грубоуламковий матеріал, то, залежно від його кількості, вихідну наважку потрібно відповідно збільшити.

Колонку сит з матеріалом приводять у рух спеціальними струшувачами ударно-обертальної або вібраційної дії. Досить популярними є вібростата фірми “Фріч” (Німеччина). У разі “сухого” способу рекомендована тривалість одного ситового аналізу становить 10 хв.

“Мокрий” спосіб ситового аналізу більш трудомісткий, ніж “сухий”, оскільки потребує подальшого висушування виділених фракцій. Перевага “мокрого” способу – велика роздільна здатність аналізу, який забезпечує розділення частинок від 0,04 до 0,02 мм (“сухий” спосіб забезпечує розділення частинок розміром понад 0,04 мм). Окрім того, за “мокрого” способу не потрібно попередньо вилучати з проби частинки < 0,01 мм. Під час “сухого” просіювання на грубих ситах відбувається агломерація цих частинок, і вони забивають отвори тонших сит.

Після просіювання виділені фракції зважують з точністю до 0,1 г. Отримані результати перераховують у відсотки. Вміст кожної фракції відносять до відповідного інтервалу розмірів між двома сусідніми ситами.

Звичайно в процесі ситового аналізу не вдається уникнути помилок. Головні причини помилок такі: 1) вплив форми частинок, які аналізують; 2) неправильно обрана тривалість просіювання; 3) відхилення середнього розміру комірок сита від стандартного внаслідок зношення та ін.

Якщо маса шліху після промивання перевищує 10 г, то його **скорочують**, відбираючи *середню пробу*. Середня проба – це мінімальна наважка, яка відповідає середньому складу всього шліху.

Найпростішим методом скорочення, однак не найліпшим за метрологічними параметрами, є метод ручного квартування. Добре перемішаний шліх висипають через лійку на велике скло або на

аркуш щільного гладкого паперу. Утворений у цьому разі конус за допомогою скляної пластинки або лінійки вирівнюють у плоске коло однакової товщини і ділять хрестоподібно на чотири сектори. Дві протилежні частини об'єднують, ретельно перемішують і повторюють аналогічну операцію доти, доки не одержать проби потрібної маси.

Точніше виділити середню пробу з вихідного шліху великої маси можна за допомогою спеціальних приладів – поділювачів проб. Найпростішим пристроєм є пробоподілювач Джонса. Наявні також електромеханічні пробоподілювачі, які забезпечують високоточне отримання скорочених проб (наприклад, прилади фірми “Фріч”).

Маса середньої проби шліху для мінералогічного аналізу залежить від вмісту мінералів, які визначають, і від крупності матеріалу. Чим менше в шліху цінного мінералу, тим більшу кількість шліху треба вивчати. Ступінь скорочення проби залежить також від густини потрібного мінералу та похибки аналізу. В усіх випадках наважку до 1 г для аналізу брати не рекомендують.

Гідравлічні методи ґрунтуються на виявленій Дж. Г. Стоксом залежності між діаметром сферичної частинки і швидкістю її осадження. Більшість традиційних методів визначення крупності частинок пов'язані із застосуванням седиментаційних трубок. Головна їхня перевага – це експресність і можливість автоматичної реєстрації й опрацювання результатів вимірювань. Такі методи нині розвивають за двома напрямками: 1) розробка седиментаційних ваг, які забезпечують безпосереднє зважування матеріалу, що осаджується; 2) конструювання приладів, які ґрунтуються на непрямих (найчастіше гідростатичних) способах вимірювання крупності частинок.

Седиментаційні ваги мають суттєвий недолік – порівняно низька продуктивність і недостатнє відтворення отриманих результатів. Тому більше поширені седиментометри, у яких гідравлічну крупність частинок вимірюють за зміною концентрації суспензії в седиментаційній трубці. Застосування седиментометричних методів різко збільшує продуктивність гранулометричного аналізу пухких і слабо зцементованих

піщаних порід. Автоматична реєстрація замірів значно підвищує надійність і відтворюваність отриманих результатів. Умови гідравлічного аналізу більше відповідають природним процесам формування уламкових відкладів.

Під час гранулометричного аналізу міцно зцементованих порід широко застосовують *оптичні методи*, зокрема, метод вимірювання розміру зерен у шліфах. У породах з упорядкованим розташуванням уламкових компонентів результати аналізу суттєво залежать від положення площини шліфа щодо площини градаційної шаруватості. У цьому випадку розмір уламкових зерен треба вимірювати за двома шліфами: одним, зробленим у площині градаційної шаруватості, та іншим, – у будь-якій перпендикулярній до неї площині. Під час проведення гранулометричного аналізу в шліфах достатньо зробити у кожному зрізці 200 замірів осі b і 250 замірів осі a . Якщо зерна в породі розподілені хаотично, то достатньо зробити один довільний переріз.

Останнім часом щораз частіше застосовують *телевізійно-оптичні методи*. Сучасні телевізійно-оптичні системи, безпосередньо пов'язані з ЕОМ, дають змогу перетворювати зображення частинок на фотографії в шліфі чи пухкому препараті в дискретну числову форму і застосовувати для аналізу розміру й форми уламкових компонентів математичний апарат будь-якого ступеня складності.

Список використаної та рекомендованої літератури

1. Берлинский А. И. Разделение минералов / А. И. Берлинский. – М., 1975.
2. Джонс М. П. Прикладная минералогия / М. П. Джонс. – М., 1991.
3. Ляхович В. В. Акцессорные минералы (их генезис, состав, классификация и индикаторные признаки) / В. В. Ляхович. – М., 1968.
4. Матковський О. І. Шліховий аналіз : Програма, методичні вказівки і контрольні завдання / О. І. Матковський. – Львів, 1977.
5. Методы минералогических исследований : [Справочник] / [Под ред. А. И. Гинзбурга]. – М., 1985.
6. Сливко Є. М. Мінералогічний аналіз. Текст лекцій / Є. М. Сливко. – Львів, 2004.

Тема 4. МЕТОДИ СЕПАРАЦІЇ МІНЕРАЛІВ

Для полегшення діагностики мінералів і точнішої оцінки їхнього кількісного вмісту під час шліхового аналізу виконують дробне фракціонування (сепарацію) середньої проби, розділяючи її в різних фізичних полях на низку продуктів-концентратів, які складаються з мінералів із різними фізичними властивостями. Найчастіше фракціонування виконують методами магнітної (у тім числі електромагнітної) сепарації і розділенням за густиною. Зрідка застосовують електросепарацію, флотацію, сепарацію на підставі відмінностей у морфології зерен мінералів, коефіцієнтів тертя мінералів з різними матеріалами. В окремих випадках, коли необхідно кількісно оцінити вміст окремих мінералів, використовують методи селективного розчинення проби.

Магнітні та електромагнітні методи сепарації

Магнітна сепарація ґрунтується на використанні відмінностей у магнітній сприйнятливості мінералів. Її залучають у комплекс фракціонування на першій стадії в тому випадку, коли проба збагачена феромагнітними мінералами: у шліхах найчастіше магнетитом і титаномагнетитом, у протолочних пробах – піротином. Про наявність значної кількості феромагнітних мінералів свідчить чорний колір шліху.

Магнітні властивості речовини характеризують такими показниками:

об'ємна магнітна сприйнятливості тіла χ_0 – відображає здатність тіла намагнічуватися; її визначають за співвідношенням інтенсивності намагніченого тіла I та напруженості зовнішнього поля H : $\chi_0 = I/H$;

титома магнітна сприйнятливості тіла χ – це відношення об'ємної магнітної сприйнятливості χ_0 до густини d тіла: $\chi = \chi_0/d$, м³/кг.

Усі речовини за магнітними властивостями поділяють на дві групи:

1) діамагнітні речовини, які намагнічуються негативно і зменшують напруженість магнітного поля; для них $I < 0$ та $\chi < 0$;

2) парамагнітні речовини, які намагнічуються позитивно і підсилюють напруженість магнітного поля; для них $I > 0$ і $\chi > 0$.

Багатьом мінералам властива постійна намагніченість. Однак є мінерали, магнітні властивості яких змінюються в широких межах. До них належать амфіболи, піроксени, олівін та подібні мінерали, які є ізоморфною сумішшю магнезійних і залістистих силікатів, причому один і той же мінерал може бути у фракціях різної магнітності залежно від кількості заліза, що є в його складі.

Магнітна сприйнятливість мінералів може змінюватися в широких межах і внаслідок наявності мікроскопічних включень інших, у тім числі феримагнітних мінералів. Водночас для дуже багатьох мінеральних видів її значення повністю або частково перекриваються. Наприклад, $\chi \cdot 10^9$ м³/кг:

пірит – від –0,70 до +78,0;	марказит – від +0,12 до +1,35;
кварц – від –0,40 до –0,10;	арсенопірит – від +0,12 до +110,2;
топаз – від –0,40 до +0,12;	епідот – від +14,8 до +21,2;
ортотлаз – від –0,40 до +0,10;	гематит – від +45,0 до +102,0;
каситерит – від –0,26 до +165,0;	піротин – 1 500–6 100.

Магніту сепарацію проводять за допомогою постійних магнітів та електромагнітів різної конструкції. Постійні магніти виготовляють з феромагнітних сплавів, які мають високу залишкову намагніченість. Для виділення сильномагнітних мінералів дуже зручні постійні магніти РМЧ і Сочнева.

У разі електромагнітної сепарації використовують магнітні поля різного напруження (за різної сили струму) та отримують три фракції мінералів: середньої магнітності, слабкомагнітну і немагнітну. Оскільки сильномагнітні мінерали вилучають у процесі магнітної сепарації, то в першу і другу електромагнітні фракції потрапляють парамагнітні фази.

У табл. 1 наведено класифікацію мінералів за магнітними властивостями.

Таблиця 1

Класифікація мінералів за магнітними властивостями

Сильномагнітні	Слабкомагнітні	Немагнітні	
Залізо	Амфіболи (світлі)	Азурит	Піроксени (безбарвні)

Магнетит Ті-магнетит Платина магнітна	Гранати (світлі) Ксенотим Монацит Ортит	Анараз Андалузит Антимоніт Апатит	Платина Реальгар Рутит Свинець самородний
Середньомагнітні	Піроксени (світлі)	Арсенопірит	Срібло самородне
Амфіболи (темні)	Пірохлор	Аурипігмент	Сидерит
Біотит	Титаніт	Баделеїт	Силіманіт
Вольфраміт	Турмалін (світлий)	Барит	Смітсоніт
Гематит	Шпінелі (світлі)	Берил	Сподумен
Гранати (темні)		Бісмутин	Ставроліт
Ільменіт		Везувіан	Сфалерит
Лімоніт		Галеніт	Топаз
Піроксени (темні)		Діамант	Фенакіт
Піролюзит		Золото самородне	Флюорит
Турмалін (темний)		Каситерит	Халькозин
Хроміт		Кіаніт	Халькопірит
Епідот		Кіновар	Хризоберил
		Корунд	Церусит
		Малахіт	Циркон
		Мідь самородна	Шеєліт
		Молібденіт	Шпінель
		Пірит	

Розмір зерен шліху має важливе значення під час магнітного фракціонування. Магніт з незначною напруженістю магнітного поля не притягуватиме слабкомагнітні мінерали у великих осколках, тоді як дрібні зерна притягнуться легко. Проте в разі розділення дуже дрібних шліхів завдяки силам зчеплення немагнітні мінерали можуть бути захоплені разом з магнітними, і повного розділення досягти практично неможливо.

Якщо розмір зерен не перевищує 0,2 мм, то сепарацію виконують у декілька прийомів, оскільки під час першого розділення разом з магнітними мінералами захоплюється багато немагнітних. Чистоту розділення можна підвищити, якщо сепарувати в рідині або спирті, оскільки в рідині сила зчеплення мінералів зменшується і повнота відокремлення зростає. Для цього шліх занурюють у посудину з водою і відділення мінералів магнітом проводять під водою.

Крім розміру зерен, на повноту магнітної сепарації впливають також форма зерен і форма полюсів електромагніту.

Одержані магнітну і електромагнітну фракції зважують і масу записують у таблицю.

Гравітаційні методи сепарації

Гравітаційне розділення мінералів ґрунтується на їхній різниці в густині. Крім густини, на результати сепарації впливає розмір частинок, а для деяких мінералів – і форма зерен.

Під час мінералогічних досліджень використовують головно розділення у важких рідинах і гравітаційне збагачення у водному середовищі: на концентраційних столах, гвинтових сепараторах та інших апаратах, рідше – розділення мінералів у штучно обважнених парамагнітних рідинах (магнітогідростатична сепарація).

Головним методом є розділення у важких рідинах (ВР). Суміш мінералів, які розрізняються за густиною, поміщають у рідину, густина якої має проміжне значення; у цьому разі мінерали з більшою, ніж у рідини, густиною занурюються в неї, а з меншою – спливають на поверхню.

Під час проведення мінералогічного аналізу використовують ВР двох груп: органічні рідини та розчини солей важких металів (табл. 2). Органічні рідини порівняно інертні. У цьому їхня перевага перед рідинами другої групи, які реагують з металами й сульфідами металів. Вадюю рідин цієї групи є легкість самих рідин та їхніх розчинів, унаслідок чого густина розчинів швидко змінюється (виняток – рідина Клерічі, яка розчиняється у воді).

Таблиця 2

Важкі рідини, які використовують під час мінералогічного аналізу

Рідина	Склад	Густина, г/см ³	Забарвлення	Розчинник	Примітка
Органічні рідини					
Трибромметан (бромформ)	СНВг ₃	2,89	Безбарвна	Спирт, ефір, ацетон, бензол, бензин	Токсичний, легкий
Тетрабромметан	С ₂ Н ₂ Вг ₄	2,97	Безбарвна	Ацетон, спирт, бен-	Слабкотоксичний

				зин, бензол, ефір	
Йодид метилену	CH_2I_2	3,32	Безбарвна	Спирт, бензин, ацетон	Отруйний, легко розкладається
Рідина Клерічі	$\text{CH}_2(\text{COOTl})_2$ HCOOTl	4,27	Жовта	Вода	Токсична, розкладається під дією світла
Розчини солей важких металів					
Рідина Туле	$\text{K}_2\text{HgI}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	3,19	Світло-жовта	Вода	Токсична, розкладає сульфід
Рідина Сушина–Рорбах	$\text{BaI}_2\text{HgI}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	3,58	Жовта	Гаряча вода, спирт, ефір, бензин, бензол	В'язка, реагує з сульфідами, розкладається у холодній воді
М-45	$\text{BaI}_2 + \text{CdI}_2$	3,0	Світло-жовта	Гаряча вода	Слаботоксична, добре фільтрується

На практиці найчастіше застосовують бромоформ та рідину Туле, яка дуже легко і в будь-яких пропорціях змішується з водою. Усі ці рідини токсичні, з ними працюють у витяжній шафі, працівник має бути у спецодязі. Під час роботи з бромоформом треба пам'ятати, що він сильно випаровується. Склянки і лійки з бромоформом треба закривати корками.

Мінерали у бромоформі, як і в інших ВР, розділяють так. У скляну лійку з притертим краном або в просту хімічну лійку з гумовою трубкою і затискачами наливають бромоформ. Зручно використовувати хімічну лійку діаметром 8–10 см, на кінці якої є гумова трубка діаметром 1 см. Перш ніж налити у лійку бромоформ, кінець гумової трубки закривають затискачем. У лійку з бромоформом засипають пробу і старанно перемішують тонкою склянню паличкою. Усі мінерали з густиною, вищою від густини бромоформу падають у нижню частину гумової трубки, утворюючи важку фракцію, а мінерали з густиною, нижчою від густини бромоформу, спливають у ньому, утворюючи легку

фракцію. Мінерали з густиною, яка дорівнює густині бромформу, перебуватимуть у завислому стані.

Наприкінці процесу гумову трубку затискають другим затискачем вище від положення стовпчика важкої фракції. Після цього відкривають перший затискач, який перекриває нижню частину трубки, і бромформ з важкою фракцією виливають у хімічний стаканчик або фарфорову чашку. Бромформ зі стаканчика з важкою фракцією обережно зливають у лійку, стежачи, щоб мінерали важкої фракції не потрапили в легку.

Важку фракцію очищають від бромформу, промиваючи в стаканчику спиртом-ректифікатом два–три рази, і висушують у сушильній шафі. Легку фракцію спускають на фільтр у лійку, кінець якої занурений у склянку для бромформу, після чого матеріал і лійку, яка слугувала для розділення, також промивають спиртом.

Увесь спирт із бромформом збирають в окремий посуд для подальшої регенерації. Для цього спирт змішують з водою і отримують чистий бромформ, який спочатку утворює емульсію, подібну на молоко, а через деякий час (завдяки високій густині) опускається на дно посудини у вигляді суцільного шару. Отже, більша частина бромформу, яку витрачено на змочування проби, лійки, стаканчика і фільтра, регенерується, її знову можна використовувати.

У процесі роботи з ВР постійно виникає потреба визначення їхньої густини. Відомо декілька способів визначення густини ВР: зважування певного об'єму рідини в мірній колбі; визначення густини рідини в пікнометрі; використання набору мінералів-еталонів з відомою густиною (наближене визначення) та ін. Хороші результати у практиці масових робіт дає розроблений у ВІМС (м. Москва) спосіб визначення густини рідини за допомогою ваги Мора–Вестфала з обважненим поплавком.

На виробництві для розділення мінералів за густиною іноді використовують важкі водні суспензії галеніту, бариту або феросиліцію. Густина їх досягає $3,5 \text{ г/см}^3$.

Розділення у ВР виконують або відстоюванням у спеціальних лійках, стаканах тощо, або методом центрифугування. *Методом відстоювання* виділяють важку фракцію під час

мінералогічного аналізу кластичних порід (переважно піщаної розмірності) і розсипищ; на цьому методі ґрунтується також мінералогічний аналіз шліхів. Метод відстоювання застосовують для подрібнених порід, руд і нерудних корисних копалин, переважно крупно- і середньозернистих, оскільки чим менші зерна, тим більше часу триває відстоювання. За розміру частинок до 0,01 мм час відстоювання вимірюють добами, і метод стає малопродуктивним. У такому разі перевагу надають *методу центрифугування*.

У виробничій практиці застосовують переважно центрифуги пробірного типу. Є також ультрацентрифуги (фірма “МОМ”, Угорщина) та центрифуги дзигового типу, наприклад, центрифуга Мошева для розділення малих наважок (десятки грамів) і центрифуга Кордікова для великих наважок (кілограми).

На ефективність розділення мінеральної суміші методом центрифугування впливають дві групи чинників: 1) особливості сепарованої проби – різниця в густині мінералів, розмір їхніх частинок, кількісне співвідношення важких і легких мінералів; 2) умови і режим центрифугування – тип центрифуги, властивості важкої рідини, попередня підготовка взірця, густина суспензії, кількість обертів центрифуги тощо.

Практика засвідчує, що за допомогою центрифугування вдається розділити мінерали, які мінімально розрізняються за густиною – 0,10–0,05 г/см³. Чим тонші частинки, які розділяють, і чим менший вміст важкого мінералу, тим важче він виходить у важку фракцію. Це стосується і мінералів, які різко розрізняються за густиною.

Розроблено метод розділення мінералів у штучно обважнених парамагнітних рідинах (*магнітогідростатична сепарація*, або МГС-сепарація). Як зазначено, найважча з ВР – рідина Клерічі – має густину 4,27 г/см³. Для розділення мінералів з більшою густиною – золота, кіноварі, галеніту, арсенопіриту, піриту, піриту, халькопіриту, бариту, циркону та інших – природних ВР нема. Тому актуальне штучне створення рідких середовищ з густиною понад 4,27 г/см³. Для цього штучно обважнюють так звані парамагнітні рідини (розчини солей Mn, Ni, Co, Fe, TR), які за звичайних умов мають густину від 1,4 до

4,27 г/см³. Таке обваження легко регулювати, й умовна густина рідини може набувати будь-якого потрібного значення в цьому діапазоні, що дуже зручно для розділення мінералів різної густини.

Суть МГС-сепарації полягає в тому, що, використовуючи постійні магніти високої напруженості в магнітній рідині, створюють дуже високий псевдогравітаційний градієнт. У разі потрапляння в таке градієнтне поле мінерали розшаровуються за густиною, і їх можна виділити в різні фракції. Використання сильних постійних магнітів, які створюють відповідне магнітне поле, дає змогу отримати градієнти магнітних полів дуже високої напруженості і, відповідно, штучно зробити важчими “магнітні” рідини до такого ступеня, що в них відбувається селективне розділення мінералів з будь-якою густиною, аж до густини платини й осмистого іридію (14,0–21,2 г/см³). За допомогою створеного на підставі цього ефекту приладу – магнітогравітаційного сепаратора МГС-П2 – можна розділяти навіть суміші мінералів платинової групи, що раніше було неможливо.

Розглянемо *гравітаційне збагачення у водному середовищі*. Його виконують на концентраційних столах, гвинтових сепараторах, шлюзах і відцентрових сепараторах.

Концентраційний (або струшувальний) стіл – це прилад, збагачення на якому відбувається в тонкому шарі води, яка тече по слабко похилій площині – деці. Дека має рифлення у вигляді вузьких планок. Спеціальний механізм надає деці асиметричного поздовжнього обернено-наступального руху. Під дією сили тяжіння, сили інерції, тертя і змивального потоку води між рифлями дека відбувається розшарування мінеральних частинок. Безпосередньо на поверхні дека розміщуються дрібні важкі частинки, вище – важчі, потім дрібні легкі й, нарешті, зверху – найлегші. Дека струшує, частинки рухаються, і на деці утворюється “віяло” з мінеральних частинок різної густини, які потім розвантажують в окремі приймачі.

На концентраційному столі можна розділити мінерали, які мають різницю в густині не менше 1,5–1,0 г/см³. Чим більша різниця в густині, тим чіткіше відбувається розділення мінералів.

Має значення і форма частинок: ліпше розділяються частинки ізометричної форми.

Гвинтовий (або спіральний) сепаратор – це найпростіший апарат для виділення концентрату важких мінералів. Це алюмінієвий жолоб, вигнутий спіраллю навколо вертикальної осі й закріплений знизу на круглій рамці з ніжками. Над верхнім витком спіралі закріплено завантажувальну лійку, у яку подають збагачений матеріал, що його вимиває з чашки струмінь води зі шланга. На нижньому витку є отвір для розвантажування концентрату важких мінералів. Діаметр витків – 100 мм. Маса сепаратора – 300 г, продуктивність – 10 кг/год.

Частинки, які рухаються по жолобу сепаратора під впливом сили тяжіння, тертя, відцентрових і гідродинамічних сил, розділяються за густиною. Легкі частинки відкидаються до периферії жолоба і, пройшовши всю спіраль, розвантажуються в її нижній частині, а важкі рухаються по внутрішній частині жолоба і розвантажуються через отвір для концентрату.

Такий сепаратор доцільно застосовувати для попереднього збагачення проб значної маси. За його допомогою вилучають важкі мінерали з руд, гірських порід і пухких відкладів з низьким їхнім вмістом.

Простим апаратом для гравітаційного збагачення є нерухомий шлюз. Це жолоб прямокутного перерізу, дно якого має шорсткий покрив (у вигляді дерев'яних рифлень, гумових матів та ін.). Шлюз встановлюють під невеликим кутом і пропускають пульпу. Важкі частинки осідають і накопичуються на дні шлюзу, а легкі зносить водний потік. Періодично, у міру накопичення концентрату важких мінералів у комірках рифлень, живлення шлюзу припиняють і змивають концентрат. Максимальна крупність вихідного матеріалу – 2 мм; продуктивність шлюзу – до 50 г/хв. Можна обробляти проби масою від 0,3 до 300 г і отримувати високе вилучення важких мінералів у дуже багаті концентрати, а іноді й мономінеральні фракції.

Гравітаційне збагачення невеликих проб (300–500 г) для практично повного вилучення з них дуже важких мінералів (наприклад, золота) рекомендують проводити у відцентрових сепараторах – чашових апаратах (ДЦС) або короткоконусних

гідроциклонах. У разі обробки на сепараторі ДЦС золотовмісних проб вилучення золота в концентрат досягає 98–99 %. Проте мономінеральний концентрат отримати не вдається, для цього потрібне перочищення концентрату на інших апаратах, наприклад, на струшувальному шлюзі.

Отже, унаслідок гравітаційної обробки проби отримують важку та легку фракції. У легку потрапляють графіт, кварц, берил, польові шпати, скаполіт, мусковіт, кальцит, обсидіан, у важку – самородні метали, діамант, сульфід, корунд, рутил, анатаз, лейкоксен, каситерит, шпінель, пірохлор, циркон, циртоліт, топаз, кіаніт, андалузит, силіманіт, апатит, колофан, барит, целестин, англезит, ангідрит, шесліт, магнезит, сидерит, доломіт, церусит, флюорит та ін.

Крім магнітної та гравітаційної сепарації, застосовують ще **розділення мінералів за електропровідністю**. Розділення виконують в електричному полі високої напруги. Частинки мінералів в електричному полі дотикаються до зарядженого електрода (наприклад, у вигляді обертального барабана). У цьому разі мінерали-провідники отримують від цього електрода однойменний з ним заряд і відштовхуються від нього, а непровідники (діелектрики) – малий заряд і практично не відштовхуються. Під час обертання електрода мінерали з різною електропровідністю рухаються по різних напрямках.

За поведінкою в електричному полі мінерали поділяють на такі групи:

1) добрі провідники – сульфід, сульфосоли, самородні метали (арсенопірит, галеніт, гематит, графіт, золото, ільменіт, ковелін, магнетит, молібденіт, пірит, піротин, платина, рутил, срібло, халькозин, халькопірит тощо);

2) середні й слабкі провідники – оксиди й гідроксиди, деякі силікати (антимоніт, озалізнений біотит, вольфраміт, каолініт, каситерит, кіновар, корунд, лімоніт, сидерит, сфалерит, фаяліт, хроміт та ін.);

3) непровідники – силікати, карбонати, фосфати (діамант, польові шпати, апатит, біотит, гіпс, сірка, циркон, амфіболи, олівін, галіт, кальцит тощо).

Мінерали перших двох груп у сучасних електричних сепараторах легко відділяються від мінералів третьої групи. Мінерали першої та другої груп розділяють менш успішно.

Під час електричної сепарації важливе значення має стан поверхні мінералу. Нальоти і плівки оксидів, солей, пилу змінюють електропровідність мінералів. Поверхнева волога погіршує процес сепарації. Тому перед сепарацією суміш мінералів добре просушують, відділяють від пилу і класифікують за крупністю.

Електросепарацію проводять за допомогою спеціальних приладів – сепараторів ЭС-1, ЭС-2, МЭП-1.

В окремих особливо складних випадках за наявності в шліхах великої кількості різноманітних мінералів, які близькі за густиною, магнітними й електричними властивостями, під час фракціонування проб застосовують методи сепарації, запозичені з технології переробки мінеральної сировини, зокрема, **флотаційний метод**. Цей метод ґрунтується на змочуванні поверхні зерен мінералів водою. У воді, що містить пухирці повітря, погано змочувані мінерали (гідрофобні) прилипають до пухирців і спливають (флотують) з ними на поверхню, утворюючи піну, а добре змочувані мінерали (гідрофільні) тонуть.

У природному стані мінерали розрізняють за змочуванням водою. Гідрофільною є більшість породоутворювальних мінералів (кварц, польові шпати, піроксени, амфіболи, карбонати), гідрофобними є сульфіди металів, самородні метали, графіт, тальк, сірка. Багато мінералів є проміжними.

Флотаційним методом розділяють лише тонкозернисті шліхи крупністю від 0,01 до 0,2–0,3 мм. Змочування поверхні мінералів можна виміряти за допомогою спеціальних флотаційних реагентів. Для флотації сульфідів використовують переважно ксантогенати калію й натрію (разом з піноутворювачем – сосною олією). Для флотації несульфідних мінералів застосовують жирнокислотні реагенти. Для підвищення селективності флотації, крім збирачів, використовують різноманітні реагенти-активатори, депресанти та регулятори рН середовища.

Реагентний режим – головний чинник, що визначає результати флотації. Для ефективної дії реагентів важливі їхня витрата, порядок уведення в пульпу, час контактування.

Пінну флотацію проводять у флотаційних машинах ФМ-1, ФМ-2. Для флотації наважок до 2 г за умови сприятливого мінерального складу суміші можна використовувати флотацію в чашці з киплячою водою.

Флотаційні властивості мінералів часто залежать від умов їхнього утворення, мінерального складу шліхів та інших причин. Тому флотацію зазвичай не рекомендують як масовий метод розділення мінералів розсипищ.

Деякі мінерали можна розділяти за формою зерен та різницею в коефіцієнті тертя й заряджанні під час тертя. Розділення виконують на похилій площині, що гойдається, сухим способом. Зазвичай цей процес використовують у разі виділення волокнистих і пластинчастих мінералів – азбесту, слюд тощо.

На сепараторі тертя (СТ) обробляють матеріал крупністю від 0,5 до 0,04 мм, попередньо вузько класифікований. Цей метод рекомендують у разі розділення пар мінералів, для яких неефективна сепарація за густиною, магнітною сприйнятливістю й іншими властивостями, а також для кількісної оцінки форми частинок під час дослідження мінералів розсипищ. На СТ можна розділити пірит і арсенопірит, барит і циркон, епідот і турмалін, деякі інші суміші мінералів.

Застосування комплексу методів сепарації для вирішення різноманітних завдань

Сепарація мінералів є найважливішою операцією під час мінералогічних досліджень. Її застосовують для концентрування мінералів, проведення кількісного мінералогічного аналізу, виділення мономінеральних фракцій і складання балансу розподілу елементів по мінералах.

Концентрування мінералів. Рудні та більша частина акцесорних мінералів мають підвищену густину, тому для їхнього концентрування найчастіше застосовують гравітаційні методи.

Залежно від маси проби і крупності матеріалу використовують збагачення на концентраційному столі, гвинтовому сепараторі або розділення у важких рідинах. Перевагою концентраційного стола, крім високої продуктивності, є можливість візуального спостереження за процесом і його регулювання. Крім того, відтинаючи в окремі приймачі вузькі частини “віяла”, можна одночасно збирати декілька фракцій, у кожній з яких сконцентровані мінерали певної густини. Отримані гравітаційні концентрати в разі потреби можна розділити на фракції за магнітними або електричними властивостями.

Кількісний мінералогічний аналіз. Серед методів кількісного мінералогічного аналізу руд і порід важливу роль відіграють фракційно-вагові. Пробу (після вузької класифікації за крупністю) ділять за допомогою методів сепарації на фракції. Головна вимога до методів сепарації на першому етапі – достатньо високе і стійке вилучення у концентрат мінералів, вміст яких потрібно визначити. Найчастіше для концентрування мінералів застосовують гравітаційне збагачення на столах. Отриманий концентрат розділяють на фракції іноді одним, а частіше комплексом методів відповідно до фізичних властивостей мінералів. Використовують магнітну, електромагнітну сепарацію і розділення у важких рідинах.

Виділення мономінеральних фракцій. Отримати мономінеральну фракцію досить важко навіть за можливості використання комплексу різних методів сепарації, особливо складно – у разі потреби роздільного вилучення декількох або всіх мінералів проби. Успіх сепарації значно залежить від мінерального складу проби, варіацій властивостей складових мінералів, їхньої крупності й характеру зростків і зрощень.

У кожному окремому випадку важливе значення має правильний вибір схеми сепарації. Первинне збагачення часто виконують на гравітаційних апаратах; це дає змогу відразу відділити у “хвості” головну масу нерудних мінералів і сконцентрувати рудні. Гравітаційне збагачення проби масою від 0,5 до 10–20 кг доцільно проводити на лабораторному концентраційному столі 30Б-КЦ. Цю операцію, проте менш чітко,

можна виконати також на гвинтовому сепараторі або нерухомому шлюзі.

Іноді гравітаційне збагачення на початку обробки проби доцільно замінити іншим процесом. Якщо в пробі є значна кількість сильномагнітних мінералів, то збагачення треба починати з магнітної сепарації ручними магнітами.

Якщо в пробі понад 20–30 % парамагнітних мінералів, які мають значну магнітну сприйнятливості (рогова обманка, біотит, піроксени, гранати), обробку проб потрібно починати з електромагнітної сепарації.

У разі виділення з проб досить тонких мінералів (клас –0,043 мм) можна застосовувати селективну флотацію, наприклад, для тонковкраплених сульфідних поліметалевих руд, а також для слюд, серициту, хлориту тощо. Доведення первинного концентрату, а також подальше виділення тих чи інших мінералів з продуктів первинного збагачення проводять різними методами. Вибір методів, приладів і послідовність їхнього застосування визначені мінеральним складом продуктів та їхньою масою.

Гравітаційне доведення наважок масою від 5–10 до 500 г можна виконувати на струшувальному шлюзі (СШ). Золотовмісні продукти доцільно попередньо збагачувати у довідному відцентровому сепараторі, а потім – на шлюзі. Подальше розділення мінералів за густиною можна виконувати у важких рідинах, а розділення за магнітними властивостями – на універсальному електромагніті УЕМ-1 (якщо різниця у магнітній сприйнятливості мінералів значна) або на ізодинамічному сепараторі СИМ-1.

Унаслідок обробки проб за правильно обраною схемою сепарації та в оптимальних режимах зазвичай можна отримати фракції, які містять 98–99 % відповідного мінералу, що вважають задовільним. Якщо з фракції треба повністю видалити інші мінерали, то це доводиться робити вручну, що необхідно враховувати в разі вибору крупності подрібнення проби.

Список використаної та рекомендованої літератури

1. Берлинский А. И. Разделение минералов / А. И. Берлинский. – М., 1975.
2. Захарова Е. М. Шлиховые поиски и анализ шлихов / Е. М. Захарова. – М., 1974.
3. Копченова Е. В. Минералогический анализ шлихов и рудных концентратов / Е. В. Копченова. – М., 1979.
4. Матковський О. І. Шліховий аналіз. Програма, методичні вказівки і контрольні завдання / О. І. Матковський. – Львів, 1977.
5. Методы минералогических исследований : [Справочник] / [под ред. А. И. Гинзбурга]. – М., 1985.
6. Озеров И. М. Шлиховая съемка и анализ шлихов / И. М. Озеров. – М., 1959.
7. Сливко Є. М. Мінералогічний аналіз : Текст лекцій / Є. М. Сливко. – Львів, 2004.

Тема 5. МЕТОДИКА ДІАГНОСТИКИ МІНЕРАЛІВ ШЛІХУ

Отримані внаслідок сепарації фракції шліхів використовують для мінералогічного аналізу, щоб визначити їхній склад і кількісно оцінити на корисні компоненти.

Головний метод *попередньої діагностики* мінералів у шліхах – вивчення їх під бінокулярним мікроскопом. За низкою зовнішніх ознак досвідчений мінералог легко діагностує найпоширеніші шліхоутворювальні мінерали – гранати, амфіболи, магнетит, ільменіт та ін. Для визначення рідкісних та важко діагностованих мінералів застосовують спеціальні методи й методики, які дають змогу надійно відрізнити подібні між собою мінерали. До таких методів належать оптичні, мікрохімічні, люмінесцентні та ін.

Зазвичай для вивчення мінералів шліхів використовують бінокулярні стереоскопічні мікроскопи марки МБС-9 або МБС-10. Вони забезпечують пряме й об'ємне стереоскопічне зображення предмета в прямому і відбитому світлі зі збільшенням від 3,5 до 119 разів. Найінформативніші для дослідження фракції 0,50, 0,25 і 0,10 мм.

Для спостереження шліх розсипають на склі розміром 9 × 12 см у вигляді довгої вузької смужки (у разі великої кількості матеріалу таких смужок декілька). Скло зі шліхом розміщують на столику мікроскопа. Смужку шліху уважно розглядають, пересу-

ваючи під об'єктивом скло і перебираючи зерна мінералів тонкою голкою або гостро заточеним олівцем. Голка повинна бути немагнітною (щоб до неї не прилипали магнітні зерна). Мінерали, які важко або неможливо діагностувати під мікроскопом, відділяють голкою для детального вивчення.

Перш ніж розпочати дослідження шліху, важливо знати, якщо можливо, його походження – це алювіальна асоціація чи пегматитова, гранітна чи зона окиснення тощо. Це допоможе під час діагностування мінералів, які важко визначити.

Мінерали в шліхах діагностують під бінокулярним мікроскопом за зовнішнім виглядом, фізичними та хімічними властивостями.

Спочатку визначають магнітні властивості мінералів (чи липне мінерал до сталеві голки).

Форма зерен

Мінеральні зерна в природних шліхах різко відрізняються за формою від зерен у штучних шліхах (протолочних пробах). У природних шліхах мінерали містяться, головню, у вигляді мономінеральних зерен і зрідка у зростках, причому частково або повністю зберігається властиве їм кристалографічне огранювання, яке може порушуватися внаслідок обкатування. За характером поверхонь граней розрізняють кристали гладкі, ямчасті, штриховані, ступінчасті та матові. За обрисом розрізняють призматичні, стовпчасті, таблитчасті, пластинчасті та ізометричні зерна.

Якщо мінерали в шліхах мають пошкоджені грані, то форма зерен залежатиме від спайності, або ж мінерали мають неправильний обрис, зумовлений характером зламу.

Під час перегляду шліху важливо брати до уваги ступінь обкатування зерен. Розрізняють слабо, середньо- і сильно обкатані. У слабо обкатаних зернах трішки згладжені нерівності злому або частково згладжені ребра й вершини кристалів. У середньообкатаних зернах виступи нерівностей злому зникають, залишаються невеликі заглибини, на кристалах повністю щезають ребра й вершини, проте форма граней ще не порушена. На сильно обкатаних зернах поверхня зовсім гладка: нема виступів і заглибин, повністю

зникають грані, мінерали призматичного обрису набувають еліпсоподібної, видовженої форми, а ізометричні – округлої.

У протолочних пробах кристалографічне огранювання порушене більше: тут домінують неправильні зерна, різні за характером зламу, або пластинчасті уламки за спайністю. Кількість таких уламків залежить від спайності мінералу. Для дослідження спайності мінерали роздавлюють і визначають характер отриманих уламків. Для цього відбирають одне–два зерна мінералу, розмішують їх окремо від інших, накривають товстим предметним склом і, спостерігаючи в бінокляр, роздавлюють. У випадку досконалої спайності мінерал розколюється винятково за площинами спайності, а неправильні зерна, порівняно з пластинчастими, фіксують у незначній кількості. Наявність спайності у мінералі визначають під бінокляром за пластинчастою формою уламків і ступінчастим зламом на табличчастих пластинках.

Характер поверхні зерен та вторинні утворення. Залежно від хімічної стійкості мінералу, а також від дальності його транспортування поверхневими потоками на зернах залишаються різні сліди розчинення, дряпання, стирання або сколювання. Унаслідок цього поверхня зерен набуває форм, які описано вище. У цьому разі хімічно нестійкі мінерали вкриваються плівками вторинних утворень, які покривають зерно повністю або зберігаються лише в заглибинах його поверхні. Нерідко продукти окиснення мінералів мають своєрідне забарвлення, відмінне від забарвлення мінералу.

На підставі форми зерен, ступеня їхньої обкатаності й характеру поверхні роблять висновки про дальність транспортування матеріалу поверхневими потоками від материнських порід.

Прозорість мінералу під бінокляром визначають у непошкоджених зернах за просвічуванням або характером порошку. Легка фракція складається з прозорих безбарвних мінералів (виняток – графіт). У важкій неелектромагнітній фракції непрозорі мінерали представлені сульфідами або самородними металами. Електромагнітна фракція містить як прозорі, так і непрозорі мінерали. Магнітна фракція представлена винятково непрозорими рудними мінералами.

За **блиском** розрізняють мінерали з металевим, напівметалевим, алмазним, масним, смоляним і скляним блиском. Мінерали

магнітної фракції мають металевий блиск. Електромагнітну і важку неелектромагнітну фракції складають мінерали з металевим, скляним і алмазним блиском. Мінерали легкої фракції мають переважно скляний блиск.

Забарвлення. Колір мінералу в шліхах може бути мінливим (завдяки примазкам та з інших причин). Найсвітліше забарвлення мають мінерали легкої та важкої неелектромагнітної фракцій. У легкій фракції забарвленими бувають хлорити, серпентини, нонтроніт, берил. У важкій неелектромагнітній фракції найтемнішими є рутил, каситерит, сульфіді і самородні метали.

Магнітна і сильноелектромагнітна фракції представлені непрозорими темнозабарвленими залізовмісними мінералами. Середньо- і слабкоелектромагнітні фракції за забарвленням світліші, ніж магнітна і сильноелектромагнітна, у них наявні прозорі темнозабарвлені (амфіболи, піроксени, гранати та ін.) та світлі (епідот, коїзит, діопсид, олівін тощо) мінерали.

Твердість – важлива діагностична ознака мінералу. Для мінеральних зерен розміром 0,5 мм і більше твердість визначають дряпанням зерном по скляній пластинці. Якщо мінерал твердіший від скла, то плоским боком пінцета притискають це зерно і так отримують рису. Чим твердіший мінерал, тим тонша і глибша риса.

Твердість мінералів під бінокелем визначають також роздавлюванням зерен на предметному склі скляною паличкою. Твердість з'ясовують за силою натискання, звуком розтріскування і характером руйнування скла. За цими ознаками мінерали поділяють на м'які, середні й тверді. М'які мінерали беззвучно розсіпаються в разі легкого натискання без слідів руйнування скла (твердість < 3). Середні за твердістю мінерали роздавлюються в разі значного зусилля натиску з глухим звуком розтріскування, проте без слідів пошкодження скла (твердість 3–5). Тверді мінерали роздавлюються в разі дуже сильного натискання з різким звуком розтріскування і залишають сліди пошкодження на склі (твердість > 6).

Дослідження мінералів шліхів під бінокельним мікроскопом дає змогу вирішувати питання про тривалість транспортування мінералу, тобто визначати віддаленість корінного родовища від місця відбирання проби. Слабкообкатані, кутасті,

голчасті зерна, які частково або повністю зберегли кристалографічне огранювання і мають на поверхні примазки інших мінералів, а також велика кількість зростків кількох мінералів – усе це слугує чітким індикатором близькості корінного джерела до розсипища.

З віддаленням від джерела кількість зростків зменшується. Зерна стають обкатаними, вивільняються від примазок. Водночас на поверхні деяких хімічно слабко стійких мінералів з'являються плівки новоутворень. Тривале транспортування призводить до появи подряпин, зламів та інших дефектів на поверхні навіть абразійно стійких мінералів. Зазначимо, що дрібні зерна достатньо важких мінералів під час транспортування деформуються слабо. Так само поводяться і зерна сплющеної форми. Тому відсутність ознак інтенсивного обкатування в них ще не свідчить про близькість до корінного джерела.

Морфометричний аналіз

Важливе значення в мінералогічному аналізі шліхів має морфометричний аналіз – кількісна оцінка форми уламкових частинок. Форма і обкатаність мінеральних зерен відіграють важливу роль у визначенні тривалості транспортування мінералів у водному потоці.

Найпоширенішим методом морфометричного аналізу, незважаючи на його недоліки, є метод візуальної оцінки уламкових частинок, що ґрунтується на порівнянні з набором стандартів. Є багато шкал окомірної оцінки форми уламкових зерен. Найпоширеніша п'ятибальна шкала Рассела і Тейлора, за якою:

- зовсім необкатані гострокутні зерна позначають балом 0;
- ті, що зберегли первинну форму і мають лише злегка згладжені ребра, – 1;
- частинки зі згладженими кутами, проте ще помітними прямолінійними гранями – 2;
- добре обкатані, ті, що зберегли сліди первинного огранування, – 3;
- ідеально обкатані – 4.

Свого часу Л. Рухін (1949) висловив ідею кількісної оцінки форми піщаних зерен за їхньою здатністю до перекочування на ввігнутій похилій поверхні, що швидко вібрує. Згодом цю ідею втілили в методику, яку розробили Д. Кошик і Г. Ромм (1972–1974) у літологічній лабораторії ВСЕГЕІ (м. Санкт-Петербург). Методика забезпечує розділення уламкових частинок за формою на 14 фракцій. Вихідна наважка – 5 г. Тривалість одного аналізу, включно зі зважуванням виділених морфометричних фракцій, не перевищує 15 хв.

У морфометрії багато дослідників вважає розмір 0,15–0,30 мм найоптимальнішим для дослідження, оскільки зерна цього розміру зазвичай наявні у пробі в достатній для аналізу кількості.

Аналітичні дані морфометричного аналізу треба додатково опрацьовувати графічно або статистично, що можна виконувати за допомогою сучасних комп'ютерних програм.

Практичне значення кристаломорфологічних досліджень

На практичному значенні кристаломорфологічних досліджень мінералів дослідники наголошували давно. У 1978 р. з'явився термін “розшукова кристаломорфологія”, а Н. Євзікова вперше розробила принципи використання кристаломорфології з розшуково-оцінною метою. Нині можна навести принаймні вісім видів практичних завдань мінералогії і суміжних з нею дисциплін, у яких вивчення форми кристалів є якщо не єдиним, то, мабуть, найраціональнішим способом їхнього вирішення.

Визначення формаційної належності родовища. З'ясовано, що відмінність у складі руд, типі білярудних змін, зв'язку зруденіння з материнськими інтрузіями позначається не тільки на хімічному складі мінералу, а й на формі його кристалів. Наприклад, для каситериту зафіксовано таку морфологічну схему. Для кристалів з родовищ пегматитової формації характерний дипірамідальний габітус з видовженням $c:a$ не більше 1. У разі переходу до родовищ кварц-каситеритової формації зростає роль призми $\{110\}$, тому видовження кристалів збільшується до 1–2. Надалі під час переходу до родовищ кварц-силікатно-каситеритової і кварц-сульфідно-каситеритової формацій видовження кристалів прогресивно зростає до 3–4 і більше, а огранювання ускладнюється.

Кристаломорфологічні критерії належності мінералу до родовищ певного типу розроблені також для діаманту, циркону, ільменіту, золота і багатьох інших акцесорних мінералів.

Визначення місця утворення мінералу в зоні мінералізації.

Наявні відмінності в деталях огранювання кристалів одного й того ж мінералу залежно від того, де і як він виріс: метасоматично у змінених вмисних породах або вільно у завітках жили, із магми в центрі інтрузії або з флюїдів у її апікальній частині. Наприклад, пірит у білярудних метасоматитах майже завжди має кубічний габітус, тоді як у жильних утвореннях він може бути пентагон-додекаедричний і октаедричний. Ділянки жильного виповнення також різняться за формою кристалів: кубічні кристали флюориту гіпсометрично розташовані вище, ніж октаедричні, ромбоедричні кристали кіноварі – вище, ніж пінакоїдальні.

Визначення епіцентру рудного поля. З'ясовано, що переважна на родовищах форма кристала змінюється з наближенням до епіцентру рудного поля – до гранітного купола або зони глибинного розлому. Наприклад, кристали каситериту змінюють один одного в плані і за розрізом від ендоконтакту олов'яної інтрузії, де розвинені пегматити і грейзени, до екзоконтакту, де грейзени змінюються гідротермальними кварцовими жилами.

Визначення орієнтування кристалів щодо векторів живлення. Анізотропія середовища живлення призводить до посиленого росту мінералу в одному напрямі, протилежному до напрямку підтікання речовини. Це зумовлене геолого-структурними чинниками, однак за формою кристалів у багатьох точках спостереження можна виявити напрям постачання мінералоутворювальних розчинів. Тобто за формою кристалів (за умови достатньої для побудови умовної карти кількості точок спостереження) можна побудувати об'ємну модель анізотропного живильного середовища, яким є блоки земної кори. Як приклад можна навести методику оцінювання кутів падіння кристаленосних жил за ступенем спотворення ідеальної симетрії кристалів кварцу, які є у відвалах. У методиці використано принцип Кюрі, розвинутий І. Шафрановським: чим ближче потрійна вісь симетрії кварцу до вертикалі, тобто напрямку сили тяжіння (і, відповідно, жила залягає пологіше), тим менше спотворення істинної симетрії кристалів, і навпаки.

Визначення якості кристалічної сировини. З'ясовано, що перешкодами у використанні кристалів у різних галузях промисловості є механічні включення, структурні домішки, двійникування тощо. Усі ці дефекти розподілені в кристалах цілком закономірно – відповідно до їхньої істинної симетрії та морфологічної історії росту. Знання сучасного і минулого огранювання кристалічних індивідів діаманту, флюориту, ісландського шпату або кварцу дає підстави оцінювати якість сировини, яку можна з них отримати, а також розробити найраціональнішу схему розділення їх на моноблоки.

Визначення структурно зумовленого напрямку швидкого росту кристалів. Природні кристали з зонально-секторіальною будовою дають дослідникам змогу порівнювати швидкість росту за нормаллями до різних граней. У цьому разі можна визначити, у якому напрямі кристали завжди ростуть швидко, а в якому – завжди повільно. Цю обставину широко використовують у технологічних схемах вирощування штучних мінералів.

Визначення придатності мінералу до промислового вилучення з концентратів. Під час збагачення корисних копалин відсоток вилучення цінного мінералу може значно залежати від габітуса кристалів. Наприклад, процес флотації ґрунтується на різному змочуванні зерен корисного компонента і породи. Однак змочувальність граней простих форм заданого мінералу може сильно відрізнятися, що позначиться на результатах збагачення. Зокрема, попередні кристаломорфологічні дослідження під час вилучення діамантів з промислового продукту із застосуванням жирових установок дають змогу набагато зменшити втрати цього цінного мінералу.

Визначення відносного часу утворення мінералу. Вивчення послідовності утворення, розростання і зникнення різних граней на кристалі в рамках учення про онтогенію мінералів дає уявлення про морфологічну еволюцію кристалів у процесі росту. Оскільки форма кристалів мінералу на початку його утворення відрізняється від кінцевої, то її використовують як кристаломорфологічний критерій відносного часу утворення мінералу в разі виділення зародків, стадій і етапів мінералоутворення та їхньої синхронізації в різних мінералах.

Аналіз кристаломорфологічної еволюції мінералів як одного із найбільш очевидних нині аспектів загальної конституційної еволюції мінералів слугує важливою розшуково-оцінною ознакою мінералу, яку беруть за основу під час кристаломорфологічного картування родовищ. Зокрема, багаторічні дослідження дали змогу визначити зв'язок між кристаломорфологічним типом акцесорного циркону і хімічним типом магматичних порід, між видовженням і характером двійникування каситериту та формаційною належністю його родовищ, між габітусною значимістю певних граней та якістю п'єзо- й оптичної сировини конкретного родовища. Виявлено кристаломорфологічну зональність рудних тіл і родовищ. Кристаломорфологічні дослідження можуть допомогти у складанні карт формаційної зональності рудних районів.

Наведемо яскравий приклад застосування кристаломорфологічного аналізу для визначення ерозійного зрізу рудного тіла за зміною з глибиною морфології кристалів та характеру їхньої зональності.

На прикладі каситериту родовищ Комсомольського рудного району Н. Євзікова переконливо довела можливість оцінювання поведінки зруденіння з глибиною. З'ясовано, що під час переходу від апікальних частин тіл до корневих ділянок габітусні форми кристалів каситериту змінюються, що позначається і на характері зональності його зерен. Аналіз великого фактичного матеріалу дав ученій змогу виявити п'ять характерних морфологічних типів кристалів, які відрізняються за співвідношенням найрозвинутіших габітусних форм:

тип I – дипірамідальні кристали з розвиненими формами $\{111\}$ і $\{552\}$;

тип II – пінакоїдально-дипірамідальні індивіди з гранями $\{001\}$ і $\{552\}$ за підпорядкованого розвитку $\{111\}$ і $\{110\}$;

тип III – призматично-пінакоїдальні кристали, які відрізняються розвитком граней $\{110\}$ і $\{001\}$, підпорядковане значення мають грані $\{111\}$ і $\{100\}$;

тип IV – дипірамідально-призматичні індивіди зі специфічним поєднанням граней $\{110\}$ і $\{111\}$ за підпорядкованого розвитку $\{100\}$ і $\{101\}$;

тип V – призматично-дипірамідальні кристали з розвинутими формами піраміди {321} і призматичних граней.

Наведені габітусні форми каситериту закономірно змінюють одна одну в часі. Їх фіксують як сумісно в межах одного індивіда, який поступово під час росту набуває різного габітусу (що позначається на зональності його будови), так і окремо в індивідах, які є на різних глибинних рівнях рудного тіла. В апікальних ділянках родовища домінують кристали типу V, на глибших горизонтах переважає тип IV, ще глибше його змінює тип III, а в корневих частинах найбільше розвинутий тип I. Таку зміну габітусних форм кристалів з глибиною Н. Євзікова пояснює на підставі закону Браве й обґрунтовує її різною щільністю граней: найбільша щільність характерна для граней {110} і {101}, які розвинуті на серединній, найпродуктивнішій ділянці рудних тіл.

На підставі кристаломорфологічного аналізу кристалів каситериту і визначення співвідношення виділених габітусних типів кристалів у різних пробах Н. Євзікова дійшла висновку, що за допомогою наведеного методу можна вирішувати такі завдання:

- визначати, на якій стадії ерозійного зрізу є досліджуване тіло і, відповідно, наскільки воно перспективне;
- на підставі виявленої залежності частоти поширення різних габітусних форм від глибини можна приблизно з'ясувати розмах зруденіння;
- виділяти найпродуктивніші ділянки родовища;
- досліджуючи поширення різних габітусних форм кристалів каситериту за простяганням рудних тіл і оконтурюючи виявлені ділянки ізолініями, можна визначати, які блоки рудних тіл підняті, а які опущені, і, відповідно, в якому напрямі треба проходити розшукові гірничі виробки;
- за кристалами каситериту зі шліхів можна з'ясувати ступінь ерозії тих рудних тіл, з яких відбувалося знесення матеріалу, а також їхні перспективи.

Після перегляду шліху з діагностикою мінералів за характерними макроскопічними ознаками деяка частина зерен залишається неідентифікованою. Такі зерна діагностують іншими методами. Передусім доцільно перевірити, люмінесціюють вони

чи ні. Колір *люмінесценції* для багатьох мінералів є важливою типоморфною ознакою, яка свідчить про формаційну належність досліджуваного мінералу. Найдоступніша для дослідження *фотолюмінесценція*.

Фотолюмінесценцію в мінералах збуджують короткохвильовим УФ-випромінюванням за допомогою освітлювачів ОИ-18, ОИ-18А і люміноскопів ЛСП-101, ЛСП-103, а також лазерів типу ЛГИ-21. Для отримання найбільшого ефекту люмінесценції використовують світлофільтри УФС-1, УФС-2, УФС-3. Низка мінералів виявляє фотолюмінесценцію тільки після охолодження в рідкому азоті ($T = 77 \text{ K}$). Подібну фотолюмінесценцію називають *криолюмінесценцією*. Діагностику неідентифікованих мінералів шліхів виконують також за допомогою *катодолюмінесценції*, *рентгенолюмінесценції* і *термолюмінесценції*.

Люмінесцентні методи дають змогу не тільки діагностувати мінерали, а й наближено кількісно оцінювати їхній вміст у шліхах. Оцінку вмісту мінералу, що люмінесціює, виконують візуально, підраховуючи кількість зерен, що світяться; якщо вміст таких зерен великий, то його виражають у відсотках.

Досить поширеним методом діагностики мінералів шліхів є визначення їхньої *густини*. Густина мінералів – сталий показник, тому її з успіхом використовують для точної діагностики. Є декілька способів визначення густини, однак найчастіше застосовують такі:

- 1) занурення мінералу у важку рідину;
- 2) визначення густини за допомогою бюретки;
- 3) визначення густини за допомогою пікнометра.

Для визначення густини мінералу в разі його занурення у важку рідину необхідно мати декілька важких рідин: бромформ (густина – $2,8 \text{ г/см}^3$), рідина Туле (3,2), йодистий метилен (3,33), рідина Сушина–Рорбаха (3,45), рідина Клерічі ($4,27 \text{ г/см}^3$).

За достатньої кількості рідини Клерічі (Туле) можна приготувати набір розчинів з густиною, яка відрізнятиметься на 0,01, розчиняючи її водою. Кількість води обчислюють за формулою

$$V_2 = V_1 \cdot \frac{d_1 - D}{D - d_2},$$

де V_1 і d_1 – об'єм і густина концентрованої рідини; V_2 і d_2 – об'єм і густина води; D – густина приготованого розчину.

Для визначення густини мінералу достатньо мати лише 0,5–1,0 мл рідини. Зерно мінералу занурюють у рідину. Якщо воно спливає або потопає, його за допомогою препарувальної голки або пінцета витягують, промивають, сушать на фільтрувальному папері й занурюють в іншу рідину. Рідину підбирають доти, доки мінерал не буде в ній у завислому стані – густина мінералу і густина рідини будуть однакові.

Метод визначення густини за допомогою бюретки ґрунтується на визначенні об'єму води, що її витісняє мінерал під час занурення в бюретку або мірний циліндр. Для аналізу потрібно 5–10 мг мінералу в разі роботи з бюреткою об'ємом 10–12 мл або 20–50 мг у разі роботи з бюреткою об'ємом 25–50 мл. Мінерал відбирають з крупної фракції.

У бюретку або мірний циліндр наливають 5–7 мл попередньо прокип'яченої й охолодженої води і зауважують початковий об'єм a . Зважують 5–10 мг мінералу, відібраного зі шліху, і висипають його в бюретку. Коли весь мінерал опуститься на дно, фіксують новий показ бюретки b . Об'єм мінералу дорівнюватиме $a - b$. Густина мінералу визначають за такою формулою:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{a - b},$$

де ρ – густина мінералу; m – маса мінералу; $V = a - b$ – об'єм мінералу.

Пікнометричний метод визначення густини мінералу передбачає застосування пікнометра – маленької скляної колбочки з притертим корком, який має капілярний отвір. Пікнометр зважують на аналітичних вагах з точністю до 0,0001 г. Згодом його наповнюють попередньо прокип'яченою та охолодженою водою, стежачи, щоб не залишалося пухирців повітря. Потім швидким рухом закривають пікнометр корком і ретельно протирають фільтром. Джгутиком, скрученим з фільтра, забирають з капіляра

воду до позначки на шийці пікнометра і знову його зважують. Після цього воду виливають, пікнометр висушують, поміщають у нього відібраний мінерал і зважують.

Потім у пікнометр з мінералом обережно заливають воду до позначки (на стінках пікнометра не повинно бути пухирців повітря) і знову зважують. Об'єм мінералу обчислюють за формулою

$$V = \frac{(m_2 - m_1) - (m_4 - m_3)}{d_t},$$

де m_1 – маса порожнього пікнометра; m_2 – маса пікнометра з водою; m_3 – маса пікнометра з мінералом; m_4 – маса пікнометра з мінералом і водою; d_t – густина води за температури зважування.

Густину мінералу визначають за такою формулою:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{(m_3 - m_1)d_t}{(m_2 - m_1) - (m_4 - m_3)}.$$

Найпоширенішими у практиці мінералогічних досліджень шліхів є діагностичні методи з визначення відмінностей у властивостях мінералів, які можна спостерігати за допомогою світлових мікроскопів. Під час діагностування прозорих мінералів широко застосовують **кристалооптичний метод**, за допомогою якого визначають низку оптичних властивостей мінералу: осність, оптичний знак, знак видовження, кут загасання та ін. Однак у практиці мінералогічного аналізу зазвичай використовують скорочений варіант цього методу – визначають лише показники двозаломлення мінералу (імерсійний метод). У випадку аналізу шліхів з великою кількістю невизначених прозорих мінералів рекомендують підготувати кілька препаратів з імерсійними рідинами п'яти показників заломлення: 1,530, 1,580, 1,630, 1,700 і 1,780. У рідину 1,530 потрапляють кварц, калієві польові шпати, альбіт, олігоклаз, у рідину 1,580 – берил, флогопіт, біотит, мусковіт, серицит, хлорити, ангідрит, берtrandит, у рідину 1,630 – апатит, барит, топаз, андалузит, сподумен, звичайна рогова обманка, актиноліт, тремоліт, воластоніт, турмалін, целестин, фенакіт, у рідину 1,700 – олівін, кіаніт, ставроліт, силіманіт, епідот, цоїзит, авгіт, діопсид, везувіан, аксиніт, діаспор, у рідину 1,780 – гранати, циркон, титаніт, шееліт, сфалерит, монацит,

ксенотим, пірохлор, ортит, сидерит, баделеїт, каситерит, рутил, анатаз, брукіт, егірін, корунд.

У практиці мінералогічного аналізу шліхів широко застосовують також діагностичні методи, які ґрунтуються на **якісних хімічних реакціях**. Ці методи не потребують великої кількості вихідного матеріалу і складної апаратури, вони є швидкісними і наочними. Їх можна використовувати навіть у польових умовах, що забезпечує експресне визначення мінерального складу шліхів.

Діагностичні хімічні реакції проводять кількома методами:

плівковим – утворення на поверхні мінералу тонкої забарвленої плівки під час обробки його певними реактивами (наприклад, наліт металевого олова на каситериті в разі обробки його соляною кислотою на цинковій пластинці);

крапельним – безпосередня дія на мінерал певним реактивом зі спостереженням специфічних наслідків (газовиділення, повне або часткове розчинення, поява характерного забарвлення розчину або осаду);

мікрокристалооптичним – утворення характерного кристалічного осаду, який випадає з розчину мінералу в разі додавання певного реактиву;

методом сухих забарвлених реакцій – розтирання порошку мінералу у фарфоровому тиглі з певними сухими реактивами до отримання забарвлення продуктів твердофазових реакцій.

Найбільше поширені в практиці лабораторних мінералогічних досліджень крапельні діагностичні реакції, які дають змогу за характером взаємодії порошку мінералу з реактивами визначати головні компоненти його складу і на цій підставі з'ясувати його видову належність. Є відповідні методичні рекомендації, у яких наведена ціла серія крапельних діагностичних реакцій на всі катіони і головні радикали найпоширеніших мінералів.

Плівкові діагностичні реакції спостерігають під дією різних реагентів на зерна мінералів у разі охолодження або нагрівання. Зазвичай використовують сильні кислоти. Унаслідок часткового розчинення поверхневих зон зерен мінералу на них утворюються

плівки продуктів реакції, забарвлені або безбарвні. Ці реакції є специфічними і дають змогу однозначно діагностувати мінерал.

Мікрокристалооптичні діагностичні реакції широко застосовують у хімічному аналізі для визначення низки елементів. У мінералогічній практиці вони не дуже поширені, проте в окремих випадках за їхньою допомогою можна швидко визначити видову належність мінералу.

Список використаної та рекомендованої літератури

1. Джонс М. П. Прикладная минералогия / М. П. Джонс. – М., 1991.
2. Евзикова Н. З. Поисковая кристалломорфология / Н. З. Евзикова. – М., 1984.
3. Евзикова Н. З. Практический аспект кристалломорфологии касситерита / Н. З. Евзикова // Зап. Всесоюз. минерал. об-ва. – 1972. – Вып. 2.
4. Копченова Е. В. Минералогический анализ шлихов и рудных концентратов / Е. В. Копченова. – М., 1979.
5. Методы минералогических исследований : [Справочник] / [под ред. А. И. Гинзбурга]. – М., 1985.
6. Сливко Є. М. Мінералогічний аналіз. Текст лекцій / Є. М. Сливко. – Львів, 2004.
7. Современные методы минералогических исследований. – М., 1969.

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	3
МІНЕРАЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ	4
Тема 1. МІНЕРАЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ, ТЕНДЕНЦІЇ ЇХНЬОГО РОЗВИТКУ ТА СУЧАСНІ ЗАВДАННЯ.....	4
Тема 2. МІНЕРАЛОГІЧНЕ ОПРОБУВАННЯ.....	9
Тема 3. МЕТОДИ РОЗКРИТТЯ МІНЕРАЛІВ. ГРАНУЛО- МЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ.....	17
Тема 4. МЕТОДИ СЕПАРАЦІЇ МІНЕРАЛІВ.....	27
Тема 5. МЕТОДИКА ДІАГНОСТИКИ МІНЕРАЛІВ ШЛІ- ХІВ.....	41