КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені Тараса Шевченка
Навчально-науковий інститут
«Інститут геології»

Лазарєва І.І.

Прикладна мінералогія

Частина І

Засоби вирішення технологічних задач прикладної мінералогії

Навчальний посібник

Київ – 2015

Рецензент:

Шнюков С.Є. – доктор геологічних наук, завідувач кафедри мінералогії, геохімії та петрографії ННІ «Інститут геології».

Лазарєва І.І. – кандидат геологічних наук, доцент кафедри мінералогії, геохімії та петрографії ННІ «Інститут геології».

Прикладна мінералогія. Частина І – Засоби вирішення технологічних задач прикладної мінералогії: електронний навчальний посібник;/ Лазарєва І.І. – електронний ресурс ННІ «Інститут геології». – 121 с.

Навчальний посібник складено за програмою курсу "Прикладна мінералогія". Посібник включає питання щодо: сучасних методів вивчення властивостей мінералів і речовинного складу корисних копалин, що забезпечують одержання необхідних вихідних даних для розробки технології їх видобутку.

Посібник рекомендований Вченою радою ННІ «Інститут Геології» (протокол № 4 від 21 жовтня 2015 року) та призначений для студентів, які навчаються за кваліфікаційним рівнем «магістр» в галузі знань «Науки про Землю», з напряму підготовки «Геохімія і мінералогія» та широкого загалу фахівців геологів.

Зміст

Зміст та основні поняття прикладної мінералогії……		6
1	Засоби вирішення технологічних задач прикладної мінералогії…….	11
1.1	Фактори, що впливають на технологічні властивості мінералів……	11
1.1.1	Хімічний склад мінералів……...	15
1.1.2	Кристалохімічні особливості мінералів……..	16
1.2	Вимоги до якості технологічних (мінералогічних проб)……	19
1.3	Мінералогічні дослідження технологічних проб……	21
1.3.1	Задачі і зміст досліджень……	25
1.3.2	Послідовність вивчення речовинного складу руди технологічної проби…….	27
1.4	Попередня підготовка технологічних проб……	31
1.4.1	Подрібнення і стирання…….	35
1.4.1.1	Способи подрібнення і стирання проб……..	38
1.4.2	Грохочення і класифікація за крупністю…….	43
1.5	Процеси збагачення (фракціонування) корисних	45

	копалин……..	
1.5.1	Гравітаційні методи збагачення……	45
1.5.1.1	Збагачення у важких рідинах……..	47
1.5.1.2	Збагачення в потоках постійного і перемінного напрямку……	52
1.5.1.3	Збагачення в потоках на нахиленій площині…	55
1.5.1.4	Збагачення за допомогою флотації……..	59
1.5.2	Збагачення мінералів за тертям і формою……	61
1.5.3	Збагачення мінералів за магнітними властивостями…….	63
1.5.4	Збагачення мінералів за електричними властивостями……	67
1.5.5	Збагачення за формою……	70
1.5.6	Збагачення за пружністю……	71
1.5.7	Збагачення хімічними методами……	73
1.5.8	Виділення моно мінеральних фракцій……..	74
1.6	Фазовий аналіз мінеральної речовини……	76
1.6.1	Оптична мікроскопія…….....	78
1.6.1.1	Мінералогічний аналіз……	78

1.6.2	Додаткові методи діагностики……	82
1.6.2.1	Імерсійні методи вивчення мінеральної речовини……..	82
1.6.2.2	Діагностика мінералів за допомогою люмінесцентної спектроскопії……	88
1.6.3	Рентгеноструктурні дослідження…….	94
1.6.4	Інфрачервона спектроскопія…….	101
1.7	Методи вивчення елементного складу……	103
1.7.1	Титриметричний метод або «мокра хімія»……..	104
1.7.2	Рентгено-флуоресцентна спектроскопія……..	106
1.7.3	Рентгенівський мікроаналіз……	112
Контрольні запитання до частини I…….……..		118
Рекомендована література до частини I ……		120

Зміст та основні поняття прикладної мінералогії.

Мінералогія – наука про мінерали. Вона вивчає їх класифікацію, структуру, склад, фізичні властивості, умови утворення. Але мінералогія це, головним чином, „чиста”, ізольована наука, що має своє окреме і визнане місце в системі геологічних знань. Але, на жаль, її дані не можуть напряму бути використані для потреб інших геологічних дисциплін.

Тому виникла потреба у створенні спеціальної „прикордонної” дисципліни – „Прикладна мінералогія”.

Прикладна мінералогія вивчає можливість використання мінералогічної інформації для потреб інших геологічних дисциплін, а також переробної промисловості.

Предметом вивчення прикладної мінералогії (ПМ) – є мінерали, але не всі, а лише ті, які мають практичне (промислове) значення або важливі як джерело інформації про геологічні процеси, в тому числі і процеси рудоутворення.

Якщо говорити про зв’язок ПМ з іншими науками, то ПМ акумулює та узагальнює дані, що постачають інші геологічні дисципліни: мінералогія, геохімія, петрологія, фізика мінералів для використання у

пошуковій мінералогії, вивчення та розуміння петрогенезису та переробці мінеральної сировини. Таким чином, як тільки дані мінералогії починають використовуватись іншими геологічними дисциплінами ми маємо справу з прикладною мінералогією.

Як уже стало зрозуміло, існує три типи задач, що вирішує прикладна мінералогія:

1. Генетичні задачі. Реставрація умов утворення за складом і властивостям мінералів:

Парагенетичний аналіз мінеральних асоціацій.

Термобарометричний аналіз який дозволяє за розподілом елементів між співіснуючими рівноважними мінералами кількісно оцінювати температуру і тиск, при який встановилась рівновага між мінералами.

Термобарогеохімічний аналіз. Дослідження мінералоутворювальних середовищ, що законсервовані в газово-рідинних, сольових та розплавних включеннях в мінералах. За їх допомогою визначають склад рідкої, газової та твердої фаз у включеннях, оцінюють температуру та тиск їх утворення, основність – кислотність мінералоутворювального середовища, а також їх агрегатний стан. За дослідженнями вторинних включень розшифровують історію існування мінералів після їх утворення.

Онтогенічний аналіз. Дослідження процесів зародження, зростання та змінення мінеральних індивідів. Надає можливість визначити засоби утворення мінералів (вільне зростання, заміщення, перекристалізація).

Ізотопний аналіз. Виявлення джерела речовини, абсолютного віку мінералів і протяжність їх подальшого змінення.

2. Пошукові задачі. Комплекс досліджень, направлених на підвищення ефективності пошукових та оціночних робіт. Висунення нових пошукових критеріїв на основі вивчення типоморфізму мінералів. У якості таких критеріїв можуть виступати самі мінерали, визначені мінеральні асоціації та їх специфічні особливості, що можуть бути експресно визначені в польових умовах або в стаціонарних лабораторіях:

- Ідентифікація різних генетичних та формаційних типів родовищ за особливостями структури та складу індикаторних мінералів.
- Виділення етапів і стадій процесу мінералоутворення, рудних та безрудних стадій за дослідженнями властивостей одноіменних мінералів, що утворилися в різний час.
- Визначення рівнів ерозійного зрізу родовищ, а звідси їх перспективності за дослідженнями

властивостей окремих мінералів або їх парагенезисів, які закономірно змінюються з глибиною завдяки змінам параметрів середовища (температури, тиску, фугітивності летких тощо).

- Визначення масштабів та зональності зруденіння; проведення мінералогічної кореляції інтрузивних, осадових і метаморфічних товщ, встановлення геодинамічних режимів району та типу осадових утворень (океанічні, континентальні тощо).
- Встановлення ступеня і характеру діагенетичних і епігенетичних перетворень осадових товщ, розчленування карбонатних товщ, виділення горизонтів найбільш перспективних для локалізації в їх межах рудної мінералізації і утворення стратиформних родовищ
- Розчленування метаморфічних порід за ступенем метаморфізму, що дозволяє прогнозувати знаходження родовищ визначених типів; встановлення формаційної приналежності порід різних інтрузивних комплексів, встановлення їх потенційної рудоносності.

Можливе рішення і багатьох інших завдань.

3. Технологічні задачі.

- Розробка методів і прийомів мінералого-технологічного картування з метою виділення різних типів і сортів руд і їх раціональної обробки.
- Проведення досліджень, направлених на

виявлення усіх цінних компонентів і простежування їх поведінки в ході технологічних процесів з метою виявлення шляхів комплексного використання сировини і розробки безвідвальних технологій.

- Виявлення форм входження рудних елементів у склад мінералів з метою правильного вибору напрямку технологічних досліджень.
- Дослідження балансу розподілу рудних елементів по мінералам і визначення теоретично можливого видобутку.
- Дослідження поведінки мінералів в ході процесів збагачення (при подрібненні, стиранні, гравітації, сепарації, флотації).
- Мінералогічне дослідження відвальних продуктів з метою їх утилізації і створення безвідходних технологій.

Звичайно, більшість з цих завдань вирішується при комплексних дослідженнях (мінералогічне, структурно-геологічне, геохімічне і геофізичне тощо). Тому найважливішим завданням ПМ є розробка питань раціонального комплексування вказаних методів і послідовності їх проведення.

1 Засоби вирішення технологічних задач прикладної мінералогії

Технологічна мінералогія поєднує мінералогічні і технологічні дослідження, які пов’язані з вивченням речовинного складу, текстурно-структурних ознак корисних копалин, технологічних властивостей мінералів в еволюції єдиної геолого-технологічної системи на макро-, мікро- та нанорівнях, направлені на комплексне використання мінеральної сировини при розробці раціональних, екологічно чистих схем збагачення. Вона дозволяє з єдиних позицій прослідкувати весь хід змінень мінеральної речовини літосфери через технологію обробки і переробки до накопичення в літосфері відходів.

1.1 Фактори, що впливають на технологічні властивості мінералів

В наш час відомо декілька тисяч мінеральних видів, склад кожного з яких характеризується індивідуальною, у великій мірі ідеалізованою, кристалохімічною формулою, а будова – ідеалізованою кристалохімічною структурою. Мінерали з систематичними відхиленнями складу або кристалохімічної будови від ідеалізованих відносять до

мінеральних різновидів. Загальна кількість мінералів і їх різновидів складає біля 5-6 тисяч.

У складі і кристалохімічній структурі реального мінералу завжди знаходять відображення умови його формування і наступного існування, так звані типоморфні особливості, в тому числі типохімізм, структурний типоморфізм, які використовуються при генетичній класифікації мінералів.

Систематична мінералогія являє собою їх класифікацію за сукупністю ідеалізованих за складом, кристалічній будові та подібності цих властивостей. В окремі класи виділяють самородні елементи та інтерметалоїди, а також сполуки, які не містять оксисену (арсеніди, сульфіди, карбіди, селеніди тощо).

Кисневі сполуки систематизують, в основному, за їх аніонною складовою у вигляді класу оксидів солей кисневих кислот: класи силікатів, боратів, сульфатів, карбонатів, фосфатів, арсенатів, ванадатів тощо.

Тісний зв’язок кисневих сполук з їх кристалічною структурою дозволила розробити кристалохімічну класифікацію мінеральних видів, яка заснована на типі кристалічної структури. Кристалічна структура, в свою чергу, визначається розмірами атомів, іонів та молекул, що її складають, а також характером їх взаємодії (типом хімічного зв’язку). Речовини, які близькі за хімічним складом та належать до одного

структурного типу, мають близькі фізичні властивості. Речовини, що близькі за хімічним складом, але належать до різних структурних типів, за фізичними властивостями, зазвичай, відрізняються одне від одного більш значимо (наприклад, модифікації вуглецю – графіт і алмаз).

Всі структурні типи можна розділити на 5 категорій: координаційні, острівні, ланцюжкові, шаруваті, каркасні.

В координаційних сполуках найбільш короткі міжатомні відстані близькі. Такі структури характеризуються великими координаційними числами з правильними координаційними багатогранниками. Вони представлені самородними елементами, інтерметалідами.

В острівних структурах на найменших відстанях один від одного розташоване невелике число атомів, а відстані між такими «островами» суттєво більші. Подібна ж картина спостерігається у ланцюжкових і шаруватих структурах з тією різницею, що «острови» мають іншу будову.

В каркасних структурах найменшими відстанями пов’язана основна частина атомів. В пустотах структур розташовуються «атоми впровадження». Однакові короткі міжатомні відстані можуть спостерігатися тільки в простих структурах, де кількість різних сортів

атомів не перевищує двох. Як тільки структура ускладнюється за рахунок входження різних атомів на одні і ті ж структурні позиції, міжатомні відстані не можуть залишатися строго однаковими внаслідок різниці в їх розмірах.

Для практичного використання важливо, яким кристалохімічним типом репрезентоване мінеральне утворення, оскільки структурний мотив, тип і анізотропія хімічного зв'язку між іонами, які будують свою кристалічну структуру, визначають фізичні властивості мінеральних компонентів сировини, що має бути перероблена. Кристалохімічна характеристика мінералів необхідна для створення схеми наступної переробки мінеральної сировини. Вона є складовою частиною технологічних досліджень мінералів. Кристалохімічні характеристики прогнозують поведінку мінералів або їх асоціацій в процесі збагачення. Так, наприклад, наявність епітаксичних зростань (закономірні взаємні проростання мінералів) може унеможливити відокремлення один від одного двох різних за складом мінеральних видів. Тому кристалохімічна типізація породоутворюючих та рудних мінералів у великій мірі обумовлює напрямки переробки руд, застосування тих або інших методів збагачення.

1.1.1 Хімічний склад мінералів

Хімічний склад мінералу відображає його кристалохімічна формула, яка уточнюється шляхом дослідження його елементного складу. Чим більш чутливими є застосовані методи дослідження, тим більша кількість елементів-домішок може бути виявлена у складі будь-якого мінералу аж до виявлення мінеральних різновидів (наприклад, магнетит, що містить Si; гранат, що містить Sn тощо).

Зв'язок елемента-домішки з матрицею мінералу може мати різний характер. Домішковий елемент може входити в кристалохімічну структуру як ізоморфна домішка (заміщувати який-небудь з мінералоутворюючих елементів в його структурному положенні), розташовуватись в пустотах кристалічного побудування для компенсації заряду при гетеровалентному ізоморфізмі. Домішковий елемент може формувати власну мінеральну фазу, яка захоплюється мінералом-хазяїном в процесі: його кристалізації як акцесорію; епітаксичного вбудування; розпаду твердого розчину при охолодженні високотемпературного мінералу (наприклад, титаномагнетит, що розпадається на ільменіт і магнетит); часткової перекристалізації, що пов'язана з накладеними процесами.

Коректне визначення форм знаходження

домішкових елементів в мінералі, руді, концентраті є важливим, оскільки є обґрунтуванням засобів його вилучення як у випадку його цінності, так і у випадку його шкідливості для наступного процесу технологічного переділу.

Шляхи коректного визначення форми знаходження домішкового елемента, сили та характеру зв'язків його з мінеральною матрицею залежать від типу руди, ступеня розсіяння корисного (або шкідливого) компонента, ступеня дисперсності і взаємного проростання мінеральних фаз і інших характеристик мінеральної сировини.

1.1.2 Кристалохімічні особливості мінералів

Тип кристалічної структури визначає морфологію мінералу, його ізометричність і форми виділення; анізотропію властивостей; поведінку під час механічних впливів, яка багато в чому визначається наявністю/відсутністю спайності, ступенем її досконалості як наслідком упаковки і взаємодії атомів, іонів, молекул та таких фрагментів кристалічної структури, як шар або ланцюжок.

Кристалохімічні особливості при збагаченні визначають специфіку властивостей і поведінки. Наприклад у шаруватих силікатів сильні міжатомні зв'язки в площині шару і послаблені між шарами, що

приводить до розщеплення кристалів слюд на листуваті окремості і це ж пояснює різницю в поведінці та властивостях таких шаруватих силікатів як: слюди і монтморилоніт, слюда і тальк-пірофіліт. Ця різниця пов'язана з тим, що в слюдах шари пов'язані міжшаровим іоном (K, Ca, Na), в монтморилоніті ж зв'язок здійснюється лише за рахунок молекули H_2O, а в мінералах серії тальк-пірофіліт ─ лише слабкими залишковими зв'язками. Наслідком цих кристалохімічних особливостей є різниця у фізичних властивостях згаданих шаруватих силікатів, а звідси і різниця у поведінці в процесі збагачення.

До категорії кристалохімічних особливостей відноситься і явище ізоморфізму, оскільки входження до структури мінералу ізоморфної домішки, її природа, вміст, характер розселення в структурі (утворення структури заміщення «іон на іон», структури впровадження із заповненням простору, структури віднімання з утворенням вакансій або «дірок») впливають на технологічні властивості мінералів. Тип ізоморфізму визначає структурний стан мінералу. Наприклад: в халькопіриті при розупорядкованості розселення в кристалічній структурі іонів Cu та Fe зростає ізотропія фізичних властивостей; У флюориті по мірі заміщення Ca REE слабшає спайність по площині октаедра (111); у мінералів серії колумбіт-

танталіта на фізичні властивості впливає характер розподілу по структурним позиціям іонів Ta, Nb, Fe, Mn і ступінь окислення Fe та Mn.

Властивості твердих речовин можна розділити на 2 групи: структурно чутливі і структурно нечутливі. Перші залежать від кристалічної структури мінералів, другі ─ головним чином від електричної будови атому і типу хімічного зв'язку. До перших відносять механічні властивості (твердість), до других ─ електричні і оптичні.

Такі властивості, як термічні, механічні і електричні, залежать від типу хімічного зв'язку. Головні типи хімічного зв'язку наступні: іонний зв'язок, де міжатомні відстані визначаються урівноваженням сил тяжіння між аніонами і катіонами і сил відштовхування між їх електронними оболонками; ковалентний, який характеризується наявністю загальної електронної пари з антипаралельними спінами; координаційний ─ різновид ковалентного зв'язку, який здійснюється за рахунок електронної пари одного атома, що бере участь у зв'язку; металевий, при якому частина електронів має можливість вільно переміщуватись по кристалу; залишкова (вандерваальсова). В реальних речовинах зв'язки рідко зустрічаються в чистому вигляді. Як правило, тип зв'язку носить проміжний

характер.

Переважання того або іншого типу зв’язку визначає електричні властивості мінералів: переважання металевого зв’язку забезпечує електропровідність в самородних металах, зплавах, інтерметалевих сполуках; іонний характер зв’язку проявлений, наприклад, в тому, що галоїдні солі лужних металів розчиняються в полярних розчинниках, дисоціюючи на іони.

1.2 Вимоги до якості технологічних (мінералогічних) проб

Технологічне опробування забезпечує технологічну оцінку мінеральної сировини родовищ, що знаходяться на стадіях детальних пошуків та розвідки. За результатами дослідження технологічних проб виконується технологічна типізація руд родовища, встановлюється принципова можливість промислового їх використання, обираються ефективні методи і оптимальні технологічні схеми збагачення та видобутку головних і попутних компонентів.

Технологічні проби, відібрані для дослідження з метою вибору найбільш раціональних технологічних схем і режиму переробки руд кожного виявленого типу, повинні представляти рудне тіло, що оцінюється

за своїм складом та іншим властивостям з точністю, яка відповідає меті технологічних досліджень. У зв'язку з цим під репрезентативністю технологічної проби розуміють ступінь відповідності головних властивостей руди (мінерального і хімічного складу), відібраної в пробу, властивостям руди того технологічного типу (сорту), який вона характеризує. При оцінці крупних технологічних проб необхідно також враховувати наступні основні фізичні властивості руд: щільність, вологість, шматковість.

Тобто, **репрезентативна проба –** це невелика кількість речовини, що характеризується у середньому тими ж параметрами і величинами, що і весь об'єм матеріалу з якого її було відібрано. Іноді (у випадку невеликих за об'ємом технологічних та опорних мінералого-геохімічних проб) репрезентативна проба – це суміш деякої кількості більш дрібних проб або зразків. Наприклад, репрезентативною пробою може слугувати як весь керн, що презентує певну породну відмінність, так і деяка кількість проб відібраних з цього керну. Середній результат, який отримано за великою кількістю репрезентативних проб, має наближатися до результату, який був би одержаний у разі досліджень усього об'єму матеріалу.

Однією з головних вимог при відборі проб є досягнення оптимальної ***репрезентативності їх за***

***масою*:** надійна маса проби *Q* (в кг), що відповідає її репрезентативності при найбільшому діаметрі *d* (мм) часток або зерен мінералів, які її складають, визначається за формулою Річардса-Чеччота, запропонованою у 1932 році**:**

$$Q=kd^2,$$

де *k* – емпіричний коефіцієнт, що приймає різні значення в залежності від вмісту корисних компонентів, крупності зерен мінералів і їх концентрації. Коефіцієнт *k* визначається дослідним шляхом. Формулу Річардса-Чеччота на практиці використовують і для визначення надійної маси на кожному етапі скорочення. В якості вихідного параметра при розрахунку рекомендованої маси вихідної проби прийнятий найбільший можливий розмір зерна мінералу у досліджуваному типі гірської породи. Зрозуміло, що тут неможливо урахувати вплив, скажімо, шлірових виділень на розподіл окремих мінералів в породі. Не можливо урахувати також характер поведінки акцесорних мінералів. Згідно галузевого стандарту управління якістю аналітичних робіт (ОСТ 41-08-249-85) коефіцієнт *k* варіює в залежності від рівномірно зернистості гірської породи від 0,05 (для масивної рівномірно зернистої) до 1,6 (для вкрай нерівномірно зернистої зі спорадичними

включеннями). Залежно від цього варіює маса проб, що вважаються репрезентативними (рис. 1)

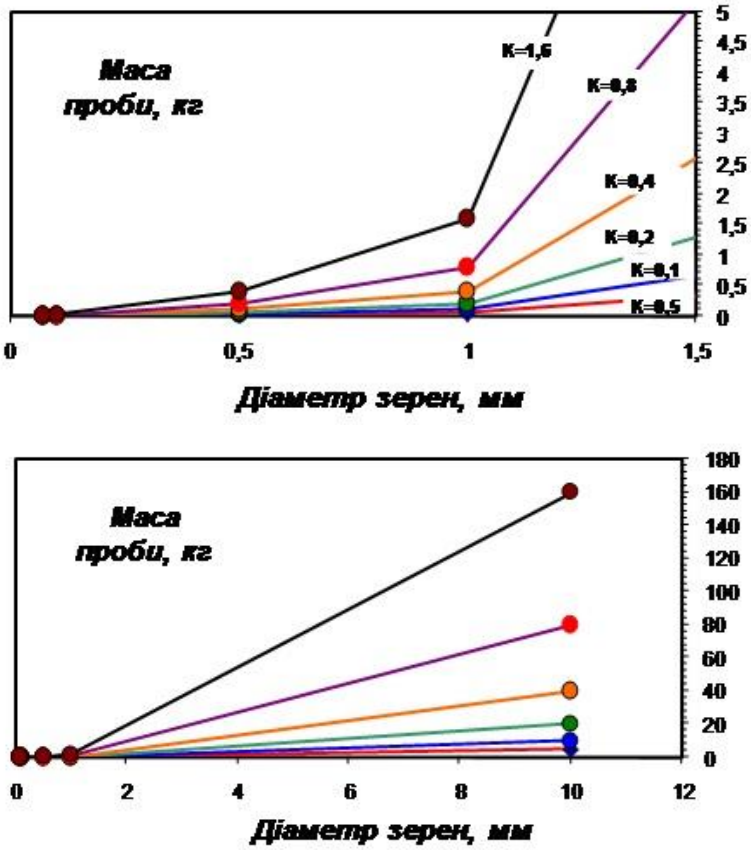

Рисунок 1 — Репрезентативна маса технологічних та опорних мінералого-геохімічних проб в залежності від діаметра зерен.

Звичайно такий розподіл проб на категорій досить умовний. І вірний вибір параметру *k* при відборі вихідної проби є досить складним завданням.

Звичайно, в польових умовах проби ніхто не

зважує. При вивченні, скажімо, акцесорних мінералів (як окремий випадок) у вивержених породах вихідна проба формується з окремих штуфів, відібраних у вузлах прямокутної сітки. Маса її має складати не менше 12-15 кг і оцінюється маса за об'ємом. При опробуванні, скажімо, пегматитів з вкрай нерівномірним розподілом мінералів, проба повинна відбиратися безперервною борозною і бути значно більшої маси, а іноді до проби повинен потрапити весь об'єм пегматитової камери (при невеликих її розмірах). В останньому випадку маса проби значення мати не буде, оскільки аналізуватись буде весь матеріал, а не його репрезентативна частка.

При шліховому опробуванні маса проби коливається від 16 до 32 кг і, знову ж таки оцінюється вона за об'ємом матеріалу.

Необхідно додати, що при передачі проб до аналітичної лабораторії необхідно дотримуватись наступних правил:

1. До лабораторії необхідно представити проби, їх перелік і замовлення на аналіз. У замовленні потрібно вказувати які саме види аналізу повинні бути виконані і з якою точністю. Тобто необхідно сформулювати завдання.

2. Маса проби повинна бути репрезентативною і достатньою для виконання

основного аналізу, контрольних аналізів усіх видів і відбору дублікату основної проби.

3. Кожна проба повинна бути упакованою належним чином.

4. На кожній упаковці повен бути вказаний номер проби, номер замовлення і рік відбору проби.

5. Проби повинні бути згруповані за видом сировини і розташовані в порядку зростання номерів.

6. На бланку замовлення повинно бути вказано: організація-замовник, її адреса і телефон; фамілія. Ім’я та по-батькові безпосереднього замовника; номер замовлення; кількість проб. До бланку – замовлення повинен бути прикладений перелік проб у трьох екземплярах з вказанням маси і крупності, з характеристикою складу кожної проби і переліком елементів, які мають бути визначені.

7. В переліку проби повинні бути згруповані за видами сировини і розташовані в порядку зростання номерів.

8. Номери проб повинні бути простими, тобто складатися з одних тільки цифр без літерних індексів, тире, рисок і т. д.

9. Якщо до лабораторії доправляється проба у вигляді кускового матеріалу, до замовлення повинні бути прикладені вказівки що до обробки проби.

10. В тарі разом із пробами повинні

знаходитися копії замовлення на аналіз та переліку проб.

1.3 Мінералогічні дослідження технологічних проб

1.3.1 Задачі і зміст досліджень

Мінералогічні дослідження технологічних проб проводять для одержання інформації про речовинний склад мінеральної речовини, який визначає його промислову цінність і технологічні властивості, можливі засоби переробки для одержання кондиційної продукції тощо.

Параметри речовинного складу у загальному вигляді включають інформацію про мінеральний склад, форму проявлення корисних компонентів, структурно-текстурних особливостей руд, складі і властивостях окремих мінералів. Такі дані дозволяють прогнозувати технологічні властивості руди.

На стадії пошуково-оціночних робіт, у випадку віднесення рудо прояву до достатньо вивченого типу, мінералогічні дослідження проводяться на невеликих технологічних пробах, які представляють природні різновиди руд. Дослідження включають оцінку структурно-текстурних особливостей, мінерального складу, параметрів розкриття головного рудного

мінералу. На їх основі проводиться попередня оцінка збагаченості руди і прогноз порівняльних показників збагачення природних різновидів. Для рудопроявів, які відносяться до складного, мало вивченого або нового типу руд, уже на цій стадії вивчення лабораторної проби. Дослідження, крім перелічених, включають: вивчення балансу розподілу корисного компоненту по мінералам, складу і властивостей головних мінеральних форм корисного компонента, супутніх і нерудних мінералів.

На стадії попередньої розвідки проводиться детальне вивчення речовинного складу при максимальному використанні комплексу мінералогічних досліджень для прогнозування технологічних властивостей природних типів і різновидів руд. Вивчається мінеральний склад руди на середній пробі: досліджують класи крупності, гравітаційні і магнітні фракції, всі фізико-механічні властивості мінералів, гранулометричний склад рудних вкраплень і нерудних мінералів недробленій і стадіально дробленій руді; визначають їх питому поверхню, ступінь розкриття руди при подрібненні, розподіл типів зростків, границі зростань рудних мінералів в зростках і класах крупності, форму знаходження корисних компонентів в руді, баланс розподілу основних і супутніх елементів по мінералам.

На стадії детальної розвідки здійснюється технологічна оцінка відповідності напівпромислової проби лабораторної на найбільш важливим і інформативним мінералогічним даним: мінеральному і гранулометричному складам руди, розкриттю мінералів в подрібненій руді, балансу розподілу головних і супутніх корисних компонентів по мінералам.

Наведена характеристика головних цілей, задач і зміст мінералогічних досліджень для розробки технології збагачення наведені лише в загальному вигляді. Можливі методи і області їх застосування залежать від виду сировини, ступеня її вивченості, постановки і вирішення різних особливих технологічних задач. Об'єм, глибина і різноманітність досліджень мінеральної сировини безперервно розширюється з розвитком технологічної мінералогії. Одним з нових напрямків останньої є направлене змінення технологічних властивостей мінералів.

1.3.2 Послідовність вивчення речовинного складу руди технологічної проби

Лабораторні дослідження полягають у вивченні речовинного складу руди, які включають пробопідготовку, мінералогічні і аналітичні дослідження.

Технологічні проби вивчаються в наступній послідовності:

1. *Підготовка проби до досліджень*: відбір штуфів, виготовлення шліфів і аншліфів.

Види мінералогічних і аналітичних досліджень: текстурно-структурний аналіз включаючи гранулометричний аналіз рудних мінералів.

Задачі, що вирішуються: вибір принципової технологічної схеми, метода крупно кускового збагачення; оцінка якості руди з урахуванням геолого-промислового типу родовища.

2. *Підготовка проби до досліджень*: відбір проби на аналітичні дослідження; відбір подрібненої проби (розмір часток 2 мм, маса – 100 -3000 г) на мінералогічні дослідження.

Види мінералогічних і аналітичних досліджень: визначення елементного складу руди.

Задачі, що вирішуються: виявлення всіх можливих корисних компонентів, шкідливих та радіаційних домішок.

3. *Підготовка проби до досліджень*: відбір наважок з класів крупності на визначення вмістів корисних елементів; фракціонування класів крупності: розділення у важких рідинах, виділення магнітної та декількох електромагнітних фракцій; зважування фракцій.

Види мінералогічних і аналітичних досліджень: розподіл корисних компонентів за класами крупності (ситовий аналіз); приблизно-кількісне визначення мінерального складу оптико-мінералогічним методом; кількісне визначення повного мінерального складу руди комплексом інструментальних методів; оцінка ступеня розкриває мості зерен рудних мінералів і розподілу типів рудних зростків.

Задачі, що вирішуються: вибір схеми рудо підготовки, оцінка шламування руди; оцінка комплексного використання мінеральної сировини, якості концентратів, втрат в продуктах гравітаційної та магнітної сепарації; виділення природних і технологічних типів і сортів руд, складання мінералого-технологічних карт; обґрунтування принципової схеми збагачення, імовірних втрат (частки, яку неможливо видалити) в продуктах збагачення.

4. *Підготовка проби до досліджень*: відбір наважок з фракцій дя визначення вмістів основних корисних компонентів.

Види мінералогічних і аналітичних досліджень: визначення розподілу основних корисних компонентів по фракціям, розділеним за шільністю (гравітаційний аналіз) і магнітним властивостям.

Задачі, що вирішуються: обґрунтування

мінімальних втрат в «хвостах» і проміжних продуктах, оцінка вмістів і ступеня видалення корисних компонентів в концентратах.

5. *Підготовка проби до досліджень*: відбір середньої проби для виділення монофракцій.

Види мінералогічних і аналітичних досліджень: складання балансу розподілу корисних елементів по мінералам.

Задачі, що вирішуються: розрахунок теоретично можливого видалення корисних компонентів, ступеня їх розсіяння в різних технологічних продуктах.

6. *Підготовка проби до досліджень*: виділення моно фракцій (класи крупності – 0,5+0,05 мм); гравітаційне збагачення; ультразвукова та кислотна обробка проб, сепарація важких фракцій: магнітна, електрична, електромагнітна; флотація; доведення моно фракцій (вручну).

Види мінералогічних і аналітичних досліджень: визначення хімічного складу мінералів; вивчення форм входження елементів-домішок в мінерали; визначення структурних і фізичних властивостей мінералів.

Задачі, що вирішуються: оцінка якості концентратів; оцінка комплексності руди і можливості видалення корисних компонентів; оцінка можливості застосування, вибір режимів крупно кускової, гравітаційної, магнітної, електричної, флотаційної та

інших методів сепарації, схем хіміко-металургійного переділу.

Мінімальна маса проб для мінералогічного аналізу визначається необхідністю одержання достатньої маси фракції (не менше 0,1 г), в якій концентрується рудна речовина (наприклад, для рідкіснометалевих та олов'яних руд – 0,5 - 1 кг; при комплексному вивченні – 2 – 4 кг).

1.4 Попередня підготовка технологічних проб.

Попередня підготовка технологічних проб для мінералогічного аналізу включає універсальну низку операцій, яка, загалом, співпадає і зі схемою подальшого промислового збагачення руд. Такі універсальні операції включають:

1. *Процеси руйнування мінеральних комплексів* – подрібнення, стирання і дезінтеграція. Забезпечують розкриття мінералів перед збагаченням або вивченням фазового складу. Максимальне розкриття мінералів досягається при розколюванні кусків руди або зростків по інтеркристалічним граням. Кінцева крупність подрібнення матеріалу визначається крупністю вкрапленості мінералів що вилучаються (для мінералогічного аналізу проби подрібнюються до розмірів акцесорних мінералів – зазвичай 0,5 мм) або

необхідністю одержання продукту заданого гранулометричного складу для безпосереднього використання

2. *Процеси розділення матеріалу за крупністю* – грохочення та класифікація. Забезпечують розділення матеріалу на класи по крупності, необхідні для одержання максимальної ефективності розділення мінералів при використанні різних методів збагачення або найбільшого економічного ефектупри безпосередньому використанні в народному господарстві. Процеси класифікації можуть супроводжуватись вибірковим (селективним) створенням агрегатів (укрупненням) тонких (дрібних) часток методами: флокуляції (за рахунок хімічних реагентів); магнітної флокуляції (за рахунок магнітного поля); електрокоагуляції (під дією магнітного поля).

3. *Процеси змінення фізичних, фізико-хімічних властивостей і хімічного складу мінералів* (застосовуються при промисловому збагаченні), які розділяються з метою підвищення ефективності процесів збагачення. Вони можуть включати в себе операції термічної, хімічної, механічної, електричної та інших видів обробки мінеральних часток перед розділенням.

4. *Фракціонування* – процеси розділення, які використовують різні технологічні властивості

мінералів, при яких мінерали виділяються в окремі концентрати (у випадку мінералогічного аналізу для скорочення кількості мінералів у фракціях; у випадку технологічного переділу з метою вилучення корисних компонентів). До методів збагачення належать:

а) *гравітаційні* – засновані на відмінностях у щільності мінеральних фаз, що розділяються, які викликають різний характер їх руху у повітрі або рідині під дією сили тяжіння або центробіжних сил (широко застосовуються при збагаченні більшості типів руд);

б) магнітні – засновані на відмінностях у магнітній сприйнятливості мінералів, які викликають різні траєкторії їх руху в магнітному полі (широко застосовуються при збагаченні руд чорних металів, титанових, вольфрамових та інших типів руд);

в) електричні – засновані на різниці в електропровідності мінералів і здатності їх набувати під дією тих або інших фізичних факторів неоднакові за величиною і знаком електричні заряди (широко використовуються при збагаченні вольфрамових, титанових, олов'яних і неметалічних корисних копалин);

г) радіометричні – засновані на відмінностях мінералів в кольорі, блиску, прозорості, природній і наведеній радіоактивності, люмінесценції,

флюоресценції та інших властивостях;

д) флотаційні – засновані на різниці змочуваності поверхні часток мінералів, яка приводить до різної здатності прикріплювати бульки повітря у воді. Можливість регулювати змочуваність мінералів і розділяти дрібні частка, крупність яких складає соті частки міліметра, забезпечує універсальність флотаційних методів і придатність їх для збагачення різноманітних тонко вкраплених корисних копалин;

е) за тертям та формою – засноване на використанні різних траєкторій і швидкостей руху часток, що розділяються по нахиленій площині;

ж) *спеціальні методи збагачення за*: пружністю (різниця траєкторій по яким відкидаються при падінні на поверхню часток мінералів, що мають різну пружність); адгезійними процесами (різниця в здатності мінералів приклеюватись до жирової або термопластичної поверхні); хімічними властивостями (селективне розчинення цінних компонентів корисної копалини або шкідливих домішок водними розчинами хімічних реагентів); крупністю (вибіркове руйнування мінералів в результаті їх різної механічної тривкості при подрібненні, нагріванні та швидкому охолодженні, вибірковому збільшенні розмірів компонентів внаслідок їх пластичності або пониженої температури плавлення).

з) *допоміжні процеси збагачення* – процеси обезводнення та обезпилення продуктів збагачення шляхом їх дренування, згущення, фільтрації і сушки для доведення вологості цих продуктів до встановленої норми, а також процеси кондиціонування оборотних вод з метою повторного їх використання та очищення стічних вод перед скидом у водойму. Попереднє обезпилення і обезшламлювання підвищують ефективність головних процесів збагачення.

Застосування того або іншого процесу збагачення залежить від мінерального складу корисної копалини.

1.4.1 Подрібнення і стирання

Подрібненням і стиранням називають процеси зменшення розмірів шматків або зерен корисних копалин шляхом порушення їх під дією зовнішніх сил.

В залежності від характера зовнішніх сил розрізняють наступні процеси, які застосовуються в промисловості:

звичайне подрібнення і стирання, яке здійснюється за рахунок механічних сил;

самоподрібнення при взаємному впливі зерен;

вибухове – засноване на розпаді порід під дією внутрішніх сил розтягнення при швидкому знятті з них зовнішнього тиску;

вібраційне – подрібнення в полі вібраційних сил;

центробіжне – в полі центр обіжних сил;

струменеві – за рахунок кінетичної енергії часток, що рухаються на зустріч одна одній з великою швидкістю.

Принципової різниці між процесами подрібнення і стирання немає. Умовно вважається, що при подрібненні одержують відносно крупні продукти (діаметр зерен – 5, 2, 0,5 мм), а при стиранні – так звану «аналітичну пудру» (діаметр зерен – 0,05 мм). Процеси подрібнення і стирання за своїм призначенням можуть бути підготовчими і самостійними.

Метою підготовчого подрібнення і стирання корисних копалин перед збагаченням є розкриття мінералів при мінімальному їх пере подрібненні в результаті руйнування мінеральних зростків. Якщо мінерали мають різні фізико-механічні властивості, то в результаті подрібнення або стирання твердіші з них будуть представлені більш крупними зернами ніж крихкі та менш тверді. Таке подрібнення називається *вибірковим* і застосовується перед збагаченням за крупністю.

Подрібнення називають *самостійним*, якщо одержаний продукт є товарним і підлягає безпосередньому використанню (вапняки і доломіти,

які використовуються в якості флюсу; каміння при виготовленні щебеня тощо). Крупність подрібнених продуктів в цьому випадку визначається кондиціями, які пред'являються до відповідної сировини.

Подрібнення зазвичай проводиться в декілька стадій. Оскільки подрібнення і стирання є дуже енергозатратними операціями, на практиці завжди керуються принципом «Не подрібнювати нічого зайвого». Тому, якщо у вихідному продукті міститься достатня кількість готового класу, то його виділяють перед подрібненням або стиранням шляхом грохочення або класифікації за однією із схем наведених на рисунку 2

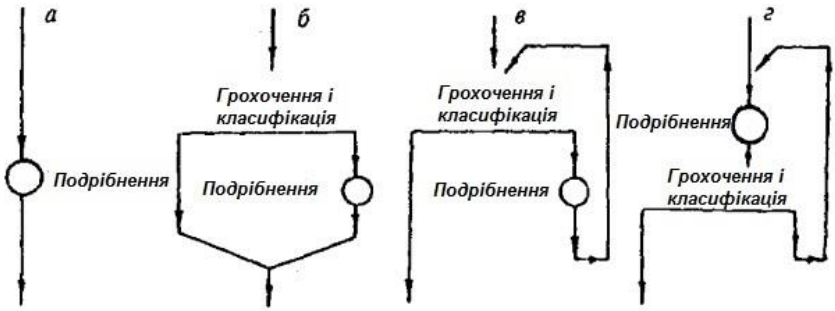

Рисунок 2 – Схеми відкритих (а, б) і замкнених (в, г) циклів подрібнення з попереднім (б), повір очним або контрольним (в) і сумісним попереднім і повірочним (г) грохоченням та класифікацією.

Сукупність операцій подрібнення і грохочення або стирання і класифікації складає цикл подрібнення , який може бути *відкритим* або *замкненим*.

В закритому циклі кожний шматок або зерно проходять через подрібнювач або стирач тільки один раз; в замкненому циклі виділені шматки або зерна повертаються ще раз на додроблювання або достирання в той же апарат.

1.4.1.1 Способи подрібнення і стирання

Розкриття мінералів при подрібненні і стиранні проходить в результаті порушення шматків або зерен. До головних засобів порушення (рис. 3) відносяться: роздавлювання, розколювання і удару, а також поєднання цих способів.

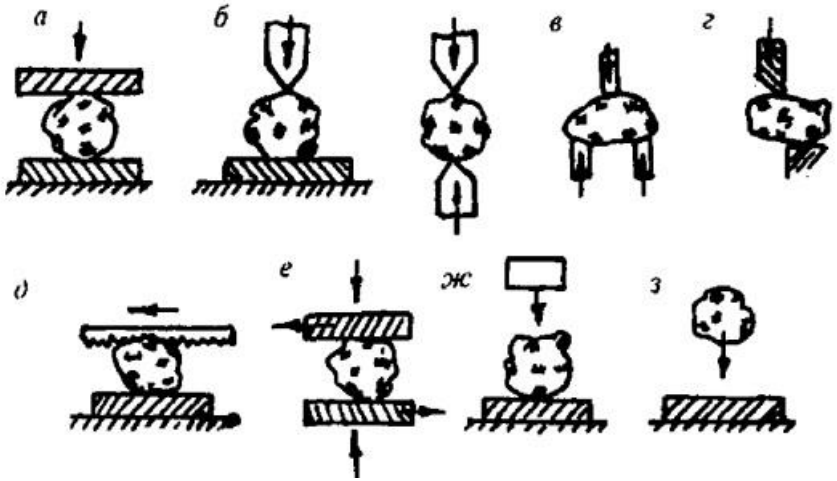

Рисунок 3 – Способи подрібнення: а – роздавлювання; б – розколювання; в – розламування; г – розрізання; д – розпилювання; е – стирання; ж – стиснений удар; з – вільний удар.

Машини, за допомогою яких подрібнюється матеріал, називають подрібнювачами. За конструкцією і головному способі подрібнення подрібнювачі класифікують на наступні типи:

щекові – працюють за принципом роздавлювання, розколювання та зламу;

валкові – працюють за принципом розколювання;

конусні – працюють за принципом роздавлювання і зламу; матеріал порушується між двох конусних поверхонь, одна з яких нерухома;

барабанні – працюють за принципом удару; матеріал порушується при вільному падінні і ударі об корпус барабану, що обертається;

молоткові і роторні – працюють за принципом удару по матеріалу бит,що швидко обертаються.

Для лабораторних досліджень технологічних проб зазвичай використовують послідовно щокові і валкові подрібнювачі

Для крупного подрібнення (2 мм) проб, як правило, використовуються щокові подрібнювачі, які діють за принципом роздавлювання матеріалу між двома металевими щоками. Розмір одержаних часток регулюється розмірами отвору між щоками. У разі мінералогічних проб, подрібнення виконується у декілька прийомів при послідовному зменшенні розмірів отвору (рис. 4).

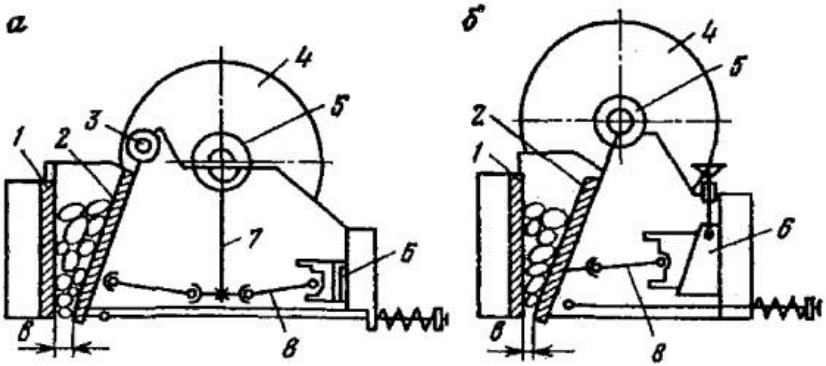

Рисунок 4 – Схема щокових подрібнювачів з простим (а) та складним (б) рухом щоки.

Для середнього подрібнення (від 2 до 0,5 мм) використовуються, як правило, валкові подрібнювачі. В них проба роздавлюється між двох циліндричних валків, що обертаються назустріч один одному. Розміри часток регулюються зазором між валками (рис 5).

Для більш тонкого подрібнення, тобто для перетворення проби до «аналітичної пудри» використовуються стирачі (млини) різних конструкцій (вібраційні, центробіжні, струйні тощо). Крім того, робочі поверхні, що безпосередньо стикаються з матеріалом проби, можуть бути виконані з різних твердих матеріалів (тверді сплави, корунд або кварц). Звичайно, під час обробки проби, речовина з робочих деталей подрібнювачів буде „забруднювати” пробу. Це, найчастіше, елементи групи заліза, алюміній або кремній. . В деяких випадках результатом механічного

подрібнення може стати змінення хімічного складу і кристалічної структури. Наприклад: За даними А. Рея, при подрібненні хлориту на дисковому стирачі протягом 1 хвилини вміст FeO в ньому, за рахунок окиснення, знижується з 17,7 до 16.73%, а за 6 хвилин – до 12.83 %. Одночасно порушується кристалічна структура мінералу. При стиранні проб на дискових та центробіжних стирачах температура проби може підвищуватись до 1000^0, що приводить до часткового розпаду карбонатів і зменшенню в них вмісту CO_2, крім того відмічається часткове плавлення деяких мінералів або змінення їх магнітних або люмінесцентних властивостей. Тому, при виборі схеми пробопідготовки необхідно враховувати можливість змінення первинного складу і властивостей мінералу під впливом нагрузки, що прикладається до нього, виходячи з конкретних потреб до того або іншого виду досліджень, а в окремих випадках *відмовлятися від механічних засобів дезінтеграції*, в ході яких проби підпадають під дію високих температур, водного середовища, локальних високих тисків тощо. Необхідно враховувати також можливість забруднення проб продуктами „натиру” робочих деталей дезінтегруючих механізмів.

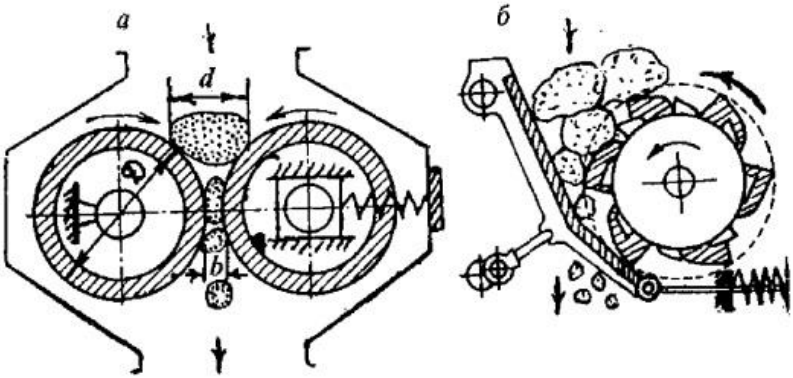

Рисунок 5 – Схеми двовалкової (а) та одновалкової (б) зубчастих подрібнювачів.

Зрозуміло, що чим більшим буде об'єм проби, тим меншим буде цей вплив (від 300 г – стандартна маса геохімічної проби і більше для інших видів проб). Якщо ж необхідно стерти невелику кількість речовини, наприклад мономінеральну фракцію для дифрактометричного або іншого виду аналізу, доцільно це робити вручну в керамічній або агатовій ступці.

Дуже важливим є наступний етап підготовки – це гомогенізація (перемішування) і скорочення проби (кільце і конус, дільник Джонса, сітка.). Етап цей найбільш трудоємний і найменш механізований, але саме цей етап є необхідним

1.4.2 Грохочення і класифікація за крупністю

Грохочення і класифікація є основними

процесами розділення сипких матеріалів на продукти різної крупності, які називають класами крупності.

Грохочення – процес розділення зернистого матеріалу на класи крупності шляхом просіювання його через одне або декілька сит або решет з каліброваними отворами (рис 6). Матеріал, що залишається на ситі називають *надрешетним,* або *верхнім*, той, що пройшов через отвори сит – *підрешетним*, або *нижнім*. При грохоченні у повітряному середовищі воно називається сухим, а в водному середовищі – мокрим. В обох випадках грохочення здійснюється в апаратах, які називаються грохотами.

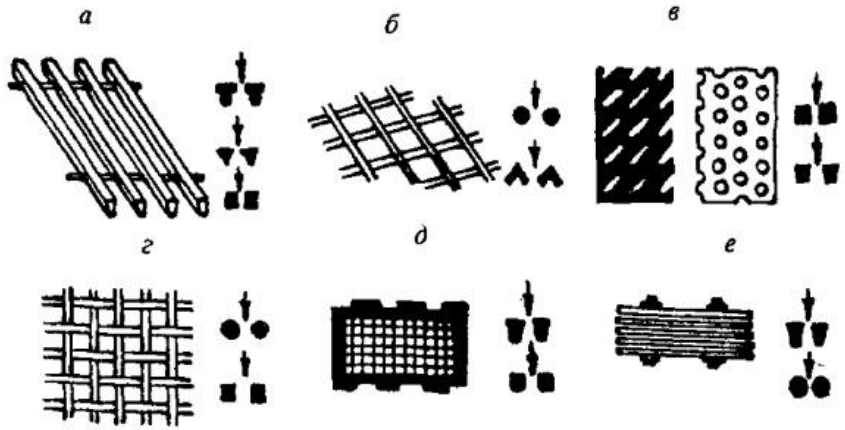

Рисунок 6 – Поверхні грохотів, що просіюють: а – металічні щілеподібні решітки; б – зварні металеві решітки; металеві штамповані сита і решета; г – сита зіткані з металевої нитки або синтетичного волокна; литі секційні резинові або синтетичні сита; е – пальтові металеві сита.

Класифікацією називається процес розділення матеріалу на класи за крупністю за швидкостями падіння зерен в рідкому або газоподібному середовищі під дією сили тяжіння або центр обіжної сили. На відміну від грохочення, яке розділяє матеріал за крупністю, класифікація розділяє матеріал за рівнопадаємості (кожний клас, одержаний при класифікації, містить відносно крупні зерна легких мінералів і дрібні зерна важких мінералів, які мають однакові швидкості падіння в середовищі. Якщо класифікація проводиться у водному середовищі, вона називається гідравлічною, а якщо у повітряній – пневматичною (рис. 7).

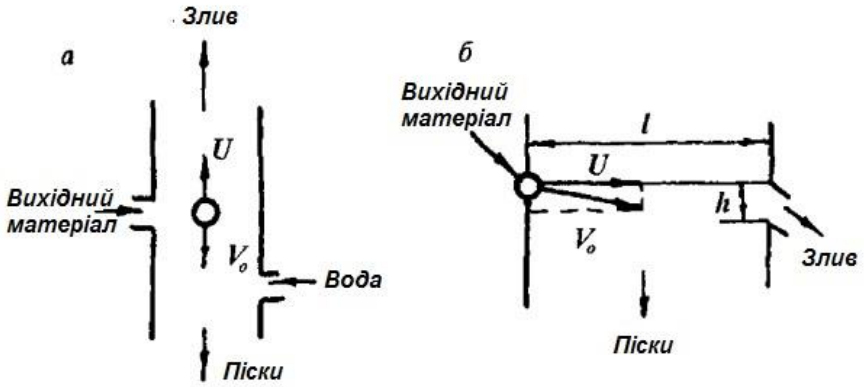

Рисунок 7 – Схема процесу класифікації у східних (а) і горизонтальних (б) потоках.

При розділенні на 2 класи крупний продукт називають *пісками*, а дрібний – *зливом* (при

гідравлічній класифікації) або *тонким продуктом* (при пневматичній класифікації).

Різновидом класифікації є так зване обезшламлювання (виділення класу розміром < 0,05 мм) з попередньо подрібненої мінералогічної (технологічної) проби, метою якого є спрощення проведення фазового мінералогічного аналізу.

Обов'язковими операціями, які включаються до процесу первинної підготовки проб є: *зважування*, яке проводиться після кожного етапу з метою контролю якості проведеної операції; *гомогенізація* (перемішування) з метою рівномірного розподілу речовини та, якщо потрібно, *скорочення* (або вручну – квартування; або за допомогою механічних засобів – дільник Джонса тощо). Типова схема первинної підготовки опорної (технологічної) мінералого-геохімічної проби (ОМГП) наведена на рисунку 8.

1.5 Процеси збагачення (фракціонування) корисних копалин

1.5.1 Гравітаційні методи збагачення

Гравітаційні методи збагачення засновані на відмінностях у щільності, крупності і формі мінералів,

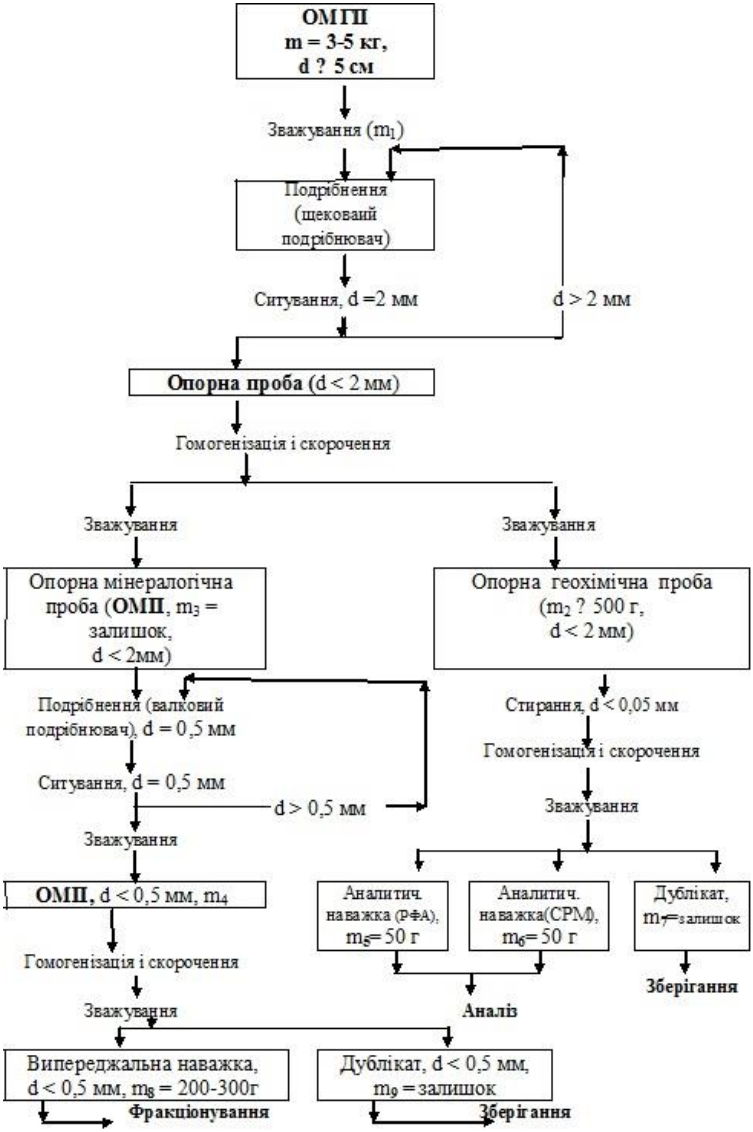

Рисунок 8 - Типова схема первинної підготовки опорної (технологічної) мінералого-геохімічної проби (ОМГП).

що розділяються, які викликають різний характер їх руху в середовищі під дією сил тяжіння або центр обіжних, а також сил супротиву середовища.

В якості гравітаційного збагачення корисних копалин використовуються: вода, повітря, важкі рідини, суспензії і рідкий електроліт. Середовища характеризуються різними реологічними параметрами (щільністю, в'язкістю, стійкістю тощо), які впливають на швидкість переміщення часток, що розділяються та ефективність їх розділення. При класифікації гравітаційних методів збагачення розрізняють наступні процеси збагачення:

а) у важких середовищах, важких суспензіях, аеросуспензіях, магнітних рідинах, електричних полях;

б) в потоках постійного і перемінного напрямку: відсадка, противоточна сепарація і збагачення в центр обіжних концентраторах;

в) в потоках по нахиленій площині: стаціонарних і рухливих механізованих шлюзах, струйних жолобах і концентраторах, винтових сепараторах, орбітальних шлюзах і концентраторах.

1.5.1.1 Збагачення у важких рідинах

Процес збагачення у важких рідинах полягає в розділенні корисних копалин за щільністю в гравітаційному або відцентровому полі, в середовищі,

щільність якого є проміжною між щільностями компонентів, які розділяються. Зрозуміло, що дві частки з різною щільністю можна розділити, занурившиї їх в рідину проміжної щільності. На жаль, більшість мінералів тоне у воді, тому вода не може слугувати роздільним середовищем і замість неї необхідно використовувати інші, більш важкі рідини.

Існує чотири види подібних рідин:

1) *органічні сполуки з галогенами* – наприклад: трибромметан або бромоформ щільністю 2,89 г/см^3 (розчинник – етиловий спирт), тетраброметан щільністю 2,94 г/см^3 (розчинник – ацетон, толуол), трихлоретан щільністю 1,46 г/см^3 (розчинник – етанол), йодистий метилен щільністю 3,2 г/см^3 (розчинник – чотирихлористий вуглець);

2) *водні розчини дуже щільних солей* – наприклад: рідина Клеричі (насичений розчин метану, талію і мелонату талію) щільністю 4,2 г/см^3, солі важких металів: рідина Тулє – 3,2 г/см^3, рідина Рорбаха 3,45 г/см^3. Друга група може реагувати з металами і сульфідами.

3) *водні суспензії тонкоподрібнених твердих речовин*, що не є істиними розчинами – тонко подрібнена завись мінералів або синтетичних речовин (кварцу, магнетиту, феросиліцію, барію, піриту тощо), які називаються суспензоїдами, які повинні бути

недорогими, недефіцитними і не містити шкідливих компонентів, які погіршують якість концентрату;

4) *розплави*: рідка ртуть має щільність 13,6 г/см^3 і може бути використана для відділення самородних металів (золота і платини) від інших мінералів (у випадку швидкого протікання процесу метали не встигають амальгамуватися, а ртуть можна регенерувати пропустивши через шар шамозиту шаруватого силікату заліза); хлориди цинку і свинцю використовують для сепарації часток зі щільністю до 6 г/см^3 (після проведення сепарації розплав солі охолоджується і твердіє, стовпчик солі розколюється посередині – верхня і нижня частини занурюються у воду, сіль швидко розчиняється, а розділені мінерали відфільтровуються окремо).

Більшість органічних рідин дуже дорогі і токсичні: їх неможливо використовувати без визначених мір безпеки.

Щільні солі також потенційно небезпечні для здоров’я і потребують обережного поводження. Перевагою істинних розчинів є те, що їх можна розбавляти відповідними розчинниками і, таким чином, використовувати для розділення часток, що дуже мало відрізняються одна від одної за щільністю.

Суспензії твердих речовин дешеві і безпечні, але їх щільність неможливо виміряти з необхідною

точністю і вони ефективні лише при розділенні грубих мінеральних часток.

Для розділення на легку і важку фракції невеликі порції речовини, що являють собою належним чином відквартовану наважку репрезентативної проби пропускають через важку рідину відомої щільності. Важливо, щоб усі мінеральні зерна достатньо змочилися рідиною і щоб пройшло достатньо часу для сепарації, тобто необхідно дати час зернам з більшою щільністю досягти дна воронки.

Швидкість переміщення часток залежить від:

1) *розмірів часток*: частки більшого розміру тонуть швидко, в той час як дрібним часткам знадобиться не одна хвилина, щоб досягнути дна;

2) *різниці в щільності частки і рідини*: чим більше різниця, тим швидше походить фракціювання;

3) в’язкості рідини, яка у великій мірі залежить від температури.

Необхідно слідкувати, щоб частки, що прилипли до стінок сепаратора в процесі розділення, також потрапили до процесу. Для цього необхідно періодично перемішувати рідину і речовину, що знаходиться у верхній частині воронки.

Якщо щільність часток співпадає або близька до щільності рідини, частки будуть зависати в ній. Тому, після відділення важкої фракції, її збирають окремо.

Важку і легку фракції зливають з воронки окремо на фільтрувальний папір або, в деяких випадках на натуральний шовк. Рідина знов фільтрується, після чого її можна використати знову.

Важку і легку фракції, окремо одна від одної промиваються відповідним розчинником для видалення важкої рідини, яку можна потім відновити.

При дуже маленьких розмірах часток ($100<n < 10$ мкм) – швидкість розділення може бути дуже малою. В цьому випадку розділення можна прискорити центрифугуванням.

Слід сказати, що при деяких специфічних завданнях щільність рідини можна підвищити завдяки „спеціальним” добавкам:

Усі рідини, що використовуються для сепарації дуже дорого коштують і потенційно шкідливі, тому відпрацьовані рідини необхідно, по можливості, регенерувати.

При промисловому збагаченні матеріал із зернами, що більші за 3 мм проводиться у статичних умовах. В якості сепараторів застосовують апарати з дрібною ванною при обмеженому об’ємі рідини, що циркулює. Для збагачення дрібних класів використовують центробіжні сепаратори, гідроциклони і центрифуги (рис. 9). Важка рідина відокремлюється від продуктів збагачення, регенерується і повторно використовується

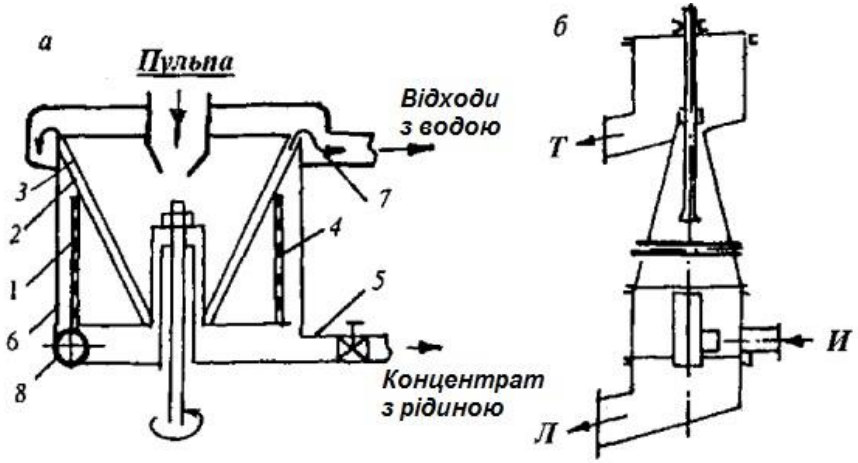

Рисунок 9 – Схеми центр обіжного сепаратора (а) і вихрового гідро циклону (б): И – живлення; Т – важка фракція; Л – легка фракція.

1.5.1.2 Збагачення в потоках постійного і перемінного напрямку

Збагачення здійснюється в полі сил тяжіння і гідро- або аеродинамічної дії середовища. Збагачення здійснюється в вертикальних потоках перемінного напрямку одержало назву *відсадка*, в горизонтальних, наклонних і вертикальних потоках постійного напрямку – противоточною сепарацією і в потоках високої інтенсивності – збагаченням в центр обіжних концентраторах.

Відсадка заснована на різниці швидкостей руху мінеральних зерен в пульсуючому середовищі розділення, в якості якої використовується вода або

повітря.

Гідравлічною відсадкою називають процес гідравлічного збагачення в вертикальному пульсуючому потоці рідини (рис. 10).

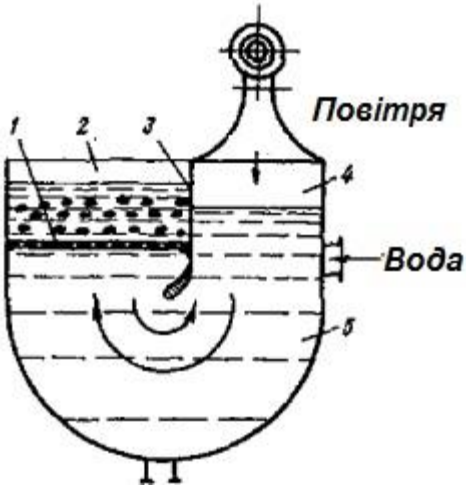

Рисунок 10 – Принципова схема відсадочної машини: 1 – нерухоме решето; 2 – відсадочне відділеня; 3 – перегородка; 4 – повітряне відділення; 5 – зварний корпус.

У відсадочному відділенні закріплюється нерухоме решето, на яке завантажується вихідний матеріал. Повітряне відділення слугує для створення рухів коливання в машині шляхом періодичного впуску стисненого повітря у повітряне відділення і випуску його. Під час роботи машина заповнена водою. Оскільки обидва відділення сполучаються між собою, під час впуску повітря у повітряне відділення вода прямує вверх в робоче відділення через отвори в решеті. В цей час матеріал, що лежить на решеті

підвладний дії східного струму води. При випуску повітря з повітряного відділення вода прямує зайняти вихідне положення, і на матеріал починає діяти низхідний струм води.

В результаті дії перемінних за напрямком струменів води відбувається розділення матеріалу, що збагачується на: важкий продукт, який концентрується в нижніх шарах постілі (нижній шар речовини) і легкий продукт, який піднімається у верхні шари. *Постіллю* називається вся маса, що лежить на решеті. Шаром називають частину постілі, яка складається з часток майже однієї щільності.

Нижні шари постілі, які складаються з важких дрібних продуктів, видаляються з машини через решето, а крупні через розгрузочні щілини, якими закінчуються кожна сходинка машини. Верхні шари разом з водою переливаються через поріг.

Ефективність відсадки тим більша, чим зерна є більш крупними. Тому відсадка одержала широке розповсюдження при збагаченні крупно- та середньо вкраплених, наприклад залізних і марганцевих руд, які не потребують тонкого подрібнення, а також корисних копалин, компоненти яких значно відрізняються за щільністю (вугілля, піски розсипних родовищ). Зі зменшенням крупності матеріалу точність розділення часток за щільністю погіршується.

1.5.1.3 Збагачення в потоках на нахиленій площині.

Їх називають ще гравітаційними. Використовують їх для розділення мінералів, щільності яких суттєво розрізняються. Їх використання особливо вигідні, коли щільності мінералів перевищують щільності важких рідин.

У цьому випадку сепарація частіше проходить у воді. При необхідності одночасно можна розділити великі кількості матеріалу.

Наскільки легко можна провести розділення гравітаційним методом демонструє, так званий, гравітаційний концентраційний критерій, який є відношенням „ефективних” щільностей різних мінеральних часток, занурених у роздільне середовище:

$$k=(D_h-D_f)/(D_l-D_f),$$

де D_h – щільність більш щільного мінерала; D_f - щільність рідини (вода, важка рідина ,а іноді і повітря); D_l - щільність менш щільного мінералу.

У випадку, якщо k для двох груп часток більше 2,5, фракціонування пройде без утруднень і може проводитись у великому інтервалі розмірів часток; якщо ця величина менша за 1,25, важко чекати дуже якісного результату. Тобто, чим вища щільність роздільної рідини (навіть до щільності найменш

щільного матеріалу), тим більшим буде *k*. Коли ж щільність рідини буде вищою щільності менш щільного матеріалу сепарація пройде за методом важких рідин. Наприклад: кварц (2,65 г/см^3) - алмаз (3,5 г/см^3) у воді *k* =1,5; те ж у трихлоретані (1,4 г/см^3) *k* = 1,7, а у повітрі *k* = 1,3.

Збагачення здійснюється на спеціальних концентраційних столах у тонкому шарі рідини (рис. 11), що стікає по нахиленій площині, на якій набиті вузькі планки (рифлі), розташовані по видовженій його стороні (їх довжина зменшується в сторону загрузочного лотка.

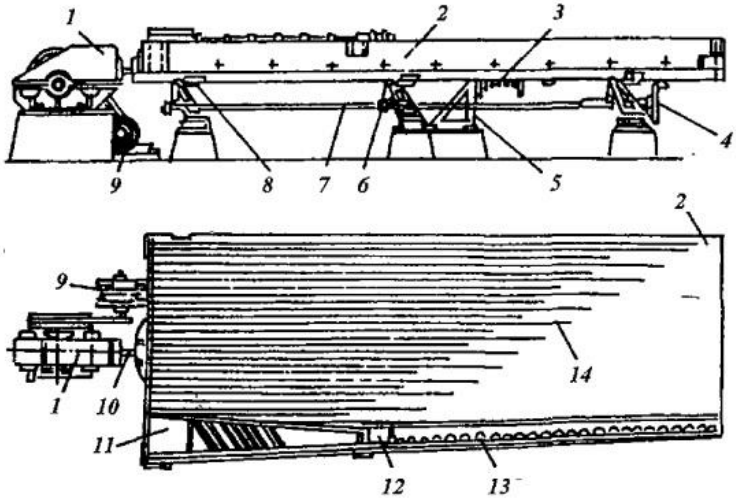

Рисунок 11 – Схема концентраційного стола: 1 – ричажно-ексцентриковий механізм; 2 – Дека концентраційного столу; 3 – пружина між кронштейном і упором деки; 4 - маховик; 5 - кронштейн; 6 – колінчасті важілі; 7 – тяга; 8 –

роліки; 9 – електродвигун; 10 – тягя; 11 – загрузочний лоток; 12 – лоток; 13 – вертушка; 14 - рифлі

Поверхня деки покрита лінолеумом, резиною або пластиком. Кожне зерно на деці столу підвладна одночасній дії двох сил: гідравлічному тиску змивної води, що тече поперек деки і інерції, що виникає при зворотно-поступальному русі деки і направленої уздовж деки стола. При русі деки вперед з поступовим зростанням швидкості весь матеріал, що знаходиться на деку переміщується разом з ним до кінця переднього руху.

Більш швидкий хід деки назад приводить до появи сили тертя об поверхню деки і руху їх по деці уздовж рейок. При цьому швидкість руху важких і легких зерен буде неоднаковою. Зерна більшої щільності, що мають більшу інерцію, будуть переміщуватись швидше, ніж менш інерційні зерна меншої щільності. Змивна вода, навпаки, з більшою силою буде діяти на зерна легких мінералів, оскільки при одній і тій же масі часток легких і важких мінералів площа поперечного перерізу, яка визначає силу гідравлічного тиску змивної води у часток легкого мінерала буде більшою, ніж у важкого, тому і швидкість переміщення поперек деки зерен легкого мінералу буде більшою швидкості переміщення зерен важких мінералів. В результаті цих

явищ на деці столу утворюється віяло зерен різної щільності, що розходиться від місця завантаження (рис 12). В найбільш віддаленій від приводу зоні концентруються зерна найбільш важких мінералів (важка фракція), ближче до приводу – зерна найбільш легких мінералів (легка фракція), між ними – зерна мінералів з проміжною щільністю або зростки важких і легких мінералів (промпродукт).

Розділенню зерен сприяють рифлі, між якими матеріал піддається не тільки розшаруванню за щільністю, але і сегрегації. В нижній частині шару концентруються дрібні зерна важких мінералів, над ними – крупні зерна важких мінералів, далі - дрібні зерна легких мінералів, ще вище – крупні зерна легких мінералів.

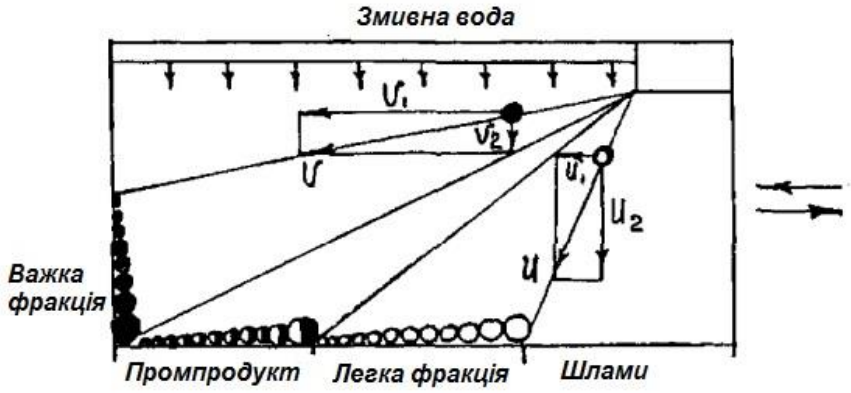

Рисунок 12 – Схема розділення зерен за щільністю на деці концентраційного стола: V, V_1,V_2 – швидкості руху питомо-важких зерен; U, U_1, U_2 - швидкості руху питомо-легких зерен

Шламисті частки видаляються змивною водою на початку дека.

Крім того округлі зерна при цьому будуть переміщуватись ще скоріше. Тому перевагою тут буде сорозмірність часток.

1.5.1.4 Збагачення за допомогою флотації.

У тому випадку, коли щільності двох мінералів рівні, можна провести фракціонування, якщо знизити ефективну щільність одного з них за рахунок приєднання до нього бульок повітря. Така процедура називається флотацією і широко використовується промисловістю для розділення мінералів.

Більшість мінералів проявляють гідрофільність, тобто легко змочуються водою. Невелика кількість мінералів є, навпаки, гідрофобними (графіт, молібденіт тощо).

Якщо пропустити бульки повітря крізь суміш гідрофобних і гідрофільних мінералів, що знаходяться у воді у вигляді зависі, то гідрофобні мінерали будуть захоплювати бульки повітря, причому сумарна щільність частки стане меншою. Така частка спливе і буде видалена із системи. Гідрофільні частки (якщо їх щільність вища за щільність води, потонуть і залишаться на дні контейнера.

Якщо ж суміш складається лише з гідрофільних

мінералів, можливо за допомогою хімічних параметрів середовища (за допомогою флотаційних реагентів) створити для частини мінералів, що входять у суміш, специфічне (водовідщтовхуюче) покриття. Для флотації сульфідних мінералів використовують ксантогенати калію і натрію разом з піноутворювачем – сосновим маслом). Для флотації не сульфідних мінералів використовують жирнокислі реагенти. Для підвищення селективності флотації використовують різні реагенти-активатори та регулятори pH. Реагент ний режим – головний фактор, що визначає результати флотації. Для ефективної дії реагентів важлива їх кількість, порядок вводу до пульпи, а також протяжність контакту. Після чого сепарація проводиться за описаною схемою. Наприклад, сульфіди звичайно гідрофільні, але для них дуже легко створити середовище, що зробить їх гідрофобними, на відміну від породоутворюючих силікатів. Так само можна розділити сульфіди один від одного. В кожному окремому випадку необхідне уточнення рекомендованих режимів для флотаційного розділення, тому це завдання, як правило, виконується при участі спеціалістів-збагачувачів.

Краще за все такий метод працює при розмірах часток 0,02-0,3 мм.

За один раз можна пропустити від декількох

грамів до 1 кг речовини в залежності від флотаційних пристроїв (рис.13), що використовуються. Звичайно, найкращий результат можна одержати при повному розкритті мінеральних зерен.

Рисунок 13 – Схема флотаційної колонки Microcel.

1.5.2 Збагачення мінералів за тертям і формою

Деякі мінерали можна розділити, користуючись різницею у коефіцієнті тертя, формі та здатності до трибоелектризації (зарядження при терті).

Процес розділення проходить на нахиленій площині, що розгойдується сухим способом (рис.14).

Частіше цей спосіб використовують для виділення

волокнистих та пластинчастих мінералів (азбесту, слюд. Розділяється, як правило матеріал крупністю від 0,5 до 0,04 мм.

Але зараз сконструйований сепаратор тертя. До комплекту сепаратора входять чотири змінні деки з різним покриттям (з алюмінію, лінолеуму, ватману та кальки.) Робоча поверхня деки має розміри 400×500 мм. Головними факторами, що регулюють хід сепарації: матеріал покриття, кути нахилу деки та частота коливань. Оптимальні значення визначаються експериментально.

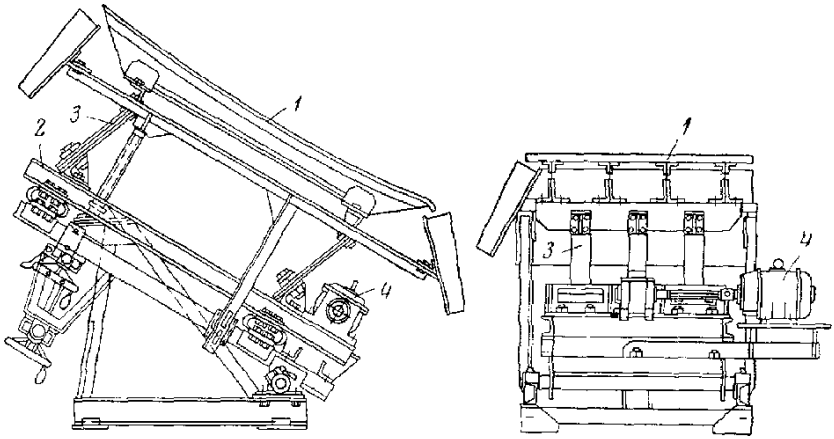

Рисунок 14 - Вібраційний сепаратор для сухого збагачення руди за тертям: 1 – дека сепаратора з рамою; 2 – нижня рама; 3 – пружинні опори; 4 – привод.

Сепаратор повинен бути відрегульований так, щоб покриття мінеральними зернами було моношаровим у вигляді віяла часток, які переміщуються за різними

траєкторіями.

Наприклад, необхідно розділити пірит у вигляді пентагондодекаедрів і арсенопірит у вигляді витягнутих призматичних зерен. Коефіцієнт тертя об кальку зерен піриту незначний, вони практично не заряджаються і скочуються по нахиленій площині вниз. Коефіцієнт тертя арсенопіриту значно більший, тому при пересуванні зерна арсенопіриту набувають електричного заряду, який протилежний за знаком заряду, що виникає на поверхні кальки і тому притягуються до поверхні деки. Таким чином арсенопірит і пірит розділені. Так легко розділяються суміші гранату і актиноліту, апатиту і циркону, кварцу і біотиту, турмаліну і епідоту тощо. Причому кожна фракція, зазвичай, складається з 97-99% очікуваного мінералу. Таким чином рекомендовано розділяти пари мінералів, для яких є неефективним розділення за щільністю, магнітним та іншим властивостям. Крім того ця методика дозволяє кількісно оцінювати форми часток при досліджені матеріалів розсипів.

1.5.3 Збагачення мінералів за магнітними властивостями

Магнітна і електромагнітна сепарація заснована на різниці у магнітній сприйнятливості мінералів і здійснюється у неоднорідному магнітному полі,

створеному постійними магнітами або електромагнітами. Питома магнітна сприятливість (X) - це відношення магнітної сприятливості (x) до щільності (p): $X=x/p$.

Сепарація часток мінералів за магнітною сприятливістю можлива лише в неоднорідному магнітному полі, де напруженість непостійна і змінюється у визначеному напрямку. Частки в неоднорідному магнітному полі або притягуються (якщо $X>0$) або відштовхуються ($X<0$) в напрямку зростання напруженості поля.

Магнітна сприйнятливість більшої частини найбільш розповсюджених мінералів завдяки дуже дрібних включень інших мінералів, в тому числі феромагнітних, може коливатися в дуже широких межах.

Можна розділити мінерали на 3 категорій:

1. Сильно магнітні. До них входять ферро- і феррімагнітні мінерали – магнетит, магеміт, титаномагнетит, піротин.

2. Середньо магнітні. Такі. Що притягаються до електромагніту. Питома магнітна сприйнятливість їх коливає від 300 до1 (окисли, гідроокисли заліза і марганцю, ільменіт, вольфраміт, гранат, біотит тощо.

3. Немагнітні. Такі, що не притягуються електромагнітом, тобто пара- ($X<1$) та діамагнітні

(X<0) – кварц, польовий шпат, кальцит, каситерит, апатит та цинк, мідь, срібло, відповідно.

В свою чергу середньомагнітну фракцію (при лабораторних дослідженнях), традиційно, для полегшення діагностики і обмеження кількості мінеральних фаз додатково розділяють на 3 електромагнітні фракції з (X від 300 до 50; від 50 до 15; від 15 до 1).

В мінералогічній практиці для розділення мінералів за їх магнітними властивостями використовують: ручні постійні магніти; електромагніти; електромагнітні сепаратори.

Для розділення зернистого матеріалу використовують як ручні магніти (у випадку лабораторних досліджень) так і магнітні та електромагнітні сепаратори різної конструкції:

Чим більше розрізняються мінерали за величиною магнітної сприйнятливості, тим легше здійснюється їх розділення в магнітному полі. Середовищем розділення мінералів може бути вода і повітря. У відповідності з цим процес називається мокрою або сухою магнітною сепарацією. Розділення мінералів здійснюється в робочій зоні магнітних сепараторів (рис. 15). Магнітні частки під дією магнітного поля притягуються до поверхні робочого механізму і виносяться за межі дії магнітних сил, де

розвантажуються в прийомники для магнітного продукту.

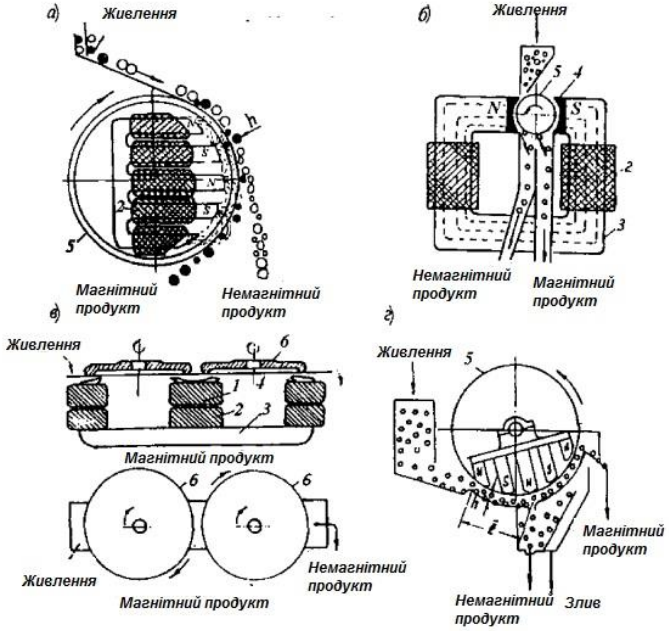

Рисунок 15 – Відкриті (а, г) і замкнені (б, в) магнітні системи: 1 – сердечник; 2 – обмотка, 3 – магнітопровід; 4 – полюсний наконечник; 5 – барабан.

Немагнітні частки зісковзують під дією відцентрових сил і сил тяжіння по поверхні робочого пристрою, полюсного наконечника, лотка і розвантажуються в приймачі для немагнітного продукту.

В робочій зоні сепаратора розрізняють зону тяжіння магнітних часток, висота якої визначається мінімальною відстанню між робочим механізмом і

поверхнею віброкотку і зону транспортування магнітного продукту до місця розвантаження його від механічно захоплених немагнітних часток. Магнітне поле в робочій зоні сепаратора створюється системою з постійних магнітів або електромагнітними системами з обмоткою, що живиться постійним або перемінним током, який викликає утворення постійного або перемінного магнітного поля.

1.5.4 Збагачення мінералів за електричними властивостями

Електричні методи збагачення засновані на різних електричних властивостях мінералів, які розділяються. Розрізняючись за електропровідністю, діелектричній проникності, контактному потенціалу, п’єзоелектричному ефекту, вони набувають при зарядці різну величину або знак заряду і, як наслідок, різну траєкторію руху в електричному полі, забезпечуючи розділення часток за їх електричними властивостями або електричну сепарацію мінералів.

Зарядка часток матеріалу може здійснюватись в електричному полі коронного заряду, електризацією тертям, зміненням температури, тиску та іншими засобами. Вибором засобу зарядки часток забезпечується різниця в електричних властивостях головних мінералів, що розділяються і, тим самим,

максимальна ефективність електричної сепарації.

Розділення мінералів за електропровідністю проводиться у повітряному середовищі в неоднорідному електричному полі постійної полярності в електричних, коронно-електричних і коронно-електростатичних сепараторах переважно барабанного типу.

В *електростатичних сепараторах* (рис. 16) вихідний матеріал подається на заряджений барабан, що обертається.

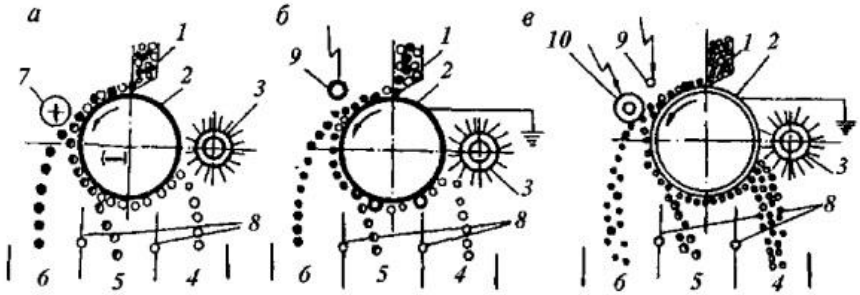

Рисунок 16 - Схеми електростатичного (а), коронно-електричного (б), коронно-електростатичного (в)сепараторів.

При контакті з ним частки мінералів-провідників одразу ж набувають одноіменний заряд, відштовхуються від нього під дією кулонівських сил і, рухаючись за криволінійною траєкторією, попадають в приймач 6. Частки непровідних мінералів, навпаки, налипають на поверхню барабану і зчищаються з нього щіткою 3 в приймач. Частки проміжної

електропровідності і зростки падають в приймач 5.Якість продуктів регулюють положенням шиберів 8. Для підвищення відхилення часток мінералів-провідників та покращення селективності сепарації паралельно барабану встановлюється відхиляючий електрод 7 протилежної полярності.

При сепарації в *коронно-електричних сепараторах* матеріал поступає на металічний заземлений барабан – електрод, що осаджує 2 – і транспортується їм до зони дії коронуючого електроду 9, встановленого паралельно електроду, що осаджує. Навкруг електроду утворюється поле коронного розряду, що викликають іонізацію молекул повітря. Іони заряджають частки. Частки-провідники передають свій заряд електроду і відцентровою силою одразу ж скидаються в приймач 6. Непровідні мінерали розряджаються повільно і виносяться при обертанні барабану з зони дії коронуючого електроду і зчищуються щіткою 3 в приймач 4, частки з проміжною провідністю попадають в приймач 5.

Коронно-електростатичні сепаратори відрізняються від коронно-електричних наявністю додаткового циліндричного електроду, що видхиляє 10, який має однаковий з коронуючим електродом 9 потенціал, що приводить до створення паралельно з полем коронного розряду нерівномірного

електростатичного поля високої напруги.

Піроелектрична сепарація заснована на властивості групи мінералів (турмаліну, каламіну тощо) поляризуватися при нагріві і охолодженні через різні коефіцієнти теплового розширення їх по різним вісям кристалів. Неоднакові напруги, що виникають в кристалах, викликають утворення локальних різнойменних зарядів на протилежних кінцях кристалу. Якщо один з мінералів володіє здатністю до піроелектричної поляризації, то при різкому температурному перепаді він одержує електричний заряд, а інші мінерали залишаються незарядженими.

1.5.5 Збагачення за формою

Збагачення за формою використовує різницю у формі часток мінералів та руд обумовлені генезисом їх утворення, кристалохімічними і фізичними властивостями мінералів.

Для видвлення часток пластинчатої і подовженої форми може бути використано грохочення на спеціальних або профілірованих поверхнях (рис. 17). Для виділення пластин слюд через щілину необхідна їх орієнтація перпендикулярно або нахилено до поверхні просіювання, що досягається застосуванням поверхні просіювання з кутків, часто з вертикальними перегородками. Іноді, навпаки, пласкі часки

утримуються.

Рисунок 17 – Схеми сепараторів для збагачення за формою: а – дахоподібного грохота; б – дахоподібного грохота з вертикальними перегородками;в – барабанного грохота з утриманням часток плаского форми за рахунок розрядження.

1.5.6 Збагачення за пружністю

Збагачення засноване на різниці траєкторій, за якими відкидаються частки мінералів, що мають різну пружність, при падінні на площину. Оскільки найбільша різниця спостерігається в середовищі з малою в’язкістю і щільністю, то процес збагачення за пружністю здійснюється в повітряному середовищі. Найчастіше такий спосіб застосовується при збагаченні будівельних матеріалів (щебеня, гравію), пружність зерен яких тісно пов’язані.

Різниця в швидкостях і висоті відскоку зерен

різної пружності при прямому центральному ударі їх про поверхню використовуються у вібраційному сепараторі (рис.18), що представляє собою трисекційний короб, дно центральної частини якого виконано з пружної сітки, що вібрує. При подачі живлення на неї шматки 2, які мають велику пружність, підскакують до куткового тримача 1 і, відображаючись від нього, попадають в приймач 4. Куски 3, що мають малу пружність, піднімаються на меншу висоту і, не досягаючи куткового тримача 1, залишаються в центральній секції.

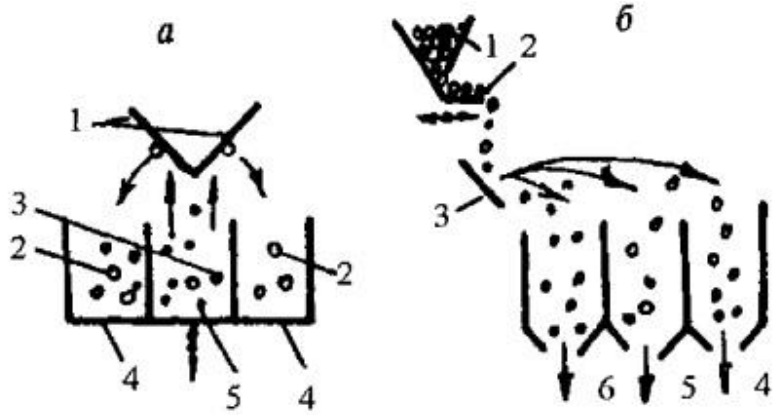

Рисунок 18 – Схеми вібраційних сепараторів: з рухливою робочою поверхнею(а) і сепаратора з нерухливою робочою поверхнею(б) для збагачення за пружністю.

Для збагачення за пружністю застосовують також сепаратори з нахиленою стальною плитою, на яку матеріал з бункера 1 подають віброживичем 2

моношаром. Падаючи на плиту, більш пружні частки відображаються від неї під великим кутом з великою швидкістю і попадають в приймач концентрату 4, а пенш пружні і менш прочні відображаються незначно і попадають в приймачі промпродукту 5 або відходів 6.

1.5.7 Збагачення хімічними методами

З хімічних процесів найчастіше використовуються вилуговування, осадження, сорбція і екстракція. Застосування комбінованих схем дозволяє залучити в переробку мінеральну сировину, яка не піддається збагаченню звичайними методами, а також різко підвищити комплексність її використання. Найбільш перспективним є використання комбінованих схем при вилученні з руд міді, молібдену, свинцю, ніобію. заліза, алюмінію, золота, урану та інших металів.

Процес вилуговування представляє собою операцію селективного розчинення одного або декількох компонентів. В якості розчинника використовуються, в залежності від природи мінералів, кислота (сірчана тощо), луги (їдкий натр, сода) або комплексоутворюючі реагенти (цианід, аміак або солі амонію тощо). Вилучення металів в розчин при цьому може бути 98-99% при незначному розчинені (3-5%) супутніх мінералів.

Виділення металів з розчинів проводиться

осадженням, сорбцією на іонообмінних смолах і екстракцією органічними рідинами.

1.5.8 Виділення мономінеральних фракцій

Вибір методу одержання мономінеральних фракцій при лабораторних дослідженнях залежить від складу руди, крупності мінералів, з яких вона складається, характеру їх зростань, наявності взаємних включень і вкрапленості інших мінералів, контрастності або близькості їх фізичних властивостей тощо.

Для крупнозернистого матеріалу застосовують візуально-ручний метод відбору мономінеральних фракцій під бінокулярною лупою. Однак продуктивність цього методу є досить низькою.

Найбільш розповсюдженими є методи одержання мономінеральних фракцій, засновані на різниці (контрастності) фізичних властивостей мінералів, що розділяються.

За щільністю мінерали, зазвичай, розділяють у важких рідинах за допомогою спеціальних дільних воронок або центрифуг (для тонко дисперсного матеріалу) описаним вище способом. Щільність рідини підбирається в залежності від щільності тих мінералів, які потребують розділення. Послідовне застосування підібраних за щільністю рідин дозволяє одержати

чистий моно мінеральний концентрат.

Магнітогідростатична сепарація з метою виділення мономінеральної фракції здійснюються в електромагнітних сепараторах, де використовуються штучно обважені парамагнітні рідини (розчини MnCl, $MnBr_2$) і можливим є розділення немагнітних мінералів щільністю 2500-7500 г/см^3. В залежності від щільності мінералу, який виділяється, змінюються параметри роботи сепаратора.

Для виділення парамагнітних мінералів застосовується магнітна сепарація. Або за допомогою ручного магніту (магніт Сочнєва), який має чотири класи інтенсивності магнітного поля, або за допомогою магнітного сепаратора.

Мінерали з близькою магнітною сприйнятливостю можливо виділяти за допомогою електромагнітних сепараторів сухим способом, підібравши необхідні параметри магнітного поля.

Електричні сепаратори застосовують при розділенні сумішей сухих мінеральних компонентів. Ефективність такого способу розділення залежить від стану поверхні. Він використовується при крупності часток матеріалу не менше 0,1-0,2 мм. Перед сепарацією відмивають шлами, видаляють (у випадку їх наявності) плівки окиснення з поверхні зерен, просушують пробу.

Може бути застосоване також *хімічне доведення* мономінеральних фракцій у випадку дуже тісних і тонких взаємних проростань мінералів, які потребують розділення. Цей засіб концентрування заснований на вибірковому розчиненні хімічними реактивами (органічні кислоти, соди, луги тощо) супутніх мінералів (кальцит, малахіт, сфалерит піротин тощо) і хімічній інертності мінералу, що концентрується (золото, платино їди, каситерит, кварц тощо).

1.6 Фазовий аналіз мінеральної речовини

Однією з найважливіших характеристик гірських порід, руд і продуктів їх переділу, що визначає їх якість і технологічні властивості є *фазовий склад*. Він представляє собою співвідношення мінеральних форм (в масових частках).

Задачі фазового аналізу:

визначення форм проявлення корисного компоненту в руді, тобто чи утворює він власні мінерали або входить до складу породоутворюючих та акцесорних мінералів в якості: ізоморфної домішки, емульсійної вкрапленості, сорбований на дефектах поверхні мінеральних часток тощо;

діагностика мінерального виду, що містить корисний компонент (власного або мінералу-носія);

якісний фазовий аналіз проби або визначення мінеральних фаз, що містяться в пробі; визначення мінеральної асоціації в руді або технічному продукті;

кількісний фазовий аналіз, який визначає співвідношення між рудними компонентами та компонентами, які з ними асоціюють.

Фазовий аналіз – основа технологічної оцінки якості руд і обґрунтування технології її переділу. Для цього в першу чергу необхідною є оцінка форми знаходження в руді корисного компоненту, яка визначається характером зв'язку рудного компоненту з мінеральною матрицею, що дозволяє оцінити шляхи його можливого вилучення. Діагностика мінеральної форми корисного компоненту дозволяє одержати інформацію про фізичні властивості рудного мінералу і, звідси, про його поведінку в процесі збагачення. На цю поведінку здійснює вплив і загальна мінеральна асоціація. Так, присутність в руді шаруватих силікатів або інших мінералів із цілком досконалою спайністю (графіт, тальк тощо) ускладнює процес флотації. Інформація щодо повного мінерального складу руди необхідна не тільки для урахування взаємного впливу мінеральних фаз в процесі переробки руди, але і важлива при вирішенні завдань створення безвідходних технологій з повною утилізацією мінеральної сировини. Для повного фазового аналізу

мінеральної сировини застосовують методи оптичної мікроскопії, рентгенівської дифрактометрії, інфрачервоної спектроскопії (в меншій мірі), які дозволяють виявляти та діагностувати майже всі присутні в пробі фази і оцінювати їх міст. Інші методи (хімічний фазовий аналіз, термічний аналіз, люмінесцентний аналіз, магнітометрія тощо) фазового аналізу вирішують окремі завдання.

1.6.1 Оптична мікроскопія

1.6.1.1 Мінералогічний аналіз

Мікроскопічні дослідження є найбільш доступними і тому їх широко використовують для фазового аналізу. Саме з цього методу зазвичай починають фазовий аналіз будь-якої мінеральної сировини. Метод включає в себе аналіз кернового матеріалу, шліхів і протолочок (штучних шліхів) під бінокулярною лупою, діагностику мінеральних фаз за допомогою фізичних (в тому числі оптичних) характеристик.

Фазовий мінералогічний аналіз проводять на шліхах (концентратах важких мінералів, одержаний при промивці водою матеріалу, відібраного з рихлих порід) і протолочках (концентратах важких мінералів, одержаний при промивці водою подрібненої породи

або руди).

Шліхи і протолочки готують виділенням важкої фракції з матеріалу проби шляхом або промивки у воді (шліхи), або розділенням у важких рідинах (протолочки). Метод дуже чутливий, оскільки дозволяє діагностику навіть поодиноких в пробі зерен мінеральних фаз. Чутливість методу підвищується шляхом підвищення об'єму аналізованого матеріалу.

Типізація видів мінералогічного аналізу заснована на двох головних ознаках: повноті аналізу у діагностичному відношенні і точності кількісних оцінок вмісту мінералів у пробі.

Розрізняють аналізи: неповні, повні і детальні:

Неповні аналізи на деякі корисні мінерали і мінерали-супутники корисних мінералів (піроп, пікроільменіт, турмалін, хроміт тощо) використовуються при пошуково-розвідувальних і пошукових роботах. Крім того, неповні аналізи проводяться при вивченні розвідувальних проб і продуктів збагачення з метою контролю цих процесів.

*Повні аналізи***.** Визначаються усі присутні мінерали, але допускається встановлення лише групи (група гранатів, піроксенів, карбонатів тощо) без визначення положення мінералів у ізоморфних рядах.

Детальні аналізи. Визначаються усі присутні мінерали, в тому числі встановлюється положення

кожного мінералу в ізоморфних рядах. Особливе значення в межах груп мають ті мінерали, що вказують на визначені рудоносні комплекси: скарни (Ca і Ca-Fe гранати – гросуляр і андрадит), лужні комплекси (лужні піроксени та амфіболи – егірин, жадеїт, рибекіт, арфведсоніт), рідкіснометальні пегматити (колумбіт-танталіт, поліхромні турмаліни, сподумен, каситерит), кімберлітові трубки (піроп, що містить Cr та пікроільменіт).

Детальні дослідження супроводжуються більш детальними і систематизованими описами мінералів, особливо тих ознак і властивостей, що вказують на певні умови утворення.

За ступенем точності і засобам визначення концентрацій мінералів також виділяють три групи аналізів:

Напівкількісні аналізи. Цей вид аналізу полягає у візуальному визначенні вмісту мінералів. Усі фракції проглядаються під бінокуляром, проводиться діагностика усіх мінералів і дається візуальна оцінка вмісту мінералів у кожній фракції, підраховуються приблизні концентрації мінералів на шліх, складаються таблиці. Такі аналізи використовуються при геологічних зйомках, що не орієнтовані на пошуки визначених типів корисних копалин.

Напівкількісні аналізи з підвищеною точністю

визначення корисних мінералів. Передбачає додаткові операції фракціонування з метою сконцентрувати у фракції не менше 70% корисних мінералів, що містяться у шліху. У цьому випадку визначення вмісту мінералу у пробі досягає необхідної точності. В інших фракціях цих корисних мінералів повинно залишитися не більше 10-15 % від загальної кількості.

Такі аналізи використовуються при пошукових роботах, що орієнтовані на пошуки визначених корисних копалин) – Au, Pt, Ta-Nb, вольфраміту, каситериту тощо.

Кількісні аналізи. Відомо декілька варіантів кількісного мінералогічного аналізу:

Варіант *відбору і зважування* –використовується лише у випадку невеликих фракцій.

Варіант *підрахунку зерен* усіх присутніх мінералів після дробного розсіву на 8-10 гранулометричних фракцій. Метод достатньо точний, але при цьому не враховується форма зерен.

Статистично-ваговий метод Н.В.Іванова. В кожній з гранулометричних фракцій визначається середня маса зерна кожного мінералу шляхом одержання середнього арифметичного маси великої кількості зерен (не менше 1000).

Оптико-геометричний метод

Аналіз здійснюється за допомогою

поляризаційного мікроскопу у шліфах та аншліфах. Аналіз заснований на підрахунку площі, яку займає в стандартному шліфі або аншліфі кожна мінеральна фаза. При цьому надійні дані можуть бути одержані дослідженням і подальшою обробкою експериментально одержаних результатів по серіям з 20-25 шліфів по кожній пробі, що робить цей метод досить трудоємним.

1.6.2 Додаткові методи діагностики

1.6.2.1 Імерсійні методи вивчення мінеральної речовини.

Імерсійний метод в геології використовується для діагностики окремих мінералів та уточнення складу членів ізоморфних рядів.

Суть його полягає в тому, що досліджувані мінерали чи їх суміш занурюються в імерсійну рідину, в якій вивчаються їх кристалооптичні характеристики та визначаються показники заломлення способом добору рідини з тотожним чи дуже близьким показником. Стандартний набір імерсійних рідин складається з 98 флаконів рідин з показниками заломлення (n) від 1,408 до 1,780. Вихідними рідинами є легкі прогони нафти та фракція керосину, яка кипить при t -220-240^0 C (n – 1.408-1.440), рідина альфа-

монохлорнафталіну (n – 1,633), йодистий метилен (n – 1,74), насичений розчин сірки в йодистому метилені (n – 1,78). Проміжний склад одержують шляхом змішування в різних пропорціях вихідних рідин. В ампули йодистого метилену, аби останній не темнів з часом, і щоб пов'язати йод, що виділяється, поміщена мідна стружка.

Для вимірів показників заломлення мінералів з n > 1,78 використовують високо заломлюючі рідини, які складаються з 10% розчину сірки в $AsBr_3$ (n – 1.81), розчину сірки та AsS_2 у три бромистому миш'яку (n – 2,02) та розчину селену та AsS_2 у $AsBr_3$ (n – 2,11). Проміжні рідини одержують розбавленням цих рідин йодистим метиленом.

Показник заломлення імерсійних рідин помітно змінюється при зміненні їх температур. Він знижується при підвищенні температури та підвищується при її зниженні. Величина, яка показує, на скільки знизився показник заломлення рідини при підвищенні температури на 1^0C називається *температурним коефіцієнтом.* Для рідини стандартного набору він дорівнює 0,0005, тобто на кожні 2^0C змінення температури показник заломлення змінюється на 0,001.

Визначення показника заломлення рідини здійснюється за допомогою рефрактометра.

Для виготовлення імерсійного препарату з

мінерального використовується порошок з оптимальним розміром часток 0,2 мм. Для цього зерна мінералу розтрощуються між двома предметними скельцями. Щоб приготувати препарат із незакріпленими зернами, в краплю імерсійної рідини, що нанесена на предметне скло, треба обмакнути кінчик препарувальної голки, після чого, захопивши ним 20-30 зерен мінералу, рівномірно розмістити їх в об'ємі краплі. Краплю покривають покривним склом 0,5 на 0,5 см, а надлишок рідини витягнути фільтрувальним папером.

Для препарування із закріпленими зернами наносять на предметне скло краплю 0,1-0,3% розчину солі чи желатину. В краплю вносять необхідну кількість мінералу, підсушують, покривають покривним склом. Після чого підносять до краю скла імерсійну рідину, яка капілярними силами втягується під скло.

Вивчення особливостей прояву спайності мінералів в імерсійних рідинах:

1. Якщо мінерал не має спайності. Форма зерен різноманітна, осколкова, гострокутна з раковистим зламом. У різних зернах спостерігаються різноманітні коноскопічні фігури. Інтерференційне забарвлення в межах зерен неоднорідне і підвищується з потовщенням зерен.

2. Мінерал має одну „дуже досконалу” спайність. Контури зерен у препараті будуть неправильними, а зерна, закономірно оптично орієнтовані, характеризуються однаковими коноскопічними фігурами, двозаломленням та рівномірним інтерференційним забарвленням. При „досконалій” спайності не всі зерна орієнтуються в препараті однаково. З’являються уламки скісного напрямку.

3. У мінералі проявлена спайність у двох напрямках. Уламки лягають на одну з цих площин. А друга проявлена в тому, що в обрисах уламків із двох боків з’являються прямі паралельні контури. У цьому випадку уламки мають призматичну форму з нерівними торцевими краями та рівномірне інтерференційне забарвлення по поверхні зерен.

4. У мінералах спайність проявлена в трьох площинах. Обриси зерен є прямолінійними з усіх трьох боків. Уламки лягають на площину найбільш розвиненої спайності. У межах окремих зерен інтерференційне забарвлення рівномірне..

Визначення показників заломлення. При великій різниці показників заломлення мінералу та рідини зерна мінералу мають чіткі чорні обриси. Зі зближенням показників заломлення мінералу та рідини за умови, що спостереження ведеться у монохроматичному світлі, яскравість смужки Бекке

зменшується, зерна стають погано чи зовсім невидимими, мовби „розчиняючись” у рідині. Якщо спостереження ведеться в білому денному світлі, то при зближенні показників заломлення двох середовищ спостерігаються ті ж самі ефекти, але смужка Бекке при досягненні рівності показників заломлення не зникає, а роздвоюється та забарвлюється. Це зумовлено тим, що рівність показників заломлення настає тільки для променів певної довжини хвилі видимого світла.

Порядок визначення показників заломлення ізотропних мінералів:

1) підготувати імерсійний препарат;

2) установити його на столик мікроскопа, замалювати форми зерен, визначити наявність площин спайності;

2) при схрещених ніколях пересвідчитися в ізотропності усіх зерен препарату;

3) методом добору рідини добитися зникнення межі мінерал-рідина, тобто рівності відомого показника заломлення рідини з показником заломлення мінералу, який визначається.

Якщо показник заломлення мінералу більший, ніж рідини, при піднятті тубуса все світло немовби збирається від краю зерен до центру, і вони стають світлішими. І, навпаки, якщо показник заломлення мінералу менший, ніж рідини. Світло із зерен

переміщується на рідину, наче переливаючися через чорну кайму. Зерна стають темнішими.

Треба мати на увазі, що при піднятті тубуса незалежно від показника заломлення зерен та рідини навколо зерен спостерігається тонка світла смужка, яка завжди пересувається від краю мінералу на рідину (псевдо смужка Бекке).

При дослідженнях *анізотропних мінералів* в імерсійному препараті порівняння того чи іншого показника заломлення мінералу з показником заломлення рідини проводиться завжди в той момент, коли зерно при схрещених ніколях знаходиться в положенні згасання – тобто один з показників заломлення мінералів Ng чи Np збігається з напрямком коливання світла в поляризаторі. Інший показник визначається в тому ж перетині зерна після обертання столика мікроскопа на 90^0. Якщо в імерсійному препараті присутні ізотропні перерізи, визначення показника заломлення за цими перерізами проводиться так само як і в ізотропних мінералах.

Якщо ізотропні перерізи відсутні, то необхідно встановити при схрещених ніколях зерно на згасання, виключити аналізатор і провести спостереження за поведінкою смужки Бекке при піднятті тубуса мікроскопа. Якщо смужка переміщується на мінерал, то показник заломлення мінералу вищий за показник

рідини, і тому треба замінити імерсійну рідину на рідину з більшим показником заломлення і навпаки у іншому випадку.

За допомогою коноскопічних фігур, звичайним способом, можна визначити оптичний знак мінералу та встановити найменування показника заломлення.

За усіма переліченими ознаками (показник заломлення, оптичний знак та характер спайності) встановлюється найменування мінералу.

1.6.2.2 Діагностика мінералів за допомогою люмінесцентної спектроскопії

Люмінесценція – це властивість речовини випромінювати світло, пов’язана з будь-яким видом впливу на неї. Енергія спочатку поглинається, а потім вивільняється у вигляді світла. Люмінесценція мінералів пов’язана з дефектами кристалічної структури або з присутністю домішкових іонів-активаторів, що заміщують в кристалічній структурі крупні іони, але може бути невід’ємною властивістю кристалічної решітки мінералу.

За засобом збудження виділяють: фотолюмінесценція (ФЛ), що збуджується світловим фотоном, як правило з УФ області спектру; рентгенолюмінесценція, що збуджується рентгенівськими променями; катодолюмінісценція, що

збуджується електронним пучком, іонолюмінесценція, що збуджується бомбардуванням іонами в електричному полі. Крім того, виділяють: флюоресценція, фосфоресценція, термолюмінесценція, триболюмінесценція.

Загальним для усіх процесів люмінесценції твердих речовин є випускання фотону при електронному переході з і збудженого стану у основне у центрі. Центром люмінесценції називається частка (домішковий або власний атом, іон, молекула, радикал тощо), який разом з найближчим оточенням в кристалі утворює енергетичну систему, що має дискретні збуджені електронні рівні.

Люмінесценція характерна лише для діелектриків і напівпровідників та не характерна для металів. Здатні до люмінесценції мінерали повинні містити не більше 1% іонів-гасителів (Fe^{2+} , Cu^{2+} тощо) або центрів кольору (наприклад радіаційних), що поглинають фотони люмінесценції.

Найбільш розповсюдженою з них є *флюоресценція.* Цей термін походить від назви мінерала флюорита, який має флюоресценцію під дією ультрафіолетового випромінювання. Вона пов’язана в цьому мінералі із заміщенням в кристалічній структурі іонів Ca іонами рідкісноземельних елементів (Sm^{3+}, Dy^{3+}, Eu^{2+}, Yb^{2+}). Властивість флюоресценції

використовується при пошуках і збагаченні руд. Безколірний мінерал шеєліт $CaWO_4$ і кварц, які виглядають однаково при білому світлі, відрізняються один від одного в темноті при опроміненні їх УФ світлом (для шеєліту характерна флюоресценція у блакитних тонах).

До особистих (видоутворюючих) люміногенів належать Mn^{2+}, U^{4+}, W^{6+}, V^{5+}, Ti^{4+}, з них більшість у формі оксикатіонів (ураніл – $[UO_2]^{2+}$, ванаділ – $[VO]_4^{3-}$ тощо). До домішкових катіонів-люміногенів належать TR^{2+}, TR^{3+}, Mn^{2+}, Cr^{3+}, Tl^{+}, Fe^{3+}, Pb^{2+}, які можуть ізоморфно заміщувати видоутворюючі катіони.

На довжину хвилі і ширину спектру люмінесценції впливають характер зв’язків в кристалі та координаційне число. Так Mn^{2+} у тетраедричній координації має зелену флюоресценцію, а в октаедричній – червону.

Крім окремих іонів люмінесценцію можуть викликати в кристалах і комплексні іони, такі як кислотні радикали вольфраматів.

Колір флюоресценції деяких мінералів характерний лише для визначених місцевостей. Такий, наприклад віллеміт Zn_2SiO_4 з крупного родовища цинку у США (Нью-Джерсі). Для нього характерною є флюоресценція зеленого кольору, завдяки заміщенню цинку марганцем. Для чистого ж віллеміту

флюоресценція не характерна.

Фосфоресценція відрізняється від флюоресценції тим, що випромінення світла продовжується протягом деякого часу після видалення джерела опромінення. Фосфоресценція, наприклад сфалериту викликана дією альфа-часток або ультрафіолетового випромінювання.

Термолюмінесценція – це випромінювання світла у відповідь на підвищення температури, при цьому енергія, яку поглинув мінерал, вивільняється при переміщенні електрону в кристалічній решітці. Термолюмінесценція покладена в основу досить простого методу визначення відносного віку карбонатних відкладів. Оскільки радіаційні порушення кристалічної структури кальциту, що визначають його термолюмінесценцію є функцією віку структури і інтенсивності опромінення.

Триболюмінесценція – випромінення світла при терті або подрібненні мінералу. Характерна, наприклад, для сфалериту.

Діагностика мінералів за допомогою люмінесценції. Велику кількість мінералів важко діагностувати за головними фізичними властивостями. Перевагою люмінесцентного методу діагностики є: 1) експресність – секунди або хвилини при візуальних спостереженнях, до 15 хвилин при визначенні спектру; 2) невеликі наважки (1-20 мг) при вільній формі зразку;

3) недеструктивність; 4) наочність, яку можна порівняти за інформативністю з кольором мінералу.

Діагностичні кольори люмінесценції мінералів в залежності від характеру впливу відображені на спеціальних діаграмах. До діаграм необхідно звертатися тоді, коли уже ураховані інші, простіші діагностичні ознаки – колір, спайність. Форма зерен, твердість, парагенезис. Тільки після цього за характерною люмінесценцією з декількох варіантів обирається правильний. За допомогою люмінесцентних діаграм можна не тільки полегшити діагностику мінералів, але і встановлювати які головні люміногени в них забезпечують відповідне випромінення.

Головним недоліком методу є нехарактерна чи бліда люмінесценція або взагалі її відсутність у багатьох мінералів.

За допомогою люмінесцентного методу можливо також виконувати *напівкількісний аналіз вмісту мінералу* у руді чи пробі. Вміст оцінюється візуально, за площею ділянок, що світяться одним кольором. Межа визначення при цьому складає близько 1%. При візуальному відборі зерен під бінокуляром з УФ підсвітленням межа визначення знижується до 0,1-0,5%.

Так, розроблені принципи аналізу на каситерит олов’яних руд і продуктів збагачення. Аналіз

проводиться шляхом фотоелектронної реєстрації жовтої фотолюмінесценції каситериту. Таким чином фіксується лише каситерит, а сульфіди олова і сульфостанати не ураховуються, оскільки вони не мають зазначеної люмінесценції. Існують також методи визначення концентрацій шеєліту в рудах.

Типоморфний аналіз за допомогою люмінесцентного методу. Істотно перемінні люмінесцентні властивості проявляють лише ті мінерали, склад і структура яких допускають входження деякого набору домішкових катіонів люміногенів у кількостях 0,001-1%. Це, головним чином полівалентні іони перехідних металів групи заліза і рідкісні землі, входження яких у структуру мінералу може відображати емпіричні зв'язки з такими особливостями мінералоутворення, як хімізм середовища, її кислотність, основність або лужність, а також окислювально-відновлювальний потенціал.

У зв'язку з цим типоморфні особливості виражені у наступних мінералів:

1) мінерали Ca: плагіоклази, апатит, флюорит, кальцит, шеєліт, данбурит (Mn, TR^{2+}, TR^{3+});

2) мінерали Sr і Ba: стронціаніт, целестин, барит (TR^{2+}, TR^{3+});

3) мінерали Al^{3+}, що заміщується Mn^{2+}, а також Al^{3+} і Si^{4+}, що заміщуються Fe^{3+}(низько залізисті літієві

слюди);

4) мінерали цирконію – циркон і бадделеїт, де Zr^{4+} може заміщуватись іонами TR^{3+}, Ti^{4+}.

У цьому випадку більш контрастними є фотолюмінесцентні властивості.

Наприклад: Апатит характеризується контрастними фотолюмінесцентними властивостями завдяки домішкам Ce, Eu та Mn. Переважання фіолетової ФЛ Ce і Eu з ультрабазитів, карбонатитів і основних порід відображає генетичний зв'язок цього мінералу з лужними і основними магмами, а іноді може вкзувати на зв'язок з мантійним джерелом, що характеризується підвищеною основністю і відновлювальною обстановкою. Жовто-рожева ФЛ домішок Mn, Dy, Sm свідчить про те, що апатит пов'язаний з гранітоїдним магматизмом.

1.6.3 Рентгеноструктурні дослідження (ренгено-дифрактометричний аналіз)

Задачі методу*:*

1. Діагностика за структурними параметрами мінералу або синтетичної фази. Роль аналізу зростає при діагностиці високодисперсних фаз, коли малі розміри кристалів роблять їх оптично ізотропними, такими, які неможливо діагностувати

мікроскопічно, а також при аналізі тонких мінеральних сумішей і взаємних проростань внаслідок розпаду твердих розчинів, метасоматичної переробки речовини або твердофазних трансформаційних перетворень.

2. *Вивчення ізоморфних серій твердих розчинів*, їх повноти і типу (впорядкованості), виявлення блочного ізоморфізму.

3. *Вивчення реальної будови мінералу як структурної типоморфної ознаки*: реальна симетрія елементарної комірки; ступінь упорядкованості кристалічної решітки; наявність в структурі різних видів дефектності.

4. *Оцінка ступеня дисперсності і величини кристалітів порошкових утворень*.

5. *Вивчення стійкості кристалічної структури мінералу* і характеру фазових перетворень при температурних, радіаційних та інших впливах.

6. *Фазовий аналіз гірських порід, руд і продуктів їх технологічного переділу*. Аналіз як якісний (діагностика усіх роз кристалізованих фаз), так і кількісний з оцінкою вмістів головних або усіх фазових компонентів.

Принципова можливість аналізу визначається близькістю довжин хвиль рентгенівського випромінювання і розмірів атомів, іонів і міжатомних відстаней, які мають порядок приблизно 0,1-0,3 нм,

тому пучок рентгенівського випромінювання, що падає на кристал, буде підвладний дифракції так само як і промінь видимого світла оптичної дифракційної решітки (відстані між „лініями” дифракційної решітки (декілька мкм) наближаються до довжини хвилі світла і складають 0,3-0,1 мкм). Назва аналізу виражає його суть – аналіз структури речовини за допомогою рентгенівських променів.

У 1912 році М Лауе показав, що кристали викликають дифракцію рентгенівських променів, а першим хто застосував цей метод у 1913 році був У. Брегг.

Більша частина рентгенівських променів пройде крізь тонкий шар у вигляді незмінного пучка високої інтенсивності. Інші рентгенівські фотони розсіюються серією все більш віддалених від поверхні зразка атомних площин. При більшості величин кутів падіння (кута між електронним пучком і атомними площинами, на яких відбувається дифракція) рентгенівські промені, що розсіюються на різних площинах, бувають зсунутими по фазі відносно один одного. В результаті, оскільки вони мають різну довжину путі в кристалі, більшість з цих променів при накладанні взаємно знищуються. Існує лише визначений кут θ, при якому довжини шляху розсіяних в кристалі променів відрізняються один від одного на величину, що

пропорційна довжині хвилі монохроматичного рентгенівського випромінювання, що падає на кристал. Тільки в цьому випадку розсіяні промені коливаються в одній фазі, що приводить до посилення або позитивної інтерференції рентгенівських променів з утворенням доволі сильного дифракційного пучка. Критичний кут θ називається кутом Брега:

$$n\lambda=2d\sin\theta,$$

де n – невелике ціле число (часто 1); λ – довжина хвилі пучка, що падає і, звичайно, довжина вихідного пучка; d – відстань між сусідніми атомними площинами; θ – кут між променем і площиною, що відбиває. Виміряти кут θ дуже важко, але кут між дифрагованим пучком і пучком, що проходить рівний 2 θ, *а останній виміряти просто* (рис. 19).

Пучок, що падає, пучок, що проходить і дифрагований пучок легко фіксуються. Їх інтенсивність легко виміряти за допомогою різних систем детекторів рентгенівського випромінювання.

В багатьох випадках для дифракційного аналізу необхідно монохроматичне випромінювання, яке одержується за допомогою „фільтрації” поліхроматичного (білого) випромінювання.

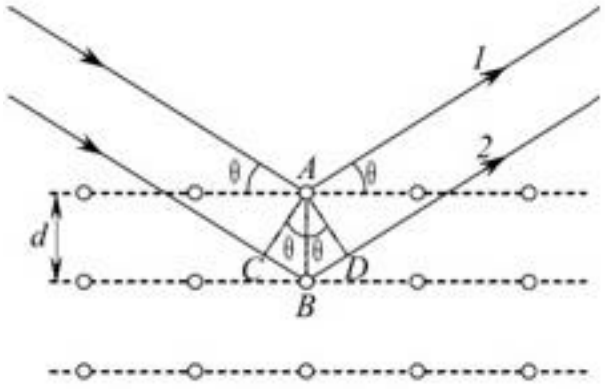

Рисунок 19 - Схема дифракції рентгенівських променів при рентгено-структурному аналізі.

Метод Лауе. Одержання дифракційної картини з нерухомого монокристалу у білому (поліхроматичному) рентгенівському випромінюванні. Положення та відносні інтенсивності дифрагованих променів записуються на пласку фотопластину, що поміщується під прямим кутом до пучка випромінювання, що падає. На пластинці буде спостерігатися набір плям, розташованих у вигляді складних еліпсів або гіпербол (лауеграми). Порівняння їх форм, розмірів і положення з відповідними зображеннями, що одержані для стандартних матеріалів, може допомогти з визначенням невідомого матеріалу. За допомогою пласких пластинок неможливо одержати повну дифракційну картину

зразку, оскільки частина кристалічних площин (паралельні або майже паралельні пучку, що падає) не будуть дифрагувати рентгенівські промені.

Існує метод *кристала, що обертається***.** При цьому монокристалічний зразок розташовується так, щоб одна з його кристалографічних осей опинилася нормальною до напрямку паралельного монохроматичного рентгенівського випромінювання. Кристал обертається навколо своєї осі і одночасно бомбардується рентгенівським пучком. В процесі обертання у визначені моменти часу деякі атомні площини в кристалі відповідають вимогам рівняння Вульфа-Брега для монохроматичного рентгенівського пучка. Таким чином досліджують структуру монокристала. У цьому випадку дифрактограма залишається неповною, оскільки деякі атомні площини в кристалі не підпадають під дію пучка, що падає. Складність полягає не тільки в тому, щоб знайти монокристал необхідних розмірів, а і в тому, що існує необхідність обертати кристал не навкруг однієї, а навкруг декількох кристалографічних осей, а це дуже складне завдання. Монокристальні методи рентгеноструктурного аналізу широко використовуються при вивченні мінералів, кристалічна структура яких відома, але структура ідеалізована. Кристалічна структура природного утворення може

відрізнятися від ідеалізованої моделі типом і ступенем упорядкованості. Виявлення таких типоморфних особливостей і забезпечує структурний аналіз монокристалів.

Існує інший метод – *порошковий***.** Цей метод дозволяє побороти 2 проблеми: одержання хороших зразків; забезпечення обертання цих зразків навкруг усіх можливих осей. Чистий (або майже чистий) зразок (не обов'язково у вигляді монокристалу) розтирається до розмірів часток менше 50 мкм. Передбачається, що усі мінеральні частки у такому зразку мають випадкову орієнтацію, тому при обертанні правильно приготованого зразка в паралельному пучку монохроматичного рентгенівського випромінювання кожний набір кристалографічних площин у визначений момент часу буде давати дифрагований промінь.

На осях абсцис дифрактограми відкладаються значення 2θ, *а* на осях ординат - інтенсивності сигналів, що їх відповідають (рис. 20).

В останніх моделях дифрактометричних систем одержані величини порівнюються зі стандартними даними, що зберігаються в комп'ютерних базах і мінерал визначається автоматично.

Процедура ідентифікації ускладнюється по мірі підвищення кількості мінералів в зразку. Нижня межа визначення кожного окремого мінералу в суміші

дорівнює 1-5%.

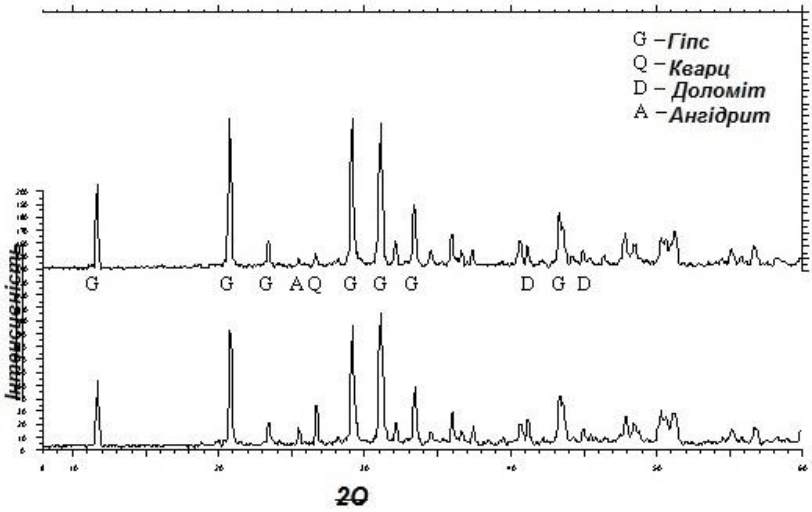

Рисунок 20 – Приклад сучасної дифрактограми.

1.6.4 Інфрачервона спектроскопія

Інфрачервона спектроскопія (ІЧС) – метод вивчення речовини (рідкого, твердого, газоподібного) за його спектром випромінення, відображення або поглинання в інфрачервоному діапазоні випромінення. В залежності від того, який випромінюється спектр (випромінення, після проходження через речовину або після відображення від нього) виділяють ІЧС випромінення, пропускання (поглинання) і відображення (дзеркального, дифузного, внутрішнього). Область використання всіх видів ІЧС досить широка: діагностика речовин, кількісний і

якісний фазові аналізи, вивчення кристалохімічних особливостей як об’єму речовини, так і поверхневого шару його часток товщиною від часток до цілих мкм.

ІЧС полягає в одержанні індивідуального спектра речовини при дії на нього інфрачервоного випромінювання в результаті чого в ньому виникають коливання атомів всередині молекули, що містить N атомів або складного іону дорівнює 3N – 3, а для кристала, в елементарній комірці якого *p* атомів , 3*p* – 3 оптичні моди і 3 – акустичні. У відповідності до цього кожна речовина з будь-якими розмірами часток і блоків має свій індивідуальний спектр.

Для одержання спектрів поглинання і відображення, а також випромінювання в інфрачервоному діапазоні випромінювання використовують інфрачервоний спектрофотометр, який, зазвичай, складається з 4 частин: джерела випромінювання, системи, яка розкладає випромінення в спектр, приймача випромінювання і пристрою для записування результатів.

ІЧК поглинання порошків використовують для діагностики якісного і кількісного фазових аналізів, виявлення кристалохімічних особливостей речовини (визначення координаційного числа, а іноді валентності іона в структурі, ступеня кристалічності, упорядкованості розташування іонів в структурі,

ізоморфізму, поліморфізму, політипії і змішано-шаровості). Метод особливо перспективний для переліченого кристалохімічного вивчення рентгеноаморфних речовин, тобто тонко дисперсних (з розмірами часток менше 0,02 мкм. А оскільки кристалохімічні особливості мінералів визначають їх технологічні властивості (механічні, теплові, електричні, магнітні тощо), то за ІЧС поглинання порошків опосередковано визначають їх поведінку в технологічному процесі.

Діагностика мінералу здійснюється шляхом порівняння ІЧС речовини з еталонним ІЧС мінералу, що наведений в атласі.

1.7 Методи вивчення елементного складу

Класифікацію методів елементного аналізу можна провести, в першу чергу за величинами відносної похибки:

напівкількісний (відносна похибка від 50 до 25 відносних %) – класичний емісійний спектральний аналіз;

приблизно-кількісні (25-15 відносних %) – спектральний аналіз з фотометром;

кількісні (< 15 відносних %) – атомно-абсорбційний аналіз, ISP –емісійний аналіз, ISP-MS,

рентгено-флуоресцентний аналіз гірських порід на головні петрогенні та мікроелементи, титриметричний аналіз, або мокра хімія.

Найбільш поширеними при дослідженнях з метою вивчення технологічних властивостей гірських порід і руд, за рахунок відносно низької вартості та достатньо високої точності, є *титриметричний та рентгено-флуоресцентний методи* вивчення елементного складу. Крім того застосовується *електонно-зондовий мікроаналіз* для дослідження елементного складу і мікроб удови твердих речовин в мікрооб'ємі речовини.

1.7.1 Титриметричний метод, або „мокра хімія"

При проведенні аналізу речовина породи переводиться у розчин. При цьому порушуються усі сполуки, що присутні у вигляді мінералів у гірських породах.

Деякі мінерали, наприклад карбонатні або сульфідні, легко переводяться у розчин мінеральними кислотами (соляною або азотною). Одну кислоту, або у суміші з іншими розчинниками, використовують для розкладення сульфідів, фторсилікатів, а також сполук Nb, Ta, Ti, Zr.

Однак, більша частина силікатів майже не

реагують з кислотами. Активним розчинником є сірчана кислота (H_2SO_4). При аналізі силікатних порід для визначення ряду елементів використовують розклад сумішшю плавикової (HF) та інших мінеральних кислот (сірчаної, азотної). В результаті розкладу силікатних мінералів сумішшю HF та H_2SO_4 кремній повністю видаляється з системи у вигляді леткої сполуки SiF_4, а метали переводяться у сульфати. Для визначення закисного заліза такий розклад проводять у току інертного газу без доступу кисню.

Але деякі мінерали класів силікатів та окислів, такі як: циркон, топаз, турмалін, рутил, каситерит, баделеїт, хризоберил тощо, - неможливо розкласти навіть наведеним вище способом. Тому, їх розкладають тією ж сумішшю у герметизованій системі під тиском і при підвищеній температурі. Цей процес відбувається у автоклавах із ніхромового сплаву у платинових ємностях. При визначенні індію, талію, золота, платини, паладію, вольфраму, молібдену кадмію, міді, цинку використовують для розкладання „царську водку” (суміш концентрованих HNO_3 та HCl у співвідношенні 1:3).

Для покращення розкладання важкорозчинних мінералів використовують також сплавлення речовини з, так званими, плавнями. Такий спосіб є дуже

ефективним, порівняно із розкладанням у кислотах, оскільки підвищена температура реакції підвищує швидкість її протікання.

В аналітичній практиці використовують наступні види плавнів: карбонати Na і K, бура, їдкий натр або калі, піросульфат калію, борний ангідрид тощо. Температура плавлення від 500 до 900^0C. Після сплавлення речовину розчиняють кислотою або іншим реагентом, в залежності від елементу, який визначається для одержання нерозчинного осаду відповідного окислу або елементу. Осад відфільтровується і зважується. Концентрації кожного елементу при виконанні «мокрої хімії» визначаються окремо.

1.7.2 Рентгено-флуоресцентна спектроскопія

Рентгенівське випромінювання репрезентує ту частину електромагнітного спектру, що знаходиться між порівняно низькоенергетичним ультрафіолетовим випромінюванням і гама-випромінюванням, яке відрізняється вкрай високою енергією. Рентгенівські проміні складаються з окремих фотонів енергії, причому енергія кожного фотона обернено пропорційна довжині його хвилі:

$$E=hC/\lambda,$$

де h – постійна Планка, С – швидкість електромагнітного випромінювання, λ – довжина хвилі.

Рентгенівські проміні (РП) утворюються при бомбардуванні речовини фотонами досить високої енергії. При цьому речовина або бомбардується високо енергетичними електронами (при цьому утворюються первинні рентгенівські проміні), або високоенергетичними рентгенівськими промінями, в результаті чого утворюються вторинні РП або *флуоресцентні РП* з більш низькою енергією. В результаті бомбардування утворюється тепло і, в меншій кількості, інші види випромінювання – рентгенівське, світлове та низькоенергетичні електронні пучки.

При цьому, чим вищий атомний номер матеріалу, тим більше утворюється рентгенівських променів. Кількість одержаної енергії рентгенівського випромінювання є функцією кількості енергії електронів. При перевищенні енергією електронів критичної величини, що називається *критичним потенціалом збудження* утворюються дуже інтенсивні рентгенівські проміні з дуже близькими довжинами хвиль. При цьому, критичні довжини хвиль залежать від природи матеріалу. Довжини цих хвиль настільки близькі, що утворюють *характеристичний лінійчастий спектр* матеріалу мішені.

В основі методу, так само як і для рентгено-дифрактометричного аналізу лежить закон Вульфа-Брега. Але, в даному випадку величина d (міжплощинні відстані) фіксована або відома, а величина кута θ (кута Брега) визначається, можна розрахувати величину λ, тобто якщо для дифрагування одержаних на зразку РП використовується кристал з відомими значеннями міжплощинних відстаней, визначені величини θ дозволяють розрахувати довжину хвилі. Довжини хвиль різних характеристичних РП, одержаних на складному матеріалі, показують з яких елементів цей матеріал складається. Інтенсивність характеристичних довжин хвиль є складною функцією співвідношень відповідних елементів, а також типу і кількості супутніх елементів. Визначивши ці співвідношення, можна використати рентгенівське випромінювання, що одержане на матеріалі для визначення співвідношень різних елементів у речовині.

При використанні відповідної методики збудження можна вимусити кожний елемент випускати характеристичне випромінювання з довжинами хвиль рентгенівського діапазону. Одержане випромінювання слугує для ідентифікації і визначення концентрацій елементів у зразку. Така методика (рис. 21) називається рентгено-флуоресцентним аналізом (РФА).

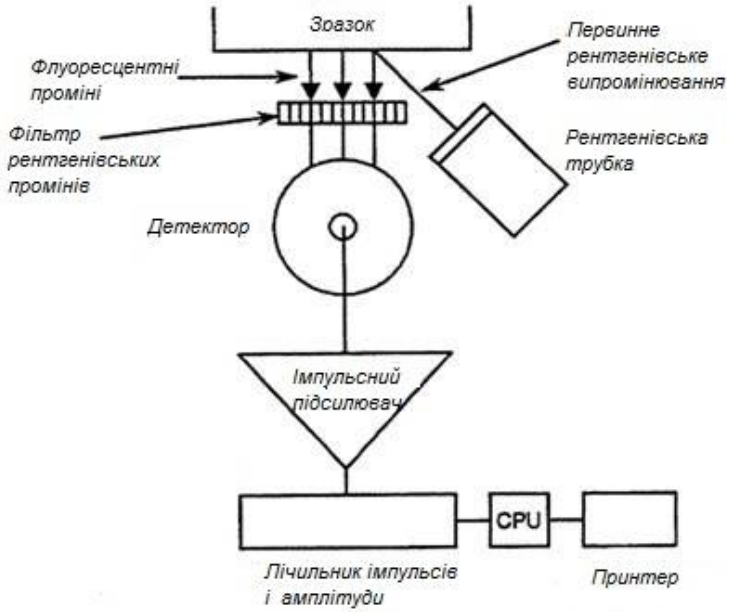

Рисунок 21 - Принципова схема роботи рентгено-флуоресцентного аналізатора.

Зразок опромінюється пучком поліхроматичного рентгенівського випромінювання. Одержані в зразку флуоресцентні рентгенівські проміні проходять у рентгенівський спектрометр, де визначаються і вимірюються специфічні характеристики довжин хвиль. Кількісний аналіз проводиться шляхом порівняння результатів, одержаних для невідомого зразка, з результатами, одержаними для відомого стандартного зразка (близького за складом до невідомого).

Відношення інтенсивностей рентгенівського

випромінювання для невідомого зразка і стандарту приблизно рівно відношенню концентрацій даного елементу в невідомому зразку і стандарті. На це відношення впливає поглинання випромінювання матриксом, фонові рентгенівські сигнали тощо. Ці ефекти дуже важко розрахувати. Тому кількісний РФА завжди проводиться шляхом порівняння спектру досліджуваного зразка зі спектром стандарту, близького за складом до невідомого.

а) *Поглинання випромінювання матриксом.* Якщо хімічний склад двох зразків різний, обов'язково виникнуть відповідні відмінності в природі матриксу, що оточує елемент, який випромінює. Завдяки відмінностям в матриксі виникають відмінності абсорбції ним як первинного (вхідного), так і вторинного (вихідного) рентгенівського випромінювання. При цьому повинні бути введені фактори корекції.

б) *Множинні збудження*. У випадку, якщо невідомий зразок містить елементи А і Б, первинне рентгенівське випромінювання (достатньо високої енергії) призведе до випускання обома елементами власного характеристичного випромінювання. Якщо, скажімо, енергія характеристичного випромінювання (ХВ) елементу Б вища, ніж у елементу А, частина випромінювання елементу Б буде збуджувати елемент

А, який при цьому дасть додаткове випромінювання. В результаті виникає видимість того, що кількість елементу А вища за істинну кількість. Для урахування цього ефекту також використовуються відповідні фактори корекції.

в) *Фонове випромінення*. Кожний чутливий рентгенівський детектор завжди записує фоновий „шум”. Невелика частина такого шуму – результат дії космічних променів, однак головна його частина – є наслідком розсіяння первинного випромінення в апаратурі.

г) *Мертвий час*. Кожний рентгенівський детектор затрачає на реєстрацію рентгенівського фотону невеликий, але кінцевий час. У цей час лічильник не працює і не може зафіксувати інший фотон.

д) *Абсорбція електронних пучків і рентгенівських промінів у вимірювальній апаратурі.* Високо енергетичне рентгенівське випромінювання (і електронні пучки) легко поглинаються і розсіюються молекулами газу. При проходженні РП через повітряний простір в спектрометрі характеристичне випромінювання від елементів з атомним номером Z менше ніж 21 в значній мірі поглинається. Сучасні спектрометри часто працюють в вакуумі, що дозволяє вимірювати рентгенівське випромінювання від елементів з атомними номерами до Z=11 без серйозних

втрат сигналу в результаті абсорбції. (В рентгенівському мікроаналізаторі можливо, хоч і не просто, вимірювати елементи Z=4; практично не підлягають вимірюванню лише H, He, Li, Be).

В процесі РФА досліджується тонкий шар речовини (глибиною до 1 мм). Тому, поверхнева геометрія зразка повинна бути достатньо однорідною і репрезентативною для усієї його маси. Однорідність досягається за рахунок стирання зразків до розмірів часток не більше 50 мкм.

Слід додати, що нераціонально визначати дуже невеликі кількості „легких” елементів у „важкому” матриксі. Навпаки, можна визначати дуже малі кількості „важкого” елементу у легкому матриксі.

Точність аналізу залежить частково від експозиції, а також від відношення сигналу до рівня „шуму” (від висоти піків до фону) для характеристичної лінії, що визначається.

1.7.3 Рентгенівський мікроаналіз

Рентгенівський електронний мікроаналізатор (РЕМ) поєднує в собі деякі риси електронної мікроскопії і рентгено-флуоресцентної спектроскопії. В ньому пучок високо енергетичних електронів фокусується на площі біля 1-2 мкм^2 на поверхні зразка,

що слугує мішенню. Поверхневі шари зразка дають набір сигналів, що використовуються для одержання інформації про нього. Ці сигнали суттєво відрізняються за енергією фотонів і виходять з дещо різних глибин у зразку.

При ударі об зразок деякі електрони. Що його бомбардують відображаються або зворотно розсіюються від тонкого поверхневого шару, глибиною близько 1 мкм. Такі електрони зворотного розсіяння (ЗР) легко визначаються і можуть використовуватися для отримання інформації відносно топографії поверхні зразка і середнього атомного номера матеріалу в малому об’ємі зразка. Інші електрони первинного пучка проникають до глибини 1-2 мкм і збуджують атоми у зразку з виникненням характеристичного рентгенівського випромінювання. ХВ визначається або одним з декількох спектрометрів, або приладом твердо фазного визначення розсіяння енергії (рис. 22).

Довжини хвиль рентгенівських променів, одержаних від малого об’єму зразка, що опромінюється електронним пучком, показують які елементи присутні в даному об’ємі речовини. Інтенсивності Характеристичного випромінення пропорційні кількості цих елементів.

При ударі об зразок частина енергії первинного

електронного пучка може перетворюватись у видиме світло – цей ефект носить назву *катодолюмінісценції і* може іноді використовуватись для одержання корисної інформації відносно вмісту розсіяних елементів в опроміненому об’ємі зразка. Наприклад, каситерит часто дає блакитне світло, яке обумовлене наявністю в мінералі танталу і ніобію.

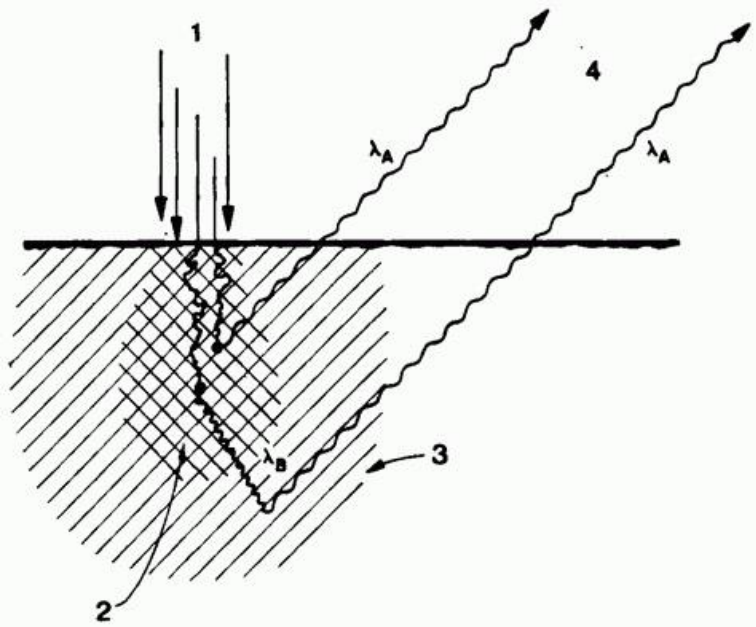

Рисунок 22 - Схематичне зображення генерації вторинного випромінювання в результаті збудження флуоресценції первинним випромінюванням: 1 – електрони; 2 – область первинного збудження випромінювання; 3 область збудження флуоресцентного випромінювання; 4 – рентгенівське випромінювання.

Однак головна частина енергії електронного пучка перетворюється у тепло, причому в такій кількості, що виникає можливість перетворення або руйнування крихких мінералів внаслідок локального підвищення температур. Крім того в діелектричних зразках буде накопичуватись електричний заряд. Тому прилад повинен бути обов'язково заземлений.

Як уже говорилося на РЕМі можливий аналіз зразків із атомними номерами більше 4, за рахунок вакуумних спектрометрів з дифрагуючими кристалами з визначеними величинами міжплощинних відстаней. Для досліджень випромінювання від елементів з більш низькими атомними номерами, використовують штучні кристалоподібні матеріали, що називаються псевдокристалами.

Оскільки такі невеликі об'єми речовини найчастіше опиняються мономінеральними. То такий мікроаналізатор дуже корисний, тому що не потребує видалення дрібних зерен акцесоріїв з породи і не потребує відбору мономінеральних фракцій. Більше того, РЕМ дозволяє досліджувати навіть окремі ділянки кристалів, зони зональних кристалів, мікровключення у кристалах.

Аналіз проводиться майже так само як і РФА, але в даному випадку вимірюється первинне рентгенівське випромінювання.

Інтенсивності характеристичних рентгенівських промінів, одержаних на зразку, порівнюються з одержаними на стандартах. Як і у випадку з РФА необхідно враховувати вплив поглинання матриксом, вторинної флуоресценції, фону і мертвого часу.

При аналізі необхідно користуватися дуже чистими стандартами елементів (оксидами або сульфідами), оскільки кількості речовини, що аналізується настільки малі, що у більшості випадків є гомогенними.

За допомогою мікроаналізатора можна досліджувати поліровані шліфи, аншліфи, а також тонкозернистий рихлий матеріал. Але, оскільки на якості аналізу відбивається топографія поверхні зразка, краще використовувати поліровані поверхні.

Нестійкі зразки, здатні до дегідратації, повинні бути захищені від дії тепла, що генерується електронним пучком, а також від впливу високого вакууму, що використовується в апаратурі. Вільні електрони, що попадають у зразок, повинні бути відведені в землю. Дуже рідкісні зразки мають достатню провідність, тому їх покривають тонкою плівкою провідника. Плівка повинна бути достатньо прозорою для електронного пучка, що падає на зразок, для утворених у зразку рентгенівських променів, а також для електронів зворотного розсіяння. Крім того

вона повинна легко заземлюватися. Вакуумне напилення металів з невеликими атомними номерами дає плівки товщиною близько 5 нм. Такі напилення електропровідні, прозорі для електронів, але сильно відображають світ, тому такі зразки працюють як дзеркало і не дозволяють проводити дослідження за допомогою вбудованого мікроскопу відбитого світла. Тому мінеральні зразки частіше покривають шаром вугілля товщиною 10-15 нм. Таке покриття має достатні електричні властивості і прозоре у видимому світлі (хоча на мінералах з таким покриттям можуть спостерігатися нехарактерні кольори інтерференції - наприклад, пірит буде здаватися не жовтим, а рожевим.

Теплові ефекти можна знизити зменшуючи енергію електронного пучка, або покривши зразок тонкою плівкою матеріалу-теплоізолятора. Вугілля у цьому відношенні є не ідеальним, але, у більшості випадків, придатним.

Важко запобігти лише дегідратації мінералів у вакуумі. Зернисті зразки пресуються у холодну епоксидну основу. Епоксидний клей погано проводить тепло і електрику, а під дією електронного пучку може плавитися і навіть випаровуватися. Якщо додати до нього 10-20% графітового порошку, його тепло- і електропровідність значно зростають.

Кількісний аналіз елементів, починаючи з натрію

(Z=11) проводиться з відносною похибкою 1-2% для концентрацій більше 1%. Кількісний аналіз елементів з атомними номерами від 5 до 10 провести складніше. Точність його не буде перевищувати 10%.

Контрольні запитання до частини I

1. Прикладні задачі мінералогії та їх значення для суміжних дисциплін.
2. Методи та методики підготовки та фракціювання мінералогічних та комплексних мінералого-геохімічних проб різноманітного призначення.
3. Методи та методики вилучення концентратів та мономінеральних фракцій.
4. Методики препаріювання мінералів для подальшого дослідження.
5. Мікроскопічні методи прикладного дослідження мінералів.
6. Інструментальні методи прикладних мінералогічних досліджень.
7. Теригенні мінерали та їх значення для вирішення завдань прикладної мінералогії.
8. Значення елементного аналізу полімінеральних зразків для вирішення завдань прикладної мінералогії.
9. Технологічні задачі прикладної мінералогії. Їх значення для оцінки якості мінеральної сировини, технології збагачення та переробки руд.

10. Значення фазового аналізу полімінеральних зразків для вирішення завдань прикладної мінералогії.

11. Значення рентгеноструктурного аналізу мінералів для вирішення завдань прикладної мінералогії.

12. Значення локального елементного аналізу мінералів для вирішення завдань прикладної мінералогії.

13. Попередня підготовка технологічних проб.

14. Методи прикладного дослідження мінералів.

15. Генетичні задачі прикладної мінералогії. Їх значення для петрології, геохімії, теригенної мінералогії та інших дисциплін.

16. Прогнозно-пошукові задачі прикладної мінералогії та їх значення для прогнозу, пошуків та розвідки ендогенних та екзогенних родовищ корисних копалин.

17. Опробування при вирішенні завдань прикладної мінералогії.

18. Комплексування аналітичних методів при вирішенні завдань прикладної мінералогії.

19. Комплексування методів прикладної мінералогії при вирішенні практичних завдань.

20. Діагностика мінералів за допомогою люмінесцентної спектроскопії.

21. Фактори, що впливають на технологічні властивості мінералів.

22. Способи подрібнення і стирання проб.

23. Послідовність вивчення речовинного складу руди технологічної проби.
24. Виділення моно мінеральних фракцій
25. Грохочення і класифікація за крупністю.
26. Збагачення у важких рідинах.
27. Кристалохімічні особливості мінералів.
28. Збагачення в потоках постійного і перемінного напрямку.
29. Виділення моно мінеральних фракцій.
30. Імерсійні методи вивчення мінеральної речовини.
31. Титриметричний метод або «мокра хімія»

Рекомендована література до частини I

1. Бергер М.Г. Терригенная минералогия. - М.: Недра, 1986. - 227 с.
2. Берлинский А.И. Разделение минералов. - М.: Недра, 1988. - 229 с.
3. Бородаев Ю.С. Лабораторные методы исследования минералов, руд и горных пород. - М.: Изд-во МГУ, 1988. - 296 с.
4. Джонс М.П. Прикладная минералогия. Количественный подход. - М.: Недра, 1991. - 391 с.
5. Методы минералогических исследований. (Справочник) / Под ред. А.И.Гинзбурга. - М.: Недра, 1985. - 480 с.
6. Матковський О.І., Пирогов Б.І. Прикладна мінералогія. – Львів: Ред.-вид. Відділ Львів. Ун-ту, 2002. – 286 с.

7. Матковський О.І., Пирогов Б.І. Технологічна мінералогія руд: Цикл лекцій з курсу “Прикладна мінералогія”. – Львів: Ред.-вид. Відділ Львів. Ун-ту, 1999. – 129 с.

8. Технологическая оценка минерального сырья. Опробование месторождений. Характеристика сырья. (Справочник) / Под ред. П.Е.Остапенко. - М.: Недра, 1990. - 272 с.

9. Урусов В.С. Теоретическая кристаллохимия. - М.: Изд-во МГУ, 1987. – 275с.