

# План-конспект лекцій з курсу «Спеціальна мінералогія»

## Розділ I. Методи мінералогічних досліджень

**Тема 1. Лабораторні і польові методи визначення мінералів. Фізичні методи досліджень мінералів.**

**План:**

1. Визначення абсолютної та відносної твердості мінералів
2. Визначення щільності
3. Кристалооптичний
4. Кристалографічний
5. Рентгенометричний
6. Електромікроскопічний
7. Магнітометричний
8. Радіометричний
9. Люмінісцентний аналізи

### Вивчення твердості рудних мінералів

Твердістю мінералу називається здатність його поверхні чинити опір зовнішній механічній дії (дряпанню, шліфуванню, вдавлюванню).

Твердість мінералів – складна інтегральна властивість, що залежить як від кристалохімічних факторів (кристалічної структури, валентності, хімічного зв'язку), так і від механічних, що властиві будь-якому твердому тілу (пружність, пластичність, міцність, крихкість, деформація).

У більшості випадків механічні фактори самі залежать від кристалохімічних, тобто від міцності кристалічної ґратки мінералів, яка у свою чергу залежить від густини і типу структури, а також від природи хімічного зв'язку між структурними елементами – атомами, іонами, радикалами.

Для самородних елементів з металічним, змішаним (ковалентнометалічним) і ковалентним зв'язком і з координаційним і шаровим типом структури твердість в основному залежить від кристалохімічного радіуса і валентності.

Твердість мінералів цієї групи підвищується зі зменшенням кристалохімічного радіуса і зі збільшенням максимальної валентності в гетерополярних сполуках (табл. 8).

Для мінералів координаційної й каркасної структури з іонним, іонно-ковалентним і ковалентним зв'язками твердість підвищується зі збільшенням валентності, координаційного числа атомів, ступеня ковалентності зв'язку між ними і зі зменшенням міжатомних і міжіонних відстаней.

Загалом, мінерали, в яких переважає металічний зв'язок, характеризуються низькою твердістю і високою пластичністю. При збільшенні в мінералах частки ковалентного зв'язку зростає твердість, густина і зменшується пластичність.

**Залежність твердості самородних металів  
від кристалохімічних параметрів**

Метал	Металічний радіус	Ковалентний радіус	Максимальна валентність	Мікротвердість, кг/мм <sup>2</sup>
Cu	1,28			126
Au	1,44			53
As		1,21		104–128
Sb		1,41		98–119
Bi	1,22			21–23
Cu	1,28		II	126
Fe			III	135

Мінерали з іонним зв'язком характеризуються високою твердістю і невеликою густиною. Для мінералів з острівними, ланцюжковими і шаруватими структурами, в яких проявляється неоднорідність зв'язку, твердість визначається головним чином міцністю найслабших із цих зв'язків.

Для подібних мінералів з істотно іонним зв'язком між радикалами твердість залежить від тих же головних факторів, що характерні для попередньої групи. У мінералів із залишковим зв'язком, особливо шаруватої структури (графіт, тальк, слюди), головним фактором, що контролює твердість, є ступінь деформації цих мінералів.

Наявність у мінералах гідроксильної групи або молекул води, а також їхній металічний та колоїдний стан завжди зменшують твердість порівняно з відповідними їм за складом мінералами. Анізотропія твердості – це наявність у кристалі неоднакової твердості в різних кристалографічних напрямках. Розрізняють два види анізотропії твердості [ 18]:

- першого роду (полярна) – неоднакова твердість у різних кристалографічних напрямках у межах однієї площини кристалів, граней, перерізу (антимоніт, телуриди, селеніди, дистен);
- другого роду (ретикулярна) – різна твердість граней і перерізів, що паралельні або перпендикулярні до кристалографічної осі в одному кристалі, яка залежить від атомної (ретикулярної) густини (вісмутин, циркон, берил).

Анізотропія першого роду фіксується у вигляді ромбоподібного відбитку (фігура вдавлювання) і характеризується різними число- 184 вими значеннями мікротвердості, отриманими по двох діагоналях одного відбитку.

Анізотропія другого роду характеризується відбитком квадратної форми неоднакових розмірів на різних гранях, а отже, і числові значення мікротвердості будуть відрізнятися. Для кількісної оцінки ступеня анізотропії твердості використовують коефіцієнт анізотропії твердості мінералу  $K_n$ , який вираховується за формулою  $\max \min n H K H =$ , де  $H_{\max}$  і  $H_{\min}$  – максимальне і мінімальне значення мікротвердості, отримані для мінералів на різних перерізах і гранях або на різних напрямках в одному перерізі. Як впливає із формули, коефіцієнт анізотропії твердості – величина відносна і завжди більша одиниці.

Для кореляції коефіцієнта анізотропії зі структурними особливостями всі мінерали поділяються на три гомологічні типи:

1-й тип – мінерали кубічної й триклінної сингоній, для яких характерний один, найнижчий коефіцієнт анізотропії другого роду ( $K_{H1} = 1,0-1,12$ );

2-й тип – мінерали середніх сингоній з одним одиничним напрямком у кристалах; вони, як правило, характеризуються двома коефіцієнтами анізотропії  $K_{H1}$  і  $K_{H2}$  у межах (1,12–1,50);

3-й тип – мінерали ромбічної й моноклінної сингоній з трьома і більше коефіцієнтами анізотропії твердості ( $K_{H1-2...} > 1,50$ ); вони мають три і більше одиничних напрямків у кристалах.

Про чіткий зв'язок анізотропії твердості мінералів з їхньою структурою свідчать дані з мікротвердості однотипних самородних елементів (As, Sb, Bi) з різним ступенем анізотропії.

У цьому ряду елементів від As до Ві зі збільшенням частки металіч- 185 ності зв'язку "вирівнюється структура", що виражається у збільшенні відношень коротких і довгих міжатомних відстаней в їхніх структурах у межах 0,80–0,85–0,90.

У зв'язку із цим зменшується ступінь анізотропії твердості від As до Ві –  $K_n = 1,23-1,21-1,09$ . Вісмут уже практично ізотропний за твердістю.

Існують два методи визначення твердості – якісний (відносний) та кількісний (абсолютний). Якісне визначення твердості завжди є приблизним.

У лабораторній практиці відносно твердість мінералів у полірованих шліфах під мікроскопом у відбитому світлі визначають шляхом дряпання полірованої поверхні мінералів голками певної твердості, за характером рельєфу, якістю полірованої поверхні й за абразивними штрихами.

У мінераграфії широко використовується визначення твердості рудних мінералів шляхом дряпання полірованої поверхні сталлюю і мідною голками. Твердість сталлюю голки за шкалою Мооса дорівнює 5, а мідної – 3.

Якщо твердість мінералу нижче, ніж у голки, на полірованій поверхні утворюється подряпина. У діагностичних таблицях за шкалою Мооса відповідно до твердості мінерали поділяються на три групи: 1) низької твердості (до 3) – дряпаються мідною голкою; 2) середньої твердості (3–5) – дряпаються сталлюю голкою, але не дряпаються мідною; 3) високої твердості (вище 5) – дряпаються з труднощами або не дряпаються взагалі сталлюю голкою.

На спеціальному приладі – мікросклерометрі С. Б. Телмейдж [ 11] визначав твердість дряпання мінералів алмазним вістрям під певним навантаженням, отримуючи кожного разу на полірованій поверхні мінералу подряпину стандартної ширини. За твердістю дряпання він поділив мінерали на сім груп з відповідною буквеною індексацією А, В, С, D, Е, G, F, виділивши для кожної групи мінерал-еталон (табл. 9)

Досліджуючи твердість мінералів способом дряпання, необхідно пам'ятати про те, що твердість анізотропних мінералів (антимоніт, вольфраміт, вісмутин та ін.) змінюється залежно від орієнтації зерен, а ізотропних – залежно від кристалічної структури; у прихованокристалічних різновидів мінералів твердість нижча, ніж у повнокристалічних. Наприклад, коломорфний мельниковіт, пірит і кристалічний пірит будуть відрізнятися за твердістю.

Таблиця 9

Мінерал-еталон, сингонія	Твердість					Мікротвердість, кг/мм <sup>2</sup>
	Моос	Талмейдж	Волинський	Дряпання	Рельєф	
Акантит, Ag <sub>2</sub> S кубічна	2–2,5	A	I	низька	< галеніту	20–30* 24 20–30
Галеніт, PbS кубічна	2,5	B	II	низька	> аргентиту < сфалериту	71–84* 76 64–110
Халькопірит, CuFeS <sub>2</sub> тетрагональна	3,5–4,0	C	III	середня	> галеніту < піротину < сфалериту	126–219 194
Сфалерит, ZnS кубічна	3,5	C	IV	середня	> галеніту > халькопіриту > бляклої руди < піротину < магнетиту	186–209* 198 153–270
Тенантит, Cu <sub>12</sub> As <sub>4</sub> S <sub>4</sub> кубічна	3,5–4,5	C	IV	середня	> галеніту < сфалериту < піротину	320–361* 338 153–270
Нікелін, NiAs гексагональна	5,0–5,5	E	V	висока	> піротину < піриту < сафлориту	328–455* 392 412–489
Магнетит, Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> кубічна	5,5	F	VI	висока	> сфалериту < гематиту	530–699* 560 535–695
Ільменіт, FeTiO <sub>3</sub> тригональна	5–6	G	VII	висока	> магнетиту < гематиту	519–703* 611 593–735
Пірит, FeS <sub>2</sub> кубічна	6,0–6,5	G	VII	висока	> арсенопіриту > гематиту < кобальтину	1027–1240* 1165 1144–1374

Надійний спосіб визначення незначної різниці у твердості двох сусідніх мінералів (сфалерит – халькопірит, борніт – халькопірит, сфалерит – піротин) – спостереження руху світлової 187 смужки на межі між цими мінералами.

При піднятті тубуса мікроскопа світлова смужка пересувається від мінералу більш твердого до мінералу м'якішого. Світлова смужка супроводжується темною, що спостерігається на внутрішній межі більш твердого мінералу. Цей спосіб незамінний для визначення твердості дрібних зерен (0,01–0,001 мм). При виготовленні полірованого шліфа рудні мінерали виявляють різний опір стиранню.

У результаті при виготовленні аншліфа мінерали неоднакової твердості шліфуються і поліруються з різною інтенсивністю, утворюючи своєрідний позитивний і негативний рельєф. І. С. Волинський [ 6] розділив рудні мінерали за висотою відносного рельєфу в полірованих шліфах на сім груп відповідно до числа класів С. Б. Талмейджа (табл. 9).

Твердість мінералу за рельєфом не завжди може бути визначена в прихованокристалічних аморфних агрегатах (оксиди заліза і марганцю).

Характер полірованої поверхні неоднаковий для різних мінералів і залежить головним чином від їхньої твердості, крихкості та спайності. Більш тверді мінерали мають нерівну, жорстку поверхню, на якій помітні ямки і глибокі незаполіровані штрихи (пірит, каситерит, хроміт). Краще від інших поліруються мінерали середньої твердості (сфалерит, халькопірит, блякла руда).

Поведінка мінералів при поліруванні може бути відмінна, добра і погана. Якщо погана – мінерал полірується важко, як правило, залишаються подряпини і ямки (апатит, пірит); добра – подряпини відсутні або дуже рідкісні (халькопірит); відмінна – ідеальне полірування без подряпин (ковелін, тенантит). Систематику рудних мінералів за відносним рельєфом наведено в табл. 10. Мінерали, які мають досконалу спайність (галеніт) виявляються під мікроскопом Рис. 23. Галеніт (з трикутниками викришування). Пержанське родовище 188 з характерними трикутними заглибленнями (трикутники викришування), які утворилися при поліруванні внаслідок викришування осколків мінералу по його спайності (рис. 23).

**Систематика рудних мінералів  
за відносним рельєфом у полірованих шліфах [11]**

I група H < галеніту	акантит, вісмут самородний, алтаїт, тетрадиміт, реалгар, прустит, піраргірит, антимоніт, буланжерит, халькозин, джемсоніт, ковелін
II група галеніту ≤ H ≤ борніту	галеніт, іорданіт, вісмутин, галеновісмутин, айкініт, бурноніт, золото самородне, електрум, срібло самородне, кіновар, халькостибіт
III група галеніту ≤ H ≤ бляклих руд	борніт, халькопірит, кубаніт, ренсьєрит, молібденіт, графіт, германіт, бетехтеніт
IV група бляклих руд ≤ H ≤ самородної платини	фрейбергіт, тетраедрит, тенантит, енаргіт, самородна мідь, тенорит, куприт, станін, мілерит, алабандин, гринокіт, сфалерит, в'юртцит
V група сфалериту ≤ H ≤ піротину	самородний паладій, самородна платина, піротин, бравойт, пентландит, лінеїт, зігеніт, полідиміт, нікелін, скутерудит, рамельсбергіт, сафлорит
VI група сафлориту ≤ H ≤ арсенопіриту	льолінгіт, герсдорфіт, гетит, піролюзит, манганіт, псиломелан, гаусманіт, магнетит, магеміт, хроміт, ільменіт, рутил, перовськіт, шесліт, вольфраміт, гюбнерит, глаукоdot, арсенопірит
VII група арсенопіриту ≤ H ≤ піриту	кобальтин, уранініт, гематит, марказит, пірит, колумбіт, танталіт, каситерит

**Тема 2. Фізико-хімічні методи досліджень мінералів. Хімічні методи.**

План:

1. Термічний
2. Термобаричний аналіз (гомогенізація, декрепітація, криометрія)
3. Якісний та кількісний хімічні аналізи
4. Спектральний аналіз

***Методи хімічного аналізу при діагностиці мінералів***

У лабораторній практиці при діагностиці мінералів у відбитому світлі використовуються також хімічні методи, такі як діагностичне травлення і реакції кристалохімічного та крапельного аналізу на окремі елементи.

При визначенні карбонатних мінералів великого значення набули реакції плівкового аналізу, а при діагностиці мінералів в окиснених рудах – фазовий аналіз, який виконують за допомогою методу відбиттів і крапельного аналізу, а при вивченні радіоактивних мінералів – макро- і мікрорадіографічних аналізів.

При вивченні якісного хімічного складу руд або окремих рудоутворювальних мінералів використовують хімічні реакції, які не потребують складних операцій з розділення елементів. Це в першу чергу найбільш чутливі й специфічні реакції кристалооптичного паралельного, плівкового аналізів і реакції за методом відбитків. Оскільки результат

визначення хімічного елемента залежить від його кількості в досліджуваному розчині, ми стисло викладемо способи отримання розчинів та їхньої підготовки для проведення хімічних реакцій на окремі елементи. Існують декілька способів одержання досліджуваних розчинів [ 11, 35].

### *Діагностичне травлення (розчинення мінералів)*

При поліруванні аншліфів утворюється тонка (товщиною в тисячні частки міліметра) аморфна плівка з мінералів, що становлять аншліф. Вона заповнює дрібні тріщини в мінералах. При дії на цей аншліф розчинника спочатку розчиняється аморфна плівка та виявляється структура агрегату; подальша дія розчинника призводить до роз'їдання поверхні мінералу, що затушовує його структуру. Крім цього, на поверхні шліфа можуть виникати кольорові утворення (іризуючі плівки). Різні мінерали неоднаково розчиняються хімічними реактивами. Свого часу ця властивість мінералів лягла в основу перших визначників для непрозорих мінералів (Ш. Мердок, М. Шорт, В. Дави та ін.) [ 35]. Найбільш достовірні результати діагностичного травлення отримують при дії концентрованих кислот  $\text{HNO}_3$  і  $\text{HCl}$ , 20 % розчинів  $\text{KCl}$ ,  $\text{FeCl}_2$ ,  $\text{HgCl}_2$  і  $\text{KOH}$ .

При спеціальних мінераграфічних дослідженнях деколи використовують до 40 реактивів. Методика проведення діагностичного травлення така. Перед травленням полірований шліф слід витерти сукном чи замшею, щоб на його поверхні не залишилося пилу і жирових плям, які заважають нанесенню крапель хімічного реактиву (краплі скочуються з препарату).

Травлення проводиться безпосередньо під мікроскопом при збільшенні в 60–80× разів. Розмір крапель не повинен перевищувати четвертини поля зору, тобто 0,1–0,2 мм, щоб дослідник міг повністю побачити весь хід реакцій. Час травлення для отримання стандартних порівняльних результатів має бути строго обмежений. Нормальний час реакцій 60 с, протягом яких ведеться спостереження під мікроскопом за дією на мінерал реактиву та його парів; останні змінюють частину мінералів, що не покриті розчином. Реакція розчинення проходить інтенсивно (з кипінням) або повільно (у деяких випадках мінерал з реактивом не реагує). Потім піднімають тубус мікроскопа і обережно знімають краплю фільтрувальним папером, який накладають на краплю і зверху обережно притискають пальцем. Після зняття краплі результати реакцій вивчають під мікроскопом і детально описують. Потім з метою розчинення осадів на це місце накладають краплю води, яку також обережно знімають фільтрувальним папером.

Після очищення місце травлення знову вивчають під мікроскопом і записують результати спостережень. При слабкій дії реактиву, коли розчиняється тільки аморфна плівка, можуть бути виявлені структурні особливості – тріщини спайності, двійники, структури розпаду та інші, інколи проявляється слабоінтенсивна іризуюча плівка.

При сильній дії реактиву, крім аморфної плівки, розчиняється і сам мінерал, при цьому його поверхня під знятою краплею стає грубою, шорсткою сіро-чорного кольору. Інколи поряд з розчиненням утворюються осадки, що покривають поверхню травленого мінералу. Під мікроскопом такі новоутворення спостерігаються у вигляді іризуючих плівок жовтого, червоного, синього, зеленого, коричневого та інших забарвлень (кольори інтерференції тонких плівок).

Колір змінюється залежно від товщини плівки, яка обумовлена інтенсивністю і тривалістю реакцій. Для деяких мінералів забарвлення іризуючої плівки є доброю діагностичною ознакою.

Діагностичне травлення мінералів використовується як додатковий метод разом з іншими методами хімічного аналізу, що застосовуються при діагностуванні мінералів. Метод травлення (розчинення). При отриманні розчину шляхом травлення мінералу на його поліровану поверхню наносять краплю розчинника ( $\text{HNO}_3$  або  $\text{HCl}$ ) відповідної концентрації й витримують до появи протравленої поверхні або густої іризуючої плівки (перевіряють під мікроскопом). Потім краплю одержаного розчину переносять на фільтрувальний папір (для проведення реакцій крапельного аналізу) або на предметне скло (для проведення реакцій кристалоскопічного аналізу).

Деякі хімічні реакції можна проводити безпосередньо на полірованій поверхні мінералів (реакції на свинець, миш'як, сурму та ін.). Проводити хімічні дослідження таким способом можна одночасно з реакціями діагностичного травлення. У такому випадку за розчин служить крапля, яку ми отримали при діагностичному травленні й яка була перенесена на фільтрувальний папір. Це 253 деякою мірою зберігає від подальшого псування поліровану поверхню мінералів у шліфах.

**Метод електричного розчинення.** Якщо мінерал погано розчиняється і під дією розчинника неможливо отримати чітку протравлену поверхню, застосовують електричний струм. Як джерело струму використовують батарейку від кишенькового ліхтарика. До елементів прикріплюють платинові дротики та їхні кінці вводять у краплину розчинника у випадку, коли мінерал не є провідником. Якщо досліджувані й сусідні поряд з ним мінерали добре проводять електричний струм, тоді від'ємний електрод (катод) вводять у краплю, а анод приводять у контакт з полірованою поверхнею мінералу. Після одержання чіткої протравленої поверхні розчин переносять на фільтрувальний папір і предметне скло для проведення хімічних реакцій.

**Метод плавнів.** Якщо мінерал неможливо розчинити навіть за допомогою електричного струму, тоді його порошок, отриманий шляхом дряпання або з допомогою мікросверла, змішують з рівними дозами сухої соди і селітри (або їдкої калію, чи натрію, чи фосфорної солі, чи бури). Невелику кількість мінералу розтирають у ступці та змішують з 2- і 3-кратною кількістю соди (або соди із селітрою, або КОН, або фосфорної солі, або бури). Цю суміш плавлять у платиновій ступці й на полум'ї газової горілки або паяльної трубки. Закінчення плавлення визначають за появою рівномірно забарвленого перлу. Забарвлення перлу характерне для деяких хімічних елементів, чим можна користуватися для їхньої діагностики. Для отримання розчину перл розчиняють в  $H_2O$ ,  $H_2SO_4$ ,  $HCl$  або  $HNO_3$  у концентрації, необхідній для проведення реакцій на цей хімічний елемент. За необхідності опробування штучних зразків виконують такі дії: шматочок руди подрібнюють у сталевій ступці, невелику кількість подрібненої проби переносять до фарфорової або агатової ступки і розтирають у тонкий порошок. Чим краще розтерта проба, тим повніше пройде її розчинення. Для отримання розчину розтерті в порошок проби розчиняють в  $HNO_3$  або  $HCl$ , необхідних для аналізу концентрацій. При аналізі зразків з масивною текстурою розчинення проводять прямо на поверхні штучки, капаючи на нього 1–2 краплі  $HNO_3$  або  $HCl$ . Після 2–3 254 хвилини кипіння (якщо маємо справу з карбонатними мінералами або породами) отриманий розчин разом з осадом переносять на фільтрувальний папір, розміщуючи у вигляді капель на достатній відстані одна від одної, або на предметне скло, чи фарфорову пластинку. У першому випадку розчинник реагує в порах паперу скоріше, ніж розчин речовини. У зв'язку з цим концентрація розчину підвищується в центральній частині плями. Це явище має велике значення при роботі з важкорозчинними мінералами. У другому випадку реакцію проводять після попереднього відділення розчину від осаду, що виконується за допомогою спеціального фільтрувального приладу або капіляра. При виконанні мікрохімічного опробування руди враховують чутливість і специфічність реакцій для кожного елемента. Під чутливістю реакцій розуміють таку найменшу кількість елемента, яка може бути виявлена в певному об'ємі розчинника за допомогою реактиву, що утворює з даним елементом специфічну реакцію.

### **Якісний мікрохімічний аналіз**

Якісний мікрохімічний аналіз застосовується для визначення окремих хімічних елементів і для вивчення хімічного складу руд. За його допомогою можна визначити у відбитому світлі рудні мінерали та особливо мінерали окиснених руд, які близькі за своїми оптичними і фізичними властивостями – церусит, смітсоніт, теконтит, тетраедрит та ін.

Для проведення такого аналізу готується набір реактивів, які поділяються на дві групи: розчинники і проявники. Розчинниками називають такі реактиви, які використовуються для розчинення мінералів з метою отримання розчину.

До цієї групи входять кислоти різної концентрації (фосфатна, соляна, сірчана, оцтова), царська горілка, аміак різної концентрації, перекис водню і вода. Для отримання перлів

необхідні сухі реактиви – сода, селітра, бура, фосфорна сіль і луѓи. 255 Проявниками називають реактиви, які використовуються в реакціях визначення хімічних елементів у досліджуваному розчині, наприклад, жовта кров'яна сіль використовується для визначення  $Fe^{3+}$ ,  $Mo^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $U^{6+}$ ; йодистий калій –  $Pb$ ; ртутно-роданова сіль –  $Zn$  тощо.

Якісний мікрохімічний аналіз проводиться методами: кристалоскопічним, крапельним, відбитків і забарвлення.

**Кристалоскопічний метод** оснований на властивостях хімічного елемента утворювати нерозчинні осади з проявником. Осади відрізняються забарвленням і формою кристалів. Важкорозчинні мінерали сплавляють із содою або бурою у вушку платинового дроту, а потім розчиняють в  $HCl$ . При визначенні сірки, кобальту срібла, золота, олова реакції проводять на предметному склі; свинцю, цинку, фосфору і сурми – на полірованому шліфі. Спостереження ведуться під бінокляром або мікроскопом. Пошуковий елемент визначається за кольором і особливостями кристалографічної форми.

Кристалоскопічний аналіз набув найбільш широкого застосування в практиці мінераграфічних досліджень через економію часу та матеріалів. Для таких елементів, як миш'як, сурма, сірка, фосфор, свинець, срібло, олово, частково кобальт і ртуть реакції кристалоскопічного аналізу найбільш ефективні.

Наведемо приклади реакцій кристалоскопічного аналізу [ 11, 35].

**Золото.** Мінерали золота (телуриди та ін.) розчиняють у концентрованій  $HCl$  або царській горілці. Розчин піпеткою переносять на предметне скло і випаровують насухо, після чого додають краплю  $SnCl_2$ . Випадає металічне золото або утворюється касіїв пурпур – колоїдальне золото із  $Sn(OH)_2$ . Якщо осадок розчинити з аміаком, утворюється рідина червоного кольору.

**Кобальт.** Мінерал травлять концентрованою  $HNO_3$ . Розчин переносять піпеткою на предметне скло, додають краплю фосфорної кислоти і випаровують насухо. Наносять краплю ртутнороданової солі й утворюються сині кристали подвійної роданової солі кобальту і ртуті.

**Молибден.** Порошок мінералу плавлять із фосфорною сіллю або содою і селітрою у вушку платинового дроту. Смарагдовозелений сплав розчиняють в  $HCl$  (1:1). Якщо до розчину ввести декілька крупинок ксантогенату калію – утворюється рожеве забарвлення.

**Миш'як.** Існують декілька способів визначення миш'яку:

1. Краплю досліджуваного розчину переносять на предметне скло. До розчину додають кристалик або невелику кількість порошку  $(NH)_2MoO_4$ . Через 1–2 хв утворюється жовтий дрібнокристалічний осадок  $(NH_4)_3 \cdot AsO_4 \cdot 12MoO_3$ .

2. Мінерал на аншліфі травлять концентрованою  $HNO_3$  і на протравлене місце кладуть суху сіль  $(NH)_2MoO_4$ . Через 1–2 хв утворюється жовтий дрібнокристалічний осадок.

3. У тигель наливають декілька крапель досліджуваного розчину і розбавленої  $HCl$ , додають декілька зерен цинку або порошок магнію. Закривають воронкою, на яку кладуть кружок фільтрувального паперу, змочений розчином азотнокислого срібла. Під дією  $AsH_3$  виділяється металічне срібло і фільтрувальний папір чорніє.

**Олово.** Мінерал на аншліфі протравлюють  $HCl$  (1:1) при пропусканні електричного струму. Розчин переносять на предметне скло і додають краплю  $AuCl_3$ . Випадає металічне золото або касіїв пурпур – колоїдальне золото із сумішшю  $Sn(OH)_2$ . Касіїв пурпур розчиняють 10 %  $NH_4OH$ . Розчин забарвлюється в червоний колір.

**Ртуть.** Мінерал розчиняють у концентрованій  $HNO_3$  або царській горілці й на протравлене місце наносять одну краплю  $H_2O$  і порошки  $NH_4CN_9$  і  $Co(NO_3)_2$ . Випадають сині голчасті кристали комплексної роданової солі кобальту і ртуті. У присутності заліза реакція проводиться так, як і для кобальту з добавкою  $H_3PO_4$ .

**Свинець.** Мінерал на шліфі протравлюють концентрованою  $HNO_3$  і накладають на це місце 5 % розчин  $KI$ . Утворюються жовті кристали йодистого свинцю. Селен. Існують декілька способів визначення селену.

1. Мінерал у шліфі травлять концентрованою  $HCl$  і до розчину додають  $SuCl_2$ . Випадає цегельно-червоний осад металічного селену.

2. При травленні деяких мінералів  $HNO_3$  випадає червоний осад металічного селену.



**Срібло.** Крупинку мінералу на предметному склі покривають насиченим розчином  $K_2Cr_2O_7$  і концентрованої  $HNO_3$ . Через 1–2 хв з'являються оранжево-червоні кристали  $AgCr_2O_7$ . Цю реакцію дає тільки срібло. Таку реакцію можна проводити також на полірованих шліфах, покриваючи реактивом поліровану поверхню мінералу.

**Сурма.** Існують декілька способів визначення сурми.

1. При обробці поверхні кристала антимоніту 20 % розчином  $KOH$ , мінерал розчиняється і утворюється оранжево-червоний осад сурм'яної оксисульфосолі.

2. Мінерал травлять  $HNO_3$ . Краплю знімають фільтрувальним папером. На протравлене і просушене місце обережно наносять одну краплю  $HCl$  (1:1), із двох боків краплі наносять кристалики  $KI$  і  $CsCl$ . Утворюється червоний кристалічний осад комплексної солі йодистого калію, хлористого цезію і сурми.

3. Мінерал травлять концентрованою  $HNO_3$ . Розчин набирають у вушко платиного дротика і приводять у зіткнення з механічним цинком до закінчення виділення бульбашок. Вушко платиного дротика чорніє від механічної сурми. На відміну від інших металів сурма нерозчинна в концентрації з  $HCl$ .

**Телур.** Існують декілька способів визначення телуру.

1. Мінерал розчиняють у концентрації  $HNO_3$ . Краплю знімають фільтрувальним папером. На протравлене місце наносять краплю концентрованої  $HCl$ , переносять на предметне скло та додають кристалик  $CsCl$ . Утворюються лимонно-жовті кристали комплексної солі кубічної сингонії.

2. Порошок мінералу при нагріванні з концентрованою  $H_2SO_4$  (до появи парів) забарвлює розчин у малиново-червоний колір.

**Титан.** Майже всі мінерали титану нерозчинні в кислотах. Тому для дослідження розчинів порошок мінералу сплавають з потрібною кількістю фосфорної солі або  $NaOH$ . Це можна робити двома способами:

1. Сплав мінералу з  $NaOH$  розчиняють в  $H_2SO_4$  (1:20) і до розчин по краплі додають 3 %  $H_2O_2$  – з'являється забарвлення жовтого кольору.

2. Сплав мінералу із содою розчиняють з  $HCl$ , у розчин кладуть шматочок металічного олова і доводять до кипіння. Фіолетове забарвлення розчину вказує на присутність титану. Хлор. Мінерал розчиняють в  $HNO_3$  (1:1), розчин переносять на предметне скло і добавляють краплю 5 % водного розчину азотнокислого срібла. У присутності хлору миттєво випадає білий осадок хлористого срібла.

**Фосфор.** Мінерал розчиняють у концентрації  $HNO_3$ . Розчин переносять на предметне скло і додають декілька крупинок  $(NH_4)MoO_4$ . Випадають помаранчево-жовті кристали фосфорномолібденової солі.

**Цинк.** Мінерал травлять в  $HNO_3$  або царською горілкою. Розчин переносять піпеткою на предметне скло і додають 1–3 краплі фосфорної кислоти. Обережно випаровують насухо і кладуть краплю подвійної солі родану і ртуті. Випадають білі, подібні до сніжинок, кристали подвійної солі роданистого калію, цинку і ртуті.

**Крапельний аналіз.** В основі цього аналізу лежить принцип різниці швидкостей дифузії розчинених речовин, що абсорбуються фільтрувальним папером і затримуються в його капілярах. Завдяки цьому при нанесенні краплі на фільтрувальний папір збільшується концентрація розчинених речовин на відповідних ділянках вологої плями. Така ж фільтрувальна здатність паперу дозволяє проводити виокремлення одних елементів від інших та їхню діагностику за допомогою реактивів, які дають специфічні забарвлення для кожного з елементів.

*Методика проведення аналізу така.* Досліджуваний розчин отримують шляхом розчинення мінералу на аншліфі або в зернах на предметному склі в краплі розчинника (мінерал + розчинник). Крапля досліджуваного розчину переноситься на фільтрувальний папір (фільтрувальний папір + розчин). З аншліфа крапля розчину знімається шляхом промокання фільтрувальним папером. З предметного скла крапля переноситься піпеткою. Величина плями може бути не більше 2–3 мм у діаметрі. У центр крапельної плями на фільтрувальному папері кладуть піпетку з проявником.

Утворюється кольорова пляма в центрі або кільце на периферії крапельної плями, які вказують на присутність пошукового елемента. Більшість кольорових плям після висихання зберігаються і можуть бути використані як ілюстрації до курсових і дипломних робіт. Наведемо приклади реакцій крапельного аналізу [ 11, 35].

**Ванадій.** Головна маса ванадієвих мінералів розчинна в концентрованих азотній і сірчаній (1:1) кислотах. Для отримання досліджуваного розчину зерно мінералу розтирають у ступці і розчиняють в азотній і сірчаній (1:1) кислоті протягом 1–3 хв. 259 Існують декілька способів визначення ванадію.

1. Досліджуваний розчин + оцтовокислий бензидин – утворюється синя пляма.

2. Розчин + сірчана кислота + 3 %  $H_2O_2$ . Через 1–2 хв утворюється оранжево-червона або рожево-оранжева пляма.

**Вісмут.** Усі вісмутіві мінерали легко розчинні в азотній (1:1) і соляній (1:1) кислотах. Тому для отримання розчину мінерал розтирають у ступці й розчиняють у декількох краплях цих кислот або аншліф протравлюють цими кислотами упродовж 1–2 хв. Далі можливі три варіанти аналізу.

1. Крапля цинхоніну (або хініну) з йодистим калієм + солянокислий розчин – виникає оранжево-червона пляма. Мінімум 0,14  $\mu$ , мінімальна концентрація 1:350 000. Реакції заважають мідь, ртуть і свинець. Тоді роблять так.

2. Цинхонін (або хінін) з йодистим калієм + розчин, з'являються чотири зони: а) біле центральне кільце – ртуть; оранжево-червоне кільце – вісмут; жовте кільце – свинець; буре кільце – йод. 3 Розчин (мінерал) + 10 % розчин тіомочевини – виникає жовта пляма, яка зникає при 5 % КОН.

**Вольфрам.** Майже всі мінерали вольфраму розчиняються в концентрованій азотній і соляній кислотах. Тому для отримання розчину зерно мінералу розтирають у ступці й розчиняють у декількох краплях азотної або соляної кислот (аншліф травлять).

**Ферберит і вольфраміт** не розчиняються в кислотах навіть у порошок. Їх необхідно сплавити з бурою, фосфорною сіллю або з лугом і сплав розчинити в  $HCl$  або  $HNO_3$ . Концентрована  $HCl$  + розчин, одержаний сплавленням порошку мінералу із сухим КОН і розчинений в  $HCl$  (1:1) або  $HNO_3$  (1:1) + 20 %  $KCNS$  + насичений розчин  $SnCl_2$ . Утворюється синьо-зелена пляма.

**Залізо.** Майже всі мінерали заліза розчинені в концентрованих кислотах і тому аналіз проводять дією соляної, сірчаної або азотної кислот на розтертий порошок мінералу або травленням цими ж кислотами протягом 1–2 хв. Є два варіанти реакцій.

1. Розчин (азотнокислий чи солянокислий) + 20 %  $KCNC$  – виникає червона пляма, що зникає від  $SnCl_2$ .

2. Розчин + 5 %  $K_4Fe(CN)_6$  – виникає синє забарвлення внаслідок утворення берлінської лазурі ( $Fe+3$ ). 3. Розчин + 5 %  $K_3Fe(CN)_6$  – виникає синє забарвлення внаслідок утворення трибулієвої сині ( $Fe+2$ ). 260 Золото. Усі мінерали золота розчинні в концентрованій  $HNO_3$ , тому для отримання досліджуваних розчинів крупинку мінералу розчиняють у концентрованих  $HNO_3$  або  $HCl$  і розбавляють до концентрації 1:1. В аншліфі поверхня мінералу розчиняється в царській горілці протягом 1–2 хв. Використовують розчин і оцтовокислий бензидін. З'являється синє забарвлення.

**Кобальт.** Усі мінерали кобальту досить легко розчинні в азотній і соляній кислотах. Для отримання розчину крупинку мінералу розтирають у порошок і розчиняють в  $HNO_3$  (1:1) або  $HCl$  (1:1). Є чотири варіанти реакцій.

1. Розчин + 1 % спиртовий розчин рубанової кислоти – утворюється жовте забарвлення.

2. Розчин (краще оцтовокислий) + нітросо- $\beta$ -нафтол – утворюється цегляно-червоне забарвлення.

3. Розчин + 5 %  $K_3(FeCN)_6$  – у присутності кобальту утворюється червоно-буре забарвлення, що не зникає під дією 5 % КОН (на відміну від марганцю).

4. Розчин (азотнокислий) + 1 %  $Zn(NO_3)_2$  + ртутно-родонова сіль – утворюється смарагдово-синє забарвлення.

**Марганець.** Майже всі мінерали марганцю розчинні в  $\text{HNO}_3$  і  $\text{HCl}$ . Для отримання розчину порошок мінералу розчиняють декількома краплями  $\text{HCl}$  і  $\text{HNO}_3$ . Силікати марганцю не розчиняються в кислотах. Тому порошок попередньо сплавають з бурою, фосфорною сіллю або лугами. Перл бури з марганцем у полум'ї має червоно-фіолетовий колір, а перл фосфорної солі з марганцем забарвлений у фіолетовий колір. Можливі варіанти реакцій.

1. Мінерал розчиняють у гарячій концентрованій  $\text{HCl}$ ; розчин переносять на фарфорову пластинку і до нього додають  $\text{NaBiO}_3$ . У результаті з'являється рожеве до пурпурного забарвлення.

2. Розчин + 5 %  $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ . У присутності марганцю утворюється цегляно-червоне забарвлення, яке на відміну від кобальту стає темно-коричневим від  $\text{KOH}$ .

**Мідь.** Усі мінерали міді розчинні в концентрованій  $\text{HNO}_3$ , а деякі й у концентрованій  $\text{HCl}$ . Щоб отримати досліджуваний розчин, крупинку мідного мінералу розтирають у ступці й розчиняють декількома краплями  $\text{HNO}_3$  (1:1) або  $\text{HCl}$  (1:1). При розчиненні мідних мінералів з бурою, фосфорною сіллю або лугами отримують перли, які в полум'ї забарвлені в голубий або синій колір. В аншлафах мінерали розчиняються в 10 %  $\text{NH}_4\text{OH}$  261 або  $\text{HNO}_3$  (1:20) після попередньої обробки в парах царської горілки протягом 3–5 хв. Можливі варіанти реакцій.

1. Розчин + рубанова кислота + 10 %  $\text{NH}_4\text{OH}$  – виникає зелене забарвлення.

2. Розчин + 5 %  $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$  – утворюється рожево-коричнє забарвлення, яке змінюється при обробці 5 %  $\text{KOH}$  на голубе (на відміну від молібдену та урану).

**Молібден.** Головна маса мінералів молібдену розчинна в концентрованих  $\text{HNO}_3$  і  $\text{HCl}$ . Для отримання розчинів порошок молібденових мінералів розчиняють в  $\text{HNO}_3$  (1:1) або  $\text{HCl}$ . Молібденіт попередньо сплавають з бурою фосфорною сіллю або лугами. Сплав розчиняють в азотній (1:1) або соляній кислотах. Перл з фосфорною сіллю в полум'ї забарвлюється в зелений колір. Можливі два варіанти реакцій.

1. Розчин + 5 %  $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$  – виникає коричневе забарвлення.

2.  $\text{HCl}$  (1:1) + розчин 20 %  $\text{KCNS}$  – виникає червоно-малинове забарвлення.

**Нікель.** Майже всі мінерали нікелю розчиняються в  $\text{HNO}_3$  (1:1) і  $\text{HCl}$  (1:1). Для отримання розчину порошок нікелевих мінералів розчиняють декількома краплями  $\text{HNO}_3$  або  $\text{HCl}$  різної концентрації. Далі реакція може йти за такими схемами:

1. Розчин + диметилглюксим + 10 %  $\text{NH}_4\text{OH}$  – з'являється малиново-рожева пляма або кільце.

2.  $\text{NH}_4\text{Na}_2\text{PO}_4$  + розчин + аміак + диметилглюксим (обвести навколо краплі) – виникає малинове кільце. 3. Розчин + рубанова кислота +  $\text{NH}_4\text{OH}$  – виникає синьо-фіолетове забарвлення, при невеликій кількості нікелю утворюється рожеве забарвлення.

**Олово.** Мінерали олова дуже погано розчинні навіть у концентрованих кислотах, тому порошок мінералу попередньо сплавають з трикратною кількістю бури, фосфорної солі або лугів. Сплав розчиняють в  $\text{HCl}$  (1:1). Перл олова з бурою у відновному полум'ї характеризується рубіново-червоним кольором. Розчин +  $(\text{NH})_2\text{MoO}_4$ , насичений концентрованою  $\text{HNO}_3$  – утворюється синя пляма (аналогічна двовалентному залізу).

**Ртуть.** Мінерали ртуті погано розчиняються навіть у концентрованих кислотах. Велика леткість ртуті при нагріванні виключає можливість використовувати сплавлення мінералів з плавнями. Тому для отримання розчину порошок мінералу розчиняють на фільтрувальному папері з концентрованою  $\text{HCl}$  з добав- 262 кою декількох крапель перекису водню. Схеми реакцій:

1. 15 % розчин йодистого калію + розчин + розчин  $\text{As}_2\text{S}_3$  – утворюється оранжеве кільце йодистої ртуті;

2. Дифенілкарбазит + розчин – виникає фіолетова пляма, яка темніє від парів  $\text{NH}_4\text{OH}$ .

**Свинець.** Усі мінерали свинцю розчинні в  $\text{HNO}_3$  і  $\text{HCl}$ . Порошок мінералу розчиняють у цих кислотах і отримують необхідний розчин для дослідження. Якщо випадає металічна сірка, яка затримує розчинення, додають 1–2 кристали бертолетової солі або декілька крапель йодистого свинцю. Є два варіанти реакцій.

1.  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (1:20) + розчин +  $\text{H}_2\text{O}$  (промивка) +  $\text{KI}$  або  $\text{K}_2\text{S}$  (перекреслити капіляром). У першому випадку в центрі утворюється пляма йодистого свинцю; у другому – чорна пляма сірчистого свинцю.

2. Розчин + сірчаноокислотний або лужний розчин дітизону – виникає червоне забарвлення. Заважають мідь (дає жовто-коричневе забарвлення плями), ртуть (зелене), вісмут (оранжеве), олово (пурпурночервоне), торій (червоне), цинк (пурпурно-червоне).

**Селен.** Майже всі мінерали селену розчинні в концентрованій  $\text{HNO}_3$ . Порошок селенового мінералу розчиняють в  $\text{HNO}_3$  (1:1). У полірованому шліфі цієї ж кислотою травлять протягом 1–2 хв. Розчин + 10 % тіомочевина – виникає червоне забарвлення. Срібло. Майже всі мінерали срібла, які розтерті в порошок, розчиняються в  $\text{HNO}_3$  (1:1). Схема реакції: 20 %  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  + розчин +  $\text{NH}_4\text{OH}$  (розчин у центрі затримати) + оцтова кислота – утворюється коричнево-червона пляма хромовоокислового срібла. Заважає мідь, яка дає синьо-фіолетове забарвлення, залізо – зелене.

**Сурма.** Усі мінерали сурми розчинні в концентрованій  $\text{HNO}_3$ . Тому для отримання розчину порошок мінералу розчиняють в  $\text{HNO}_3$  (1:1) або  $\text{HCl}$  з добавкою по краплі 10 % розчину  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Схема реакції: фосфорно-молібденова кислота (насичений розчин) + розчин + пари води. З'являється інтенсивне синє забарвлення внаслідок відновлення молібдену з утворенням молібденової сині.

**Телур.** Усі мінерали телуру розчинні в  $\text{HNO}_3$ . Тому для отримання розчинів порошок мінералів розчиняють в  $\text{HNO}_3$  (1:1) або  $\text{HCl}$  з добавкою крапельок 10 %  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Схема реакції: розчин + 10 %  $\text{CsCl}$  +  $\text{HCl}$  (концентрована) + 5 %  $\text{KI}$  (обвести навколо плями) – утворюється чорне кільце.

**Титан.** Майже всі мінерали титану нерозчинні в кислотах. Тому для досліджуваних розчинів порошок мінералів сплавляють з потрібною кількістю фосфорної солі або сухим  $\text{NaOH}$ . Перл із фосфорною сіллю безбарвний, при добавці олова стає фіолетовим, а невелика кількість заліза забарвлює його в кроваво-червоний колір. Для отримання препарату сплав розчиняють в  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (1:4). Деякі мінерали (ільменіт) досить добре розчиняються в  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (1:1) з добавкою декількох крапель 10 %  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Схема реакції: розчин + хроматронова кислота – виникає червоно-буре забарвлення. Заважає залізо (зелене забарвлення), золото (чорне) і ртуть (жовте).

**Уран.** Усі мінерали урану розчинні в  $\text{HNO}_3$  і тому порошок мінералу розчиняють в  $\text{HNO}_3$  з утворенням відповідного розчину. Схема реакції: розчин + 5 %  $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$  – утворюється коричнева пляма.

**Хром.** Усі мінерали хрому важко розчиняються навіть під дією електричного струму і тому порошок мінералу сплавляють із чотирма частинами соди і двома частинами  $\text{KNO}_3$  у вущку платиного дротика. Сплав зеленого кольору розчиняють на предметному склі у воді, підкисленій оцтовою кислотою. Додають порошок  $\text{Na}_2\text{O}_2$  +  $\text{NaOH}$ , після чого розчин разом з осадом переносять на фільтрувальний папір. Можливі варіанти реакцій: 1. Розчин з порошком  $\text{Na}_2\text{O}_2$  +  $\text{NaOH}$  + бензидин (обвести навколо краплі) – утворюється синє кільце бензидинової сині; 2. Розчин + 5 % розчин  $\text{AgNO}_3$  – виникає коричнево-червоне забарвлення.

**Цинк.** Усі мінерали цинку розчинні в  $\text{HNO}_3$  і  $\text{HCl}$ . Порошок розчиняють в  $\text{HNO}_3$  (1:1) або в  $\text{HCl}$  (1:1). Для сфалериту до перерахованих вище розчинників додають ще декілька крапель 10 %  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Можливі реакції: 1. Розчин + 0,1 %  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  (у центрі краплі) + ртутно-роданова сіль (обвести навколо краплі) – утворюється синьо-фіолетове кільце; 2. Розчин + 5 %  $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$  – виникає помаранчево-жовте забарвлення.

**Метод відбитків.** Метод оснований на властивості хімічного елемента давати з проявником кольорові плями на фотопапері. За допомогою цього методу можна: а) виявляти за кольором відбитку наявність хімічного елемента; б) вивчити за малюнком відбитку форму виділення мінералу, будову руди і визначити якість мінералу в руді; в) підбирати певний розчинник або проявник і отримувати відбиток на фотопапері тільки даного мінералу або їхньої групи (напр., відбиток молібденіту, халькопіриту, галеніту, церуситу, смітсоніту, піролюзиту та ін.). Приготовлені таким методом відбитки можна зберігати протягом

тривалого часу і використовувати як ілюстрації у звітах, курсових і дипломних роботах (табл. 20).

**Таблиця 20**

**Приклади визначення рудних елементів методом відбиття [11, 35]**

<b>Мінерал, хімічний склад</b>	<b>Розчинник</b>	<b>Проявник</b>	<b>Результат реакції</b>
Азурит, $2\text{CuCO}_3 \times \text{Cu}(\text{OH})_2$	$\text{HNO}_3$ (1:40) або $\text{H}_2\text{SO}_4$ (1:20) протягом 2 хв	<b>Cu</b> 1,5 % $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 2,1 % рубеонова кислота + 10 % $\text{NH}_4\text{OH}$	Рожево- коричневе Сіро-зелене
Арсенопірит, $\text{FeAsS}$	$\text{HNO}_3$ (1:1) 1-2 хв.	<b>Fe</b> 5 % $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ <b>As</b>	Синє
	25 % $\text{NH}_4$ + 10 % $\text{H}_2\text{O}_2$ 30–40 с – ел. струм 2–3 хв – без струму	5 % $\text{AgNO}_3$	Жовто- коричневе, яке поступово переходить у коричневе
Борніт, $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$	10 % $\text{NH}_4\text{OH}$ – 2 хв	<b>Cu</b> 1 % рубеонова кислота	Сіро-зелене
	$\text{HNO}_3$ (1:20) – 2 хв	5 % $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ <b>Ni</b>	Синє
	$\text{HNO}_3$ (1:20) – 2 хв	1. Рубеонова кислота + 10 % $\text{NH}_4\text{OH}$ 2. Диметилглюксим +10 % $\text{NH}_4\text{OH}$	Рожево- фіолетове Малинове
Бравоїт, $(\text{Ni}, \text{Fe})\text{S}_2$	$\text{HNO}_3$ (1:20) – 2 хв	<b>Fe</b> 5 % $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ <b>Pb</b>	Синє
	Поверхню мінералу травлять концентро- ваною $\text{HNO}_3$ , про- сушують фільтрува- льним папером	5 % $\text{KI}$	Жовте
Буланжерит, $\text{Pb}_5\text{Sb}_4\text{S}_4$		<b>Bi</b>	
Вісмутин, $\text{BiS}_3$	$\text{HCl}$ (1:1) – 2 хв	1. 10 % тіомочевина; 2. Хінін +5 % $\text{KI}$ ; 3. 10 % $\text{CsCl}$ + 5 % $\text{KI}$	Жовте, Оранжеве, Червоне

Продовження табл. 20

Мінерал, хімічний склад	Розчинник	Проявник	Результат реакції
Вісмут самородний, Bi	1. HNO <sub>3</sub> (1:1) – 2 хв 2. HCl (1:20) – 2 хв	<b>Bi</b> 1. 10 % Тіомочевина 2. Хінін + 5 % KI 3. 10 % CsCl + 5 %	Жовте, Оранжеве, Червоне
Галеніт, PbS	Концентрована HCl	<b>Pb</b> 5 % KI	Жовте
Гематит, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	HNO <sub>3</sub> або концентрована HCl – 3 хв	<b>Fe</b> 1. 1,5 % K <sub>4</sub> [Fe(CN) <sub>6</sub> ] 2. 20 % KCNS	Синє, Коричнево- червоне
<b>Pb</b>			
Джемсоніт, Pb <sub>4</sub> FeSb <sub>6</sub> S <sub>14</sub>	HNO <sub>3</sub> (1:1) і просушують фільтрувальним папером	1,5 % KI + H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (1:10)	Жовте
<b>Ti</b>			
Ільменіт, FeTiO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (1:4) – 2 хв	Свіжа хромотропова кислота	Червоне
<b>Cu</b>			
Куприт, Cu <sub>2</sub> O	10 % NH <sub>4</sub> OH – 2 хв. HNO <sub>3</sub> (1:20)	1. Рубеанова кислота 2. 5 % K <sub>4</sub> [Fe(CN) <sub>6</sub> ]	Сіро-зелене, Рожево- коричнєве
<b>Cu</b>			
Мідь самородна, Cu	10 % NH <sub>4</sub> OH – 2 хв	1. Прямий відбиток 2. Рубеанова кислота	Голубе, Сіро-зелене
<b>Ni</b>			
Мілерит, NiS	HNO <sub>3</sub> (1:1) – 2 хв	1. Диметилглюксим + 10 % NH <sub>4</sub> OH 2. Рубеанова кислота + 10 % NH <sub>4</sub> OH	Малинове, Рожево- фіолетове
<b>Mo</b>			
Молібденіт, MoS <sub>2</sub>	KMnO <sub>4</sub> +KOH до появи суцільної плівки, промивають водою. HNO <sub>3</sub> (1:20)– 1–2 хв	1. K <sub>4</sub> [Fe(CN) <sub>6</sub> ] 2. Ксантогенат калію	Коричнєве, Малинове
<b>As</b>			
Миш'як само- родний, As	Концентрована HNO <sub>3</sub> + (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	Прямий відбиток	Жовте
<b>Ni</b>			
Нікелін, NiAs	HNO <sub>3</sub> (1:20) – 1 хв	1. Диметилглюксим + 10 % NH <sub>4</sub> OH 2. Рубеанова кислота + 10 % NH <sub>4</sub> OH	Малинове, Рожево- фіолетове

Закінчення табл. 20

Мінерал, хімічний склад	Розчинник	Проявник	Результат реакції
Пірит, $\text{FeS}_2$	$\text{HNO}_3$ (1:1) – 1 хв	<b>Fe</b> 1. 5 % $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 2. 5 % $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 3. $\text{KCNS}$	Синє, Коричнево- червоне
Піролюзит,	1. Оцтовокислий бензидин 2. $\text{HNO}_3$ (1:1) – 1–2 хв	<b>Mn</b> 1. Прямий відбиток 2. 5 % $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$	Синє, Оранжеве
Смітсоніт, $\text{ZnCO}_3$	$\text{HNO}_3$ (1:1) – 1–2 хв	<b>Zn</b> 1. 1 % $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ + ртутно-роданова сіль 2. 20 % $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ + ртутно-роданова сіль	Синьо- фіолетове
Сфалерит, $\text{ZnS}$	1. Травлення парами "царської горілки" до сірої плівки 2. $\text{HNO}_3 + \text{HCl}$ (1:1, конц.) 1–2 хв	<b>Zn</b> 1. 1 % $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ + ртутно-роданова сіль 2. 20 % $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ + ртутно-роданова сіль	Синьо- фіолетове, Го- лубе
Тенантит, $\text{CuAsS}_3$	Пари "царської горілки" до сірої плівки 3–5 хв; на фотопапері 10 % $\text{NH}_4\text{OH}$ – 3–5 хв Пари "царської горілки" до появи коричневої іризуючої плівки 10 % $\text{NH}_4\text{OH}$ – 1–2 хв	<b>Cu</b> 1 % рубеанова кислота	Сіро-зелене
Халькопірит, $\text{CuFeS}_4$	Пари "царської горілки" до появи коричневої іризуючої плівки $\text{HCl}$ (1:1) Аншліф травиться парами "царської горілки" 3–5 хв. На фотопапері – 3–5 хв	<b>Fe</b> $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  Рубеанова кислота	Сіро-зелене
Церусит, $\text{PbCO}_3$	$\text{HNO}_3$ (1:20) – 1–2 хв	<b>Pb</b> 5 % $\text{KI}$ ; 20 % $\text{K}_2\text{CrO}_4$	Жовте

Для аналізу відбираються нещодавно приготовлені аншлифи, пришлифовки будь-якого розміру, а також зразки керна, які старанно очищуються від пилу і плівок окиснення. Потім готується покритий тонким шаром желатину папір шляхом промивки звичайного фотопаперу (краще тонкого глянцевого) у 20 % розчині гіпосульфиту (20– 40 хв). Потім фотопапір промивають у воді, висушують, нарізають листи певного розміру і зберігають у пакетах або скляних банках. Фотопапір може бути замінений безбарвним целофаном.

Розчинення мінералу на фотопапері (фотопапір + розчинник + шліф) – одна з найбільш відповідальних операцій в аналізі. Фотопапір із желатиною плівкою змочують у розчиннику. Насичення паперу розчинником триває від декількох секунд до 1 хвилини. Надлишок розчинника прибирають за допомогою фільтрувального паперу. На підготовлений фотопапір кладуть полірований шліф і притискають до фотопаперу з метою якнайщільнішого контакту поверхонь, що притискаються. Щоб отримати реакції на хімічні елементи, які входять до складу рудоутворювальних мінералів, можна використати фотопапір, оброблений відповідними реактивами. Після попередньої обробки розчином жовтої кров'яної солі й просушки для отримання відбитку достатньо просочити папір розчинником, просушити фільтрувальним папером і привести в контакт з полірованою поверхнею керна, пришлифовки або аншлифа. По закінченні певного попередньо встановленого часу вдається отримати контактні відбитки без проявлення на закисне залізо, мідь, молібден, уран.

Якщо папір обробити розчином ртутнорудеанової солі та азотнокислим розчином цинку, то для отримання відбитку достатньо просочити її азотною кислотою (1:1) і привести в контакт з поверхнею керна, пришлифовки чи аншлифа, і тоді через 2–3 хв можна отримати відбиток на кобальт, цинк та ін.

Деякі мінерали (галеніт, халькопірит, каситерит, хроміт та ін.) нерозчинні або важко розчинні в кислотах і лугах і вимагають попередньої підготовки перед травлінням на фотопапері. Наведемо декілька прикладів.

Халькопірит перед травлінням обробляють протягом 2–3 хв над парами "царської горілки" до отримання тьмяної сірої плівки  $\text{CuCl}_2$  на полірованій поверхні мінералу. Після травління мінералу в парах царської горілки аншлиф щільно притискають до фотопаперу, змоченого розчином аміаку. Травління продовжується 5 хв. Потім фотопапір проявляють у рубеановій кислоті. З'являється відбиток сіро-зеленого кольору.

Деякі мінерали перед травлінням на фотопапері попередньо підлягають суцільному травленню. Наприклад, зразок або аншлиф з галенітом занурюють полірованою поверхнею в концентровану  $\text{HNO}_3$  на 1 хв. На галеніті утворюється плівка сірого кольору нітрату свинцю. Потім зразок обережно промивають водою, висушують на фільтрувальному папері й кладуть на фотопапір, змочений 5 % розчином KI. Моментально з'являється відбиток йодистого свинцю жовтого кольору.

Для проявлення відбитку використовують фотопапір і проявник. Отриманий відбиток у сирому вигляді занурюють у реактив-проявник (рубеанова кислота, йодистий калій, розчин жовтої солі та ін.). Після проявлення на фотопапері з'являється кольоровий відбиток, що відповідає площі мінералу, який містить даний хімічний елемент.

Кожного разу після проявлення відбиток промивають у воді впродовж 1–3 хв. Потім відбиток просушують, обрізають і наклеюють у відповідний текст. Відбитки можна з успіхом отримувати з керна бурових свердловин. Керн тісно завертають у фотопапір, просочений розчинником. Таким самим чином виготовляють відбитки з пришлифовок, аншлифів і керна руди, в яких наочно можна показати наявність відповідних хімічних елементів, кількість рудного мінералу, розміри його виділень і структурно-текстурні особливості будови руди.





# ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

## Механічні властивості мінералів

Поведінку мінералу в разі деформації описують закони фізики; вона визначена силою зв'язків, кристалічною структурою та поверхневими властивостями мінералу.

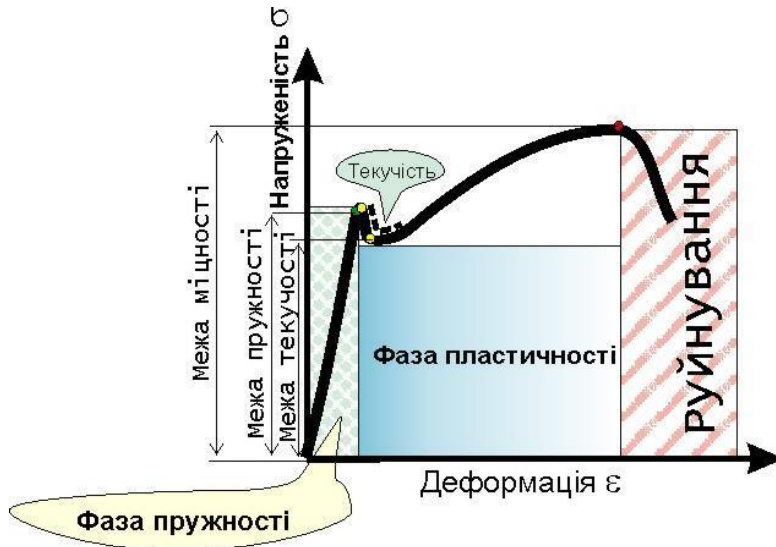


Рис. 1. Схема поведінки мінералу в разі деформації

Пружність, пластичність, крихкість, в'язкість – параметри міцності, відірності руйнуванню. Механічні властивості виявляються в разі деформації мінералу, прикладення до нього певних механічних зусиль.

З наростанням зовнішніх зусиль (стресу), прикладених до зразка, посилюється напруженість мінералу. Мінерал послідовно веде себе як пружний, пластичний, крихкий матеріал. Інтенсивне дроблення не дає змоги наростати зовнішнім зусиллям, і мінерал знову переходить у пластичний стан (подрібнена порода починає повзти, текти; формування мілонітів - смугастих порід розломних зон, що були «змазкою» між двома блоками кори, які рухались).

**Пружність** – зворотна деформація. Межа пружності. Залишкові пластичні деформації. Фаза плинності. **Пластичність** – поступова незворотна деформація без формування макроскопічних розривів суцільності. Розрив суцільності зразка. Межа міцності. **Крихкість** – деформація, що супроводжується втратою суцільності матеріалу.

Приклади пружних, пластичних та крихких мінералів. Пружність – діагностична ознака (флогопіт має пружні луски, хлорит та крихкі слюди – кришаться в разі згинання). Пластичність самородних металів, нікеліну, халькозину, графіту, молібденіту. Крихкі – сфалерит, галеніт, кальцит.

Механічні властивості анізотропні. Залежність механічних властивостей від типу хімічного зв'язку та складу мінералу. Вплив дефектності на пластичність та крихкість мінералу.

Фактори, що впливають на характер деформації:

- середовище (наявність води, розплав);
- температура;
- швидкість деформації;
- масштабний фактор; тип напруженості (стискування чи розтяг).

**В'язкість** – поглинання енергії до початку руйнування. Висока в'язкість полікристалічних утворень – карбонадо (тонкокристалічний алмазний агрегат), жад (тонкозернистий агрегат крихкого жадеїту), нефрит (аналогічний агрегат амфіболу).

**Міцність** – це опір руйнуванню, розриву зв'язків між атомами в структурі мінералу. Міцність не пов'язана із твердістю.

**Злам мінералу** – неправильний, раковистий, волокнистий, склоподібний, скалкуватий, горбчастий, гачкуватий, зернистий, східчастий. Природа поверхні зламу.

Крихке руйнування кристала за системою гладких кристалографічно фіксованих площин, орієнтація яких визначена напрямом мінімальної сили зв'язку між позиціями кристалічної структури, називають **спайністю**; самі ж площини, уздовж яких відбувається руйнування **площинами спайності**. Спайність паралельна до реальних граней і має свої індекси. Ступінь досконалості спайності від дуже досконалої до дуже недосконалої. Залежність спайності від складу мінералу (ряд твердих розчинів шеселіт – повеліт  $\text{CaWO}_4$  –  $\text{CaMoO}_4$ ). Подібність спайності в ізоструктурних мінералів.

Таблиця 1. Приклади мінералів з різною кількістю напрямів (площин) досконалої спайності

Тип симетрії	Характерні напрями площин спайності вздовж	Приклади мінералів із символами площин спайності
Триклінна	Пінакоїдальна	Плагіоклази {010},{001}; кіаніт {100}
Моноклінна	Пінакоїдальна і призматична	Ортоклаз {010},{001}; мусковіт і хлорит {001}; амфіболи і піроксени {110}
Ромбічна	Пінакоїдальна і призматична, <u>уздовж біпірамід</u>	Барит, целестин {001}; арагоніт {110},{010}; андалузит {110}
Тригональна	Ромбоедрична і пінакоїдальна	Кальцит, доломіт, сидерит {10 11}; брусит {0001}
Тетрагональна	Пінакоїдальна і призматична, уздовж біпірамід	Рутил {100},{110}; скаполіт {110},{100}; шеселіт {101}
Гексагональна	Базовопінакоїдальна, гексагонально- призматична	Графіт {0001}; берил {0001}; піроморфіт {10 10}
Кубічна	Октаедрична, кубічна, ромбоедрична	Галіт {100}; галеніт {100}; флюорит {111}; сфалерит {110}; пент-ландит {111}

**Окремість** – наслідок розпаду твердих розчинів (піроксен, галеніт, корунд, магнетит), перетворень з упорядкуванням структурних позицій (домішок) (піротин), двійникування (корунд). Упевнено відрізнити площини спайності та окремість можна тільки після визначення їхньої кристалографічної орієнтації та з'ясування позиції в кристалічній структурі мінералу.

**Твердість** – властивість твердого тіла, яка узагальнює пластичну деформацію, пружну деформацію і розрив. Звичайно твердість визначають як опір дряпанню (перетиранню).

Для металів і деяких мінералів (нікелін, халькозин), що є пластичними, твердість – це міра пластичної деформації. Унаслідок дряпання залишається блискучий металічний слід.

Для крихких мінералів твердість визначає розмір навантаження, потрібного для початку руйнування мінералу.

**Діагностичне значення твердості.** Відносна та абсолютна твердість. Шкала твердості за Моосом. Методи визначення абсолютної твердості. Абсолютна мікротвердість ( $\text{кг/мм}^2$ ).

Вимірювання мікротвердості – метод діагностики. Залежність між відносною (за шкалою Мооса) та абсолютною твердістю.

Відмінність твердості на поверхнях граней, спайності, вплив будови агрегату. Зв'язок твердості із кристалічною структурою мінералу. Залежність мікротвердості від складу і структурної недосконалості. Природне затвердіння в разі деформації.

### Електромагнітні властивості мінералів

**Мінерали-природні магнети** – магнетит, піротин, магеміт, камасит. Магнетні властивості мінералів виявляються в разі накладення на них зовнішнього магнетного поля. В кристалічному тілі виникає індуковане магнетне поле, за характером якого виділяють:

- **діамагнетики.** В діамагнетиках індуковане поле має протилежний напрям. Тому, при пересуванні діамагнетного тіла в напрямку зменшення сили магнетного поля, зі сторони магнетного поля виявляється слабкий опір цьому руху. *Приклади:* галіт, кальцит, кварц, польові шпати, лід;
- **парамагнетики.** В них індуковане поле збігається за напрямом із зовнішнім (є постійні магнетні диполі – атоми з неспареними електронами). Притягування, що простежується у разі зсування матеріалу в напрямі зростання інтенсивності магнетного поля, пропорційне до сили зовнішнього поля. *Приклади власне парамагнетиків:* пірит, залізовмісні силікати, берил, самородна мідь, олівіні, сидерит. Парамагнетики поділять на:
  - **феримагнетики:** магнетит, грейгіт, клінопіротин;
  - **антиферомагнетики:** гематит, гетит, гексапіротин;
  - **феромагнетики.** Наявність власного магнітного поля, що наростає у випадку накладання зовнішнього поля. *Приклади:* самородне залізо, камасит (метеоритне нікелісте залізо).

**Природа магнетності.** Зникнення магнетного моменту в разі спарювання електронів із протилежними спінами. Наявність неспареного електрона - причина магнетизму в мінералів із такими катіонами:  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{4+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{V}^{3+}$ ,  $\text{U}^{4+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Gd}^{3+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Ce}^{4+}$ .

Індукованість магнетного поля в мінералах у разі взаємодії із зовнішнім полем. Магнетний момент ( $\text{м}^3/\text{кг}$ ). Магнетна сприйнятливість.

Температурна залежність магнетних властивостей. Спадання магнетної сприйнятливості у фери- та феромагнетиків з підвищенням температури (стала Кюрі (~ 580°C для магнетиту)) та її зростання в антиферомагнетиків. Магнетні домени - ділянки з однорідною магнетною структурою. Магнетна компенсація – зворотна та незворотна.

**Вчення про геомагнетизм.** Природа та значення магнетного поля Землі. Геологічне та промислове використання магнетності мінералів – розшифровування геологічної історії Землі; геофізичні методи розшуків руд та вивчення надр; технологія переробки руд.

### Електричні властивості мінералів [1 - 4]

Електричні властивості – опір, електропровідність. Провідники, напівпровідники, діелектрики. Залежність електричних властивостей від типу хімічного зв'язку в мінералі. Ширина забороненої зони й електричні властивості.

**Мінерали-напівпровідники:** власні, домішкові (електронні та діркові) (*приклад* піриту, арсенопіриту, сфалериту). Анізотропія провідності в анізотропних мінералів. Зміна електричних властивостей залежно від температури і тиску.

**Мінерали-піроелектрики.** Виникнення електричного заряду в разі зміни температури мінералу (*турмалін*); ця властивість виявляється в нецентросиметричних мінералах уздовж полярних напрямків. У таких мінералах кінці полярної осі стають різнозарядними; відповідно, розрізняють аналогічний (+) та антилогічний (-) полюси.

**Мінерали-п'єзоелектрики.** Виникнення електричного заряду в разі прикладення до мінералу напрямленого тиску (*кварц, турмалін*); виявляється в мінералах з однією або декількома полярними осями. Практичне використання: *стабілізація частоти радіостанцій, електроосциляції кварцу в електронних годинниках, датчики тиску із кварцу (звукові локатори) і турмаліну (вимірювання сили атомного вибуху).*

## Лабораторна робота № 3-8. Визначення фізичних властивостей мінералів:

1. Класу сульфідів та їх аналоги
2. Класу галоїдів
3. Класу оксидів і гідроксидів, кисневих солей
4. Класу карбонатів та сульфатів
5. Класу хроматів та нітратів
6. Підкласу силікатів з ізольованими кремнекисневими тетраедрами
7. Підкласу силікатів ланцюжкової структури
8. Підкласу силікатів і алюмосилікатів шаруватої структури (каркасні алюмосилікати).
9. Підкласу алюмосилікатів з тривимірними кремнеалюмокисневими каркасами тетраедрів
10. Класу фельдшпатів та біоорганічних сполук.

**Мета роботи:** діагностика та визначення фізичних властивостей мінералів різних типів і класів.

**Обладнання:** зразки еталонної і робочої мінералогічної колекції, шкала твердості Мооса, лупа, соляна кислота, геологічний компас, таблиці визначення мінералів.

### **Виконання роботи:**

- теоретичне вивчення мінералогічних особливостей мінералів різних класів та вивчення еталонної колекції зразків мінералів.
- потім студент отримує коробку із зразками мінералів,
- по черзі для кожного мінералу визначає і записує в робочий зошит діагностичні ознаки;
- за допомогою заздалегідь складеного конспекту властивостей мінералів діагностує мінерали, характеризує мінеральні парагенезиси, вторинні зміни мінералів;
- в кінці заняття представляє результати виконаної роботи.

**Форма представлення результатів:** в письмовому вигляді з усним звітом, демонстрацією діагностичних ознак мінералів безпосередньо на зразках, характеристикою парагенезисів, вторинних змін мінералів, висновками про практичну цінність мінералів.

### **Приклад виконання**

#### *Зразок № 1.*

*Великокристалічний агрегат двох мінералів:*

**1. Галеніт - PbS.** Кристали величиною 0,5-1,0 см.

- Облік кристалів - ізометричний.
- Колір - свинцево-сірий.
- Колір риси - свинцево-сіра, блискуча.
- Блиск - металевий.
- Твердість - 3.
- Спайність – досконала.

**2. Сфалерит - (Zn, Fe) S.** Поодинокі зерна що, зростаються з галенітом.

- Облік кристалів - ізометричний.
- Колір - темно-коричневий.
- Колір риси - світло-бура, матова.
- Блиск - алмазний.
- Твердість - 3-4.
- Спайність – досконала.
- Під дією розведеної HCl миттєво поширюється запах сірководню.

**Висновок:** зразок складається з двох мінералів: галеніту і сфалериту. Темно-коричневий колір сфалериту свідчить про підвищений вміст в цьому мінералі ізоморфної домішки заліза. Утворення мінералів - гідротермальне. Зразок являє собою в практичному відношенні

цинково-свинцеву руду, в якій, крім свинцю і цинку, можуть міститися також срібло, золото (в галеніті), кадмій (в сфалериті).

**Список мінералів для лабораторних занять**

Підклас	Група	Представники
<b>Тип 1. Самородні елементи</b>		
<b>Клас метали</b>		
Координаційні структури з металічним зв'язком	Міді	Мідь (вітнеїт, золотиста мідь), срібло, золото (електрум, купросауліт, порпецит)
	Заліза	Феврит - телуричне залізо (космічне залізо)
	Платини	Платина (ферроплатини, поліксен, платіністий іридій)
	Осміїстого іридію	Нев'яскит, сисерскит
<b>Клас металоїди</b>		
Щільні упаковки кристалічних решіток	Миш'як, сурма, бісмут	
<b>Клас неметали</b>		
Координаційні, шаруваті, кільцеві	Алмаз, графіт, сірка	
<b>Тип 2. Сульфіди та їх аналоги</b>		
<b>Клас моносольфідів</b>		
Координаційної структури	Халькозину	Халькозін
	Піротину	Піротин, Нікелін, Пентланд
	Сфалериту-вюртциту	Сфалерит, вюртцит, галеніт
	Борніту	Борніт, халькопірит, станін
Кільцеві	Реальгару	Реальгар
Ланцюжкові	Мілериту	Мілерит
	Кіноварі	Кіноварь, метацинабарит
	Антимоніту	Антимоніт, бісмутин
Шаруваті	Ковеліну	Ковелін
	Аурипігменту	Аурипігмент
Каркасної структури	Аргентиту	Аргентит
<b>Клас сольфосолі</b>		
Острівні	Піриту-марказиту	Пірит, марказит
	Спериліту	Спериліт
	Кобальтину	Кобальтин
	Арсенопіриту	Арсенопірит
	Льолінгіту	Льолінгіт
Шаруваті	Молібденіту	Молібденіт
<b>Клас сульфосолі</b>		
Острівні	Енаргіту	Енаргіт
	Бляклих руд	Тетраедрит, тенантин
Ланцюжкові	Буланжериту	Буланжерит, джемсоніт
<b>Тип 3. Галоїди</b>		
<b>Клас фториди</b>		
Координаційні	Флюориту	Флюорит, криоліт
<b>Клас хлоридів</b>		
Координаційні	Галіту	Галіт - кам'яна сіль, сильвін (сильвініт)

	Карналіту	Карналіт, бішофіт
<b>Тип 4. Кисневі сполуки Клас оксиди та гідроксиди</b>		
Координаційної структури	Уранініту	Уранініт, цинкіт,
	Шпінелі	Шпінель, хромшпінеліди, магнетит (титаномагнетит, хромомангнетит), Хризоберилл (олександрит)
	Корунду-ільменіту	Корунд (лейкосапфир, сапфір, рубін, наждак) Гематит, Ільменіт
Каркасні	Кварцу	Кварц (гірський криштал, аметист, димчастий кварц або раухтопаз, моріон, цитрин, рожевий, блакитний, молочний кварц, халцедон (агат, онікс, сердолік, празем, хризопраз, карнеол)) α-кварц, β-кварц, β-тридимит, β-кристобалит, Опал (благородний опал, гідрофан, гіаліт, празопал, яшмовий, полум'яний), Стішовіт
Ланцюжкові	Куприту	Куприт
	Рутилу	Рутил, Касситерит, піролюзит
	Гетиту	Гетит, діаспор (боксит)
	Лепідокрокіту	Лепідокрокіт, беміт
	Псиломелану	Псиломелан
Шаруваті структури	Бруситу	Брусит (феробрусит, манганобрусит)
	Гідраргіліту	Гібсид
<b>Клас силікати та алюмосилікати</b>		
Силікати з ізольованими тетраедрами [SiO <sub>4</sub> ]	Олівіну	Форстерит, олівін, фаяліт, кнебеліт, тефроїт
	Фенакіту	Фенакіт, вілеміт
	Граната	Гроссуляр, андрадит, уваровіт, демонтоїд, альмандин, спесартин, піроп, меланіт
	Циркону	Циркон, торит
	Дистену	Дістен (кіаніт), андалузит, силіманіт
	Ставроліту	Ставроліт
	Титаніту (сфену)	Титаніт (Сфен)
	Датоліту	Датоліт
	Топазу	Топаз
Острівні орто- і діортосилікати	Тортвейтіту-геміморфіту	Тортвейнтит, геміморфіт (каламін)
	Бертрандіту	Бертранд
	Епідоту	Епідот, цоїзит, ортит
	Астрофіліту	Астрофіліт
Кільцеві силікати	Берилу	Берил (смарагд, аквамарин, геліодор)
	Кордіериту	Кордіерит
	Діапазу	Діапаз

	Евдіаліту	Евдіаліт
	Турмаліну	Турмалін (шерл, ахроїт, рубеліт, верделіт, індиголіт, дравіт)
Ланцюжкові мета- і диметасилікати	Ромбічних піроксенів	Енстатит, гіперстен
	Моноклінних піроксенів	Діопсид, геденбергіт, авгіт
	Лужних піроксенів	Жадеїт, егірін, сподумен
	Піроксеноїдів	Волостаніт, родоніт
Стрічкові (з подвійними аніонними ланцюжками)	Амфіболів	Антофіліт, кумінгтоніт, тремоліт, актиноліт
	Рогової обманки	Рогова обманка, арфведсоніт
Шаруваті силікати (з безперервними шарами тетраєдрів)	Серпентиніту	Серпентин
	Каолініту	Каолініт, дикіт, накрит
Аморфні мінерали, близькі до шаруватих силікатів	Алофану	Алофан
Силікати з тришаровими пакетами	Тальку	Тальк, пірофіліт
	Слюд	Мусковіт, біотит, лепідоліт, цінвальдит
	Тендітних слюд	Маргарит (перлова слюда), Хлоритоїд
	Гідрослюд	Гідробіотит, гідромусковіт, вермикулит, глауконіт
	Монтморилоніту	Монтморилоніт, бейделіт
Силікати з чотиришаровими пакетами	Хлоритів	Пенін, клінохлор, прохлорит
	Залізистих хлоритів	Шамозит, тюрингіт
Каркасні силікати з тривимірними каркасами	К-на польового шпату	Альбіт, санідин, ортоклаз, мікроклін, анортотлаз
	Плагіоклазу	Альбіт, олігоклаз, андезин, лабрадор, бітовніт, анортит
	Гіалофану (К-Ва польові шпати)	Цельзін
	Скаполіту	Скаполіт
Фельдшпатоїди	Нефеліну	Нефелін
	Лейциту	Лейцит, анальцим, полуцит
	Канкрініту	Канкрініт
	Содаліту	Содаліт, лазурит, гельвін
Цеоліти	Натроліт	Натроліт, сколецит
	Шабазиту	Шабазит
<b>Клас карбонатів</b>		
Острівні, безводні	Кальциту	Кальцит (ісландський шпат, кальцитовий онікс), магнезит, сидерит, смітсоніт
	Доломіту	Доломіт
	Арагоніту	Арагоніт, стронціаніт, вітерит, церусит
З додатковими аніонами	Малахіту	Малахіт, азурит



Водні карбонати	Содових мінералів	Натрит, термонатрит, сода (натрон), трона, дафсоніт
<b>Клас фосфатів, арсенатів та ванадатів</b>		
Безводні фосфати	Монациту	Монацит
	Апатиту	Апатит, піроморфіт
Водні фосфати і їх аналоги	Вівіаніту	Вівіаніт (керченіт), еритрин (кобальтові квіти), анабергіт (нікелеві квіти)
	Скородиту	Скородит
	Бірюзи	Бірюза
	Уранових слюдок	Торберніт, отуніт, тяюманіт, карнотит
<b>Клас боратів</b>		
Шаруваті	Сасоліну	Сассолін (борна кислота)
Каркасні	Борациту	Борацит
Ланцюжкові	Людвігіту	Людвігіт, бура, ашарит
Острівні	Гідробарациту	Гідроборацит, колеманіт
<b>Клас сульфатів</b>		
Прості безводні сульфати	Тенардиту	Тенардит
	Бариту	Барит, целестин, англезит
	Ангідриту	Ангідрит
Прості водні сульфати	Гіпсу	Гіпс (алебастр)
	Мірабіліту	Мірабіліт (глауберова сіль)
	Купоросов	Епсоміт, халькантит, мелантерит
Складні сульфати з додатковими аніонами	Алуніту	Алуніт, ярозит
<b>Клас вольфраматів і молібдатів</b>		
Острівні	Молібдатів	Повеліт, вульфеніт
Ланцюжкові	Вольфраматів	Вольфраміт, шееліт (купрошееліт)
<b>Клас хроматів</b>		
Острівні	Крокоїту	Крокоїт
<b>ТИП БІООРГАНІЧНИХ СПОЛУК</b>		
	Бітуми, смоли солі органічних кислот поширені у природі, але мало вивчені внаслідок складної хімічної конструкції	Озокерит (парафін), ювеліт, меліт, бурштин, кертисит.ю карпатит, янтар