

Національна академія наук України  
Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка

**ЦІЛЬМАК ОКСАНА ВАСИЛІВНА**

УДК 553.411.08(477.62)

**МІНЕРАЛОГО-ГЕОХІМІЧНА МОДЕЛЬ БОБРИКІВСЬКОГО  
ЗОЛОТОРУДНОГО РОДОВИЩА**

04.00.20 – Мінералогія, кристалографія

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата геологічних наук

Київ – 2016

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Львівському національному університеті імені Івана Франка  
МОН України

**Науковий керівник:** кандидат геолого-мінералогічних наук, доцент  
**Скакун Леонід Зіновійович**,  
Львівський національний університет  
імені Івана Франка МОН України, м. Львів,  
завідувач кафедри мінералогії

**Офіційні опоненти:** доктор геологічних наук, професор  
**Деревська Катерина Ігорівна**,  
Національний науково-природничий музей НАН  
України, м. Київ,  
завідувач відділу «Геологічний музей»

кандидат геологічних наук,  
старший науковий співробітник  
**Бондаренко Сергій Миколайович**,  
Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення  
ім. М.П. Семененка НАН України, м. Київ,  
старший науковий співробітник  
відділу геології та геохімії рудних родовищ

Захист відбудеться “ 28 ” грудня 2016 року о 14<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої  
вченої ради Д 26.203.01 в Інституті геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П.  
Семененка НАН України за адресою: пр. Акад. Палладіна, 34, м. Київ-142, 03680.  
Тел./факс: +38 (044) 424-12-70. Електронна пошта: [office.igmr@gmail.com](mailto:office.igmr@gmail.com),  
[d26.203.01@gmail.com](mailto:d26.203.01@gmail.com).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту геохімії, мінералогії та  
рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України за адресою: пр. Акад. Палладіна,  
34, м. Київ-142, 03680

Автореферат розісланий “ 26 ” листопада 2016 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.203.01  
кандидат геологічних наук



І.А. Швайка

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми** дисертації пов'язана з перспективами удосконалення та розвитку методів геолого-пошукових і розвідувальних робіт в Україні з метою виявлення золоторудних об'єктів орогенного типу.

Великооб'ємні родовища орогенного типу, розміщені у вуглецевмісних теригенних товщах (Мурунтау, Сухий Лог, Бендіго та ін.), забезпечують значний внесок у формування запасів золота світу. На території України в межах Донецької металогенічної провінції розташовані золоторудні об'єкти орогенного типу, найперспективнішим з яких є Бобриківське золото-поліметалеве родовище. За останні три десятиріччя для Бобриківського родовища створено геолого-генетичну, структурно-тектонфізичну і геоелектричну моделі, у рамках яких мінералого-геохімічний аспект рудоутворення висвітлений недостатньо.

Встановлення структурно-текстурних, мінералого-геохімічних і фізико-хімічних особливостей мінералоутворення Бобриківського золото-поліметалевого родовища сприятиме виділенню комплексу ознак, необхідних для прогнозування і пошуків перспективних ділянок з новими золоторудними об'єктами орогенного типу в межах Донецької металогенічної провінції.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження, що становлять основу дисертаційної роботи, здійснювалися відповідно до тематики науково-дослідних робіт кафедри мінералогії геологічного факультету Львівського національного університету імені Івана Франка, у тому числі в рамках держбюджетних тем: Гм-122Ф «Динаміка мінералоутворення на геохімічних бар'єрах у гідротермальних рудоутворювальних системах» (№ державної реєстрації 0198U004840); Гм-39Ф «Фізико-хімічні та онтогенічні моделі в рудоутворюючих системах епітермального, стратиформного та орогенного типів» (№ державної реєстрації 0106U001278); Гм-06Ф «Мінералого-генетичні моделі гідротермальних процесів, що сприяють формуванню деяких родовищ України» (№ державної реєстрації 0109U001783); Гм-104Ф «Онтогенетичні та фізико-хімічні моделі мінеральних агрегатів як відображення динаміки гідротермальних рудоутворювальних систем» (№ державної реєстрації 0112U001269).

**Мета і завдання дослідження.** Головна *мета* дисертаційної роботи – створити мінералого-геохімічну модель Бобриківського родовища ґрунтуючись на вивченні мінералогічних особливостей золото-поліметалевого зруденіння. Основні *завдання* роботи:

1. Встановити еволюцію мінерального складу осадових порід в ході гідротермального процесу.
2. Дослідити типоморфні і онтогенічні особливості мінеральних агрегатів та індивідів.
3. Встановити позицію самородного золота у кварц-карбонат-сульфідному мінеральному агрегаті.
4. Виділити парагенетичні мінеральні асоціації і створити схему стадійності гідротермального мінералоутворення.
5. Визначити на основі мінеральних парагенезисів фізико-хімічні параметри гідротермального мінералоутворення та їхню просторово-часову еволюцію.

*Об'єкт дослідження* – гідротермальна мінералізація вкраплено-прожилкового типу в осадових породах вуглецьвмісної теригенної товщі у межах Бобриківського золото-поліметалевого родовища.

*Предмет дослідження* – текстурно-структурні особливості мінеральних агрегатів, анатомія індивідів, хімічний склад мінералів.

**Методи дослідження.** Дисертаційна робота головно спрямована на вивчення мінералогічних особливостей і онтогенезу мінеральних агрегатів кварц-карбонат-сульфідних жил та вкрапленої мінералізації Бобриківського родовища. Головна увага зосереджена на мінералогічних дослідженнях, які полягали у з'ясуванні послідовності утворення мінералів та особливостей їхнього хімічного складу, вивченні внутрішньої будови індивідів рудних і нерудних мінералів. Окремо досліджено особливості постдіагенетичних перетворень глинистих порід теригенної товщі в межах Бобриківського родовища. Методика і види дослідницьких робіт визначені, враховуючи ступінь вивченості об'єкту.

У ході досліджень опрацьовано близько 460 проб кам'яного матеріалу у вигляді керну і близько 800 полірованих шліфів з 7 свердловин, основну частину з яких люб'язно надав старший науковий співробітник геологічного факультету ЛНУ ім. І. Франка О.Р. Литвинович. Близько 20 проб кам'яного матеріалу у вигляді керну відібрано автором на керносковищі Бобриківського родовища під час польових досліджень у 2006 році. Для порівняння мінерального складу досліджено 19 полірованих шліфів з родовища Сухий Лог.

Основними методами досліджень обрано оптичну мікроскопію у відбитому світлі і растрову електронну мікроскопію. Просторово-часові співвідношення сульфідів досліджено на рудному мікроскопі *ПОЛАМ Р-311* (415 проб), електронно-мікроскопічні дослідження (70 проб) виконані на скануючому електронному мікроскопі-мікроаналізаторі *РЕММА-102-02* у Науково-технічному і навчальному центрі низькотемпературних досліджень Львівського національного університету імені Івана Франка (аналітик Серкіз Р.Я.). Просторово-часові співвідношення сидерит/анкерит/кварц встановлено в 10 пробах керну методом зафарбовування карбонатів. Виявлення особливостей анатомії індивідів піриту і арсенопіриту здійснено методом структурного травлення (30 проб), а індивідів кварцу у семи пробах – катодолюмінесцентним імідж-аналізом на електронному скануючому мікроскопі-мікроаналізаторі *РЕММА-102-02* у режимі катодолюмінесценції (*SEM CL*) (аналітик Серкіз Р.Я.). Для встановлення магнітної неоднорідності піротину і співвідношення гексагональної і моноклінної модифікацій піротину застосовано метод магнітної порошкографії (15 проб). Рентгеноструктурний аналіз глинистих мінералів (7 проб) здійснено на дифрактометрі *ДРОН-3* у Міжкафедральній лабораторії рентгеноструктурного аналізу геологічного факультету Львівського національного університету імені Івана Франка (аналітик Дворянський А.М.). Хімічний склад мінералів встановлено мікрозондовим рентгеноспектральним аналізом (432 точки аналізу) на мікроскопі-мікроаналізаторі *РЕММА-102-02* у Науково-технічному та навчальному центрі низькотемпературних досліджень Львівського національного університету імені Івана Франка (аналітик Серкіз Р.Я.).

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Виділено та обґрунтовано часовий ряд мінеральних парагенетичних асоціацій, що є основою нової схеми стадійності гідротермального мінералоутворення Бобриківського родовища.

2. Встановлено, що кварц-карбонат-сульфідна з самородним золотом мінералізація Бобриківського родовища є результатом діяльності трьох різновікових автономних гідротермальних систем, перша з яких ініційована регіональним метаморфізмом теригенної товщі осадових порід під час етапу складчастості, дві інші – етапами тектоно-магматичної активізації.

3. Уперше досліджено еволюцію мінерального складу осадових порід в межах Бобриківського родовища під час метаморфогенного етапу перетворення теригенної товщі. Встановлено, що постдіагенетичні перетворення осадових порід досягнули зони епіметаморфізму.

4. З'ясовано, що під час складчасто-насувного етапу розвитку Головної антикліналі в межах Нагольного кряжу сформувались порфіробласти піриту і арсенопіриту, сидеритові прожилки і жили та рідкісноземельна гідротермальна мінералізація у вигляді фосфатів. Доказ гідротермального походження монациту дає можливість у перспективі зробити достовірне датування першої стадії гідротермального мінералоутворення на Бобриківському родовищі.

5. Уперше виявлено полібазит на Бобриківському родовищі. Встановлено, що полібазит входить до складу золотовмісного парагенезису, утвореного під час завершальної стадії гідротермального мінералоутворення. Отримано нові дані щодо типоморфних особливостей піриту, арсенопіриту, карбонатів, фосфатів, сульфосолей, герсдорфіту, самородного золота.

6. Доведено, що самородне золото кристалізувалось у тінях тиску перекристалізованого кварцу під час діяльності третьої гідротермальної системи. Цей факт сприятиме у майбутньому розробці інших критеріїв термобарогеохімічних досліджень флюїдних включень у мінералах Бобриківського родовища.

**Наукове і практичне значення одержаних результатів.** Встановлені закономірності формування золото-кварц-карбонат-сульфідної мінералізації на Бобриківському родовищі сприятимуть розумінню процесів функціонування гідротермальних систем орогенного типу та ефективному проведенню геолого-розвідувальних робіт у межах подібних об'єктів.

**Особистий внесок здобувача.** Результати мінералогічних досліджень особливостей мінералоутворення Бобриківського золоторудного родовища, наведені у дисертації, отримані здобувачем самостійно. Дисертанту належить збір та узагальнення опублікованих даних з питань геології, мінералогії, фізико-хімічних особливостей утворення гідротермальної мінералізації на золоторудних родовищах орогенного типу, зокрема Бобриківського і Сухий Лог. У публікаціях у співавторстві з Л.З. Скакуном [1, 2, 3, 5, 7, 8, 9, 11, 12, 13] безпосередньо дисертантом проведені мінералогічні дослідження, інтерпретація результатів та формулювання висновків. У публікаціях [4, 6, 10] за участю автора виконані збір і комп'ютерна обробка статистичних даних.

**Апробація результатів дисертації.** Результати досліджень оприлюднені на міжнародній науковій конференції “Актуальні проблеми геохімії, мінералогії,

петрології та рудоутворення” (Київ, 19-20 лютого 2009 р.); науковій конференції, присвяченій 65-річчю геологічного факультету Львівського національного університету імені Івана Франка “Стан і перспективи сучасної геологічної освіти і науки” (Львів, 13-15 жовтня 2010 р.), VIII-му з’їзді Українського мінералогічного товариства (Київ, 4-5 жовтня 2011 р.), науковій конференції, присвяченій 70-річчю Віктора Степановича Монахова “Теоретичні питання і практика дослідження метасоматичних порід і руд” (Київ, 14-16 березня 2012 р.); VIII наукових читаннях імені академіка Євгена Лазаренка, присвячених 150-річчю кафедри мінералогії геологічного факультету Львівського національного університету імені Івана Франка “Мінералогія: сьогодні і майбуття” (Львів-Чинадієве, 11-14 вересня 2014 р.); міжнародній науковій конференції, присвяченій 70-річчю геологічного факультету Львівського національного університету імені Івана Франка “Фундаментальне значення і прикладна роль геологічної освіти і науки” (Львів, 7-9 жовтня 2015 р.); науковій конференції з міжнародною участю, присвяченій 110 річниці від дня народження академіка АН УРСР Семененка Миколи Пантелеймоновича “Геохронологія та рудоносність докембрію та фанерозою” (Київ, 17-18 листопада 2015 р.).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 13 праць, 9 статей у фахових наукових виданнях і 4 тез доповідей на наукових конференціях різного рівня. Одна зі статей опублікована в журналі «Мінералогічний журнал», що входить до наукометричної бази РІНЦ.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота загальним обсягом 217 сторінок складається зі вступу, 5 розділів та висновків, 62 рисунків, 21 таблиці. Список використаних джерел містить 217 найменувань на 23 сторінках.

Автор щиро вдячний науковому керівникові канд. геол.-мін. наук, доц. Л.З. Скакуну за слушні поради, наукові дискусії та сприяння в написанні дисертації. За постійну підтримку, цінні поради та критичні зауваження дисертант особливо вдячний д-ру геол.-мін. наук, професору О.І. Матковському. За неоціненну допомогу під час виїзду на об’єкт і відбір кам’яного матеріалу під час польових досліджень автор висловлює щире подяку старшому науковому співробітникові геологічного факультету ЛНУ ім. І.Франка О.Р. Литвиновичу. У процесі виконання аналізів та оформлення матеріалів надали допомогу О.Р. Серкіз, Х.О. Галайко, А.М. Дворянський, яким автор щиро вдячний. Особлива подяка працівникам кафедри мінералогії, які допомагали, морально підтримували та сприяли виконанню і написанню дисертаційної роботи.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

Перший розділ «**Особливості гідротермальної рудоутворювальної системи у вуглецьвмісних теригенних комплексах**» висвітлює еволюцію наукових поглядів і різні концепції щодо генезису родовищ золота, розміщених у вуглецьвмісних теригенних товщах, опублікованих у працях М.І. Бородаєвського, В.І. Скаржинського, В.А. Буряка, Я.М. Белєвцева, Л.М. Овчіннікова, М.П. Єрмолаєва, В.О. Нарсєєва, Н.А. Фогельман, В.Г. Гарьковця та ін.; головну увагу приділено особливостям гідротермальної мінералоутворювальної системи золоторудних родовищ орогенного типу, приурочених до чорносланцевих товщ.

На даний час модель формування родовищ золота орогенного типу активно розвивається і обґрунтовується у працях Д. Гровса, Р. Гольдфарба, Ф. Пірайно, Є. Піткерна, Р. Ладжа та багатьох ін., спираючись на основні положення терейнової концепції у теорії мобілізму. Визначальними ознаками генетичної моделі золоторудного зруденіння орогенного типу, розробленої В. Дістлером, М. Юдовською, Р. Ладжом та ін. (на прикладі родовища Сухий Лог) є:

- Довготривалість. Історія становлення родовища тривала близько 500 млн років: осадження теригенних і вуглецьвмісних теригенно-карбонатних порід у внутрішньоконтинентальному рифті близько 800 млн років тому, регіональний метаморфізм (520 млн років тому), формування палінгенних гранітів і гідротермальних флюїдів, які спричинили рух контрастних асоціацій елементів – (Cr, Ni, Ti, Pt + Pd) і (Sn, W, Mo, Zr, Au, Ag, Zn + Pb) – 320 млн років тому.

- Багатоетапність. Процес мінералоутворення включає етапи седиментогенезу, регіонального метаморфізму, тектоно-магматичної активізації, посторогенного магматизму.

- Перервність. Процес гідротермального мінералоутворення, починаючи від формування вкрапленої мінералізації (етап регіонального метаморфізму) до виділення самородного золота (етап посторогенного магматизму), включав тривалі (іноді до 100 млн років) перерви між стадіями гідротермального мінералоутворення, внаслідок чого зв'язок між стадіями має доволі умовний характер. Накладеність різних тектонічних процесів з великим часовим відривом спонукає до думки, що стадії гідротермального мінералоутворення є радше етапами, під час яких діяли автономні гідротермальні системи.

- Накладений характер самородного золота стосовно вкрапленої сульфідної і жильної полісульфідної мінералізацій.

У другому розділі «**Геолого-мінералогічна характеристика Бобриківського золоторудного родовища**» розглянуто і підсумовано геологічні (тектонічна позиція, структура родовища, стратиграфія і характеристика вмісних порід, магматизм) та мінералогічні (мінеральний склад руд, особливості золоторудної мінералізації, гідротермальні зміни вмісних порід, параметри гідротермальної системи та рудоутворювального флюїду) особливості Бобриківського золоторудного родовища, опубліковані у працях Б.С. Панова, М.В. Бутурлінова, С.А. Галія, М.В. Курила, Ю.О. Кузнецова, М.В. Гейченка, В.В. Гордієнка, В.І. Скаржинського, В.О. Шумлянського, С.М. Бондаренка, О.В. Ємця, І.М. Зінчука, В.М. Квасниці, Є.К. Лазаренка, В.В. Бурмістрової, Т.В. Дудар, В.А. Новика, В.С. Попова, І.П. Щербаня, Л.В. Копилової, С.М. Стовби та ін.

У третьому розділі «**Методи дослідження**» викладено загальну методику й основні методи досліджень, включаючи відбір та підготовку проб. У зв'язку з недостатньою кількістю опублікованих даних щодо типоморфізму мінералів у межах Бобриківського родовища основна увага була приділена мікроскопічним, онтогенічним дослідженням та вивченню речовинного складу. Мікроскопічні дослідження включали оптичну (ПОЛАМ-Р-311) та електронну (скануючий електронний мікроскоп-мікроаналізатор РЕММА-102-02, Науково-технічний і навчальний центр низькотемпературних досліджень ЛНУ ім. І.Франка) мікроскопії. Онтогенічні дослідження включали метод зафарбовування карбонатів,

катодолюмінесцентний аналіз кварцу (електронний мікроскоп *РЕММА-102-02* у режимі катодолюмінесценції), метод структурного травлення піриту і арсенопіриту, метод магнітної порошкографії. Особливості хімічного складу мінералів досліджено мікрозондовим рентгеноспектральним аналізом (електронний-мікроскоп мікроаналізатор *РЕММА-102-02*). Ще одним напрямком дисертаційної роботи було дослідження вмісних порід. З метою встановлення ступеня епігенетичних перетворень здійснено рентгеноструктурні дослідження глинистих мінералів теригенної товщі осадових порід і розраховано індекс кристалічності іліту (ІК).

У четвертому розділі **«Типоморфізм мінералів, онтогенез мінеральних агрегатів, стадійність мінералоутворення Бобриківського родовища»** висвітлено еволюцію мінерального складу вмісних порід під час постдіагенетичних перетворень, які охоплюють процеси від катагенезу до метагенезу (низькотемпературний метаморфізм), розглянуто особливості мінерального складу жильних утворень з розділенням на пірит-арсенопіритові, карбонатні, кварц-сульфідні, халькопірит-бляклорудно-герсдорфітові мінеральні агрегати, обґрунтовано і запропоновано нову схему стадійності гідротермального мінералоутворення на Бобриківському родовищі з виділенням мінеральних парагенетичних асоціацій.

Вмісні породи Бобриківського родовища представлені теригенно-осадовою товщею, складеною відкладами кальміуської та амвросіївської світ ( $C_1^4-C_2^0$ ). Монотонній теригенно-осадовій товщі властиве часте перешарування глинистих, вуглисто-, алевро- і пісковиково-глинистих сланців з другорядними прошарками пісковиків і поодинокими та малопотужними (не більше 10 см) карбонатними прошарками. Електронно-мікроскопічні дослідження виявили наявність у вмісних породах виділень органічної речовини, рутилу і циркону, порфіробластів піриту, арсенопіриту, сидериту, анкериту, апатиту, монациту, флоренситу і ксенотиму, лусок слюди (іліту і фенгіту) і хлориту. Рентгенометричний аналіз пелітової фракції виявив породотвірні мінерали – кварц, іліт, польовий шпат (малопоширений), і засвідчив відсутність смектиту та змішано-шаруватих мінералів. Інтервал значень розрахованого індексу кристалічності іліту для вмісних порід з флангової частини Бобриківського родовища становить  $0,28-0,45^\circ\Delta$   $2\Theta$  і у межах класифікації перетворень теригенних осадових порід в інтервалі діагенез-низькотемпературний метаморфізм (Merriman, Peacor, 1999) відповідає зоні анхіметаморфізму і верхній межі зони пізнього діагенезу [8].

Слюдам з вмісних порід Бобриківського родовища властиві варіації хімічного складу [8]. Заповненість міжпакетного простору одновалентними катіонами змінюється в межах від 0,66 до 1 ф.о., частина  $K^+$  (до 0,27 ф.о.) заміщується  $Na^+$ . За даними А. Менье і Б. Вільде (Meunier, Velde, 1989), слюда, у якої заповненість міжпакетного простору складає менше 0,87 ф.о. відноситься до іліту, якщо більше – до мусковіту. Вміст FeO і MgO у слюдах з Бобриківського родовища змінюється в межах 0,7-6,98 ваг.% і 0,66-3,07 ваг.%, відповідно, що на діаграмах (Fe+Mg) vs Si проявляється загальним зміщенням точок аналізів до висококремнієвої області, яка відповідає мусковіт-фенгітовій частині ізоморфного ряду мусковіт-селадоніт.

Вкраплена мінералізація на Бобриківському родовищі представлена ідіоморфними (пірит, арсенопірит), гіпідіоморфними (сидерит, анкерит, флоренсит)



і ксеноморфними (монацит, ксенотим) кристалами з чисельними включеннями мінералів вмісної породи, що зумовлює пойкилітову внутрішню будову вкраплеників. За переважанням у розмірі і чітким виокремленням у тонкозернистій матриці вмісної породи вкрапленики віднесено до порфіробластів. Методом структурного травлення порфіробластів піриту і арсенопіриту доведено формування порфіробластів у процесі метаморфізму осадової товщі (стадії ката-метагенезу) внаслідок заміщення вмісної породи [8, 9], що відповідає механізму утворення метакристалів.

Формування порфіробластів сидериту (розміром до 1,2 мм), ксенотиму, монациту і флоренситу відбулось під час метагенезу, доказом чого є формування паралельно-тичкуватих агрегатів сидериту у тінях тиску метакристалів піриту і арсенопіриту й сингенні зростки сидериту з ксенотимом, флоренситом і мусковіт-фенгітом. Типоморфною особливістю сидериту з вмісних порід Бобриківського родовища є вміст MgO і MnO у межах 5-18 і 0,4-10 ваг.% відповідно.

Зони розвитку фосфатів у вмісних породах Бобриківського родовища розташовані у смузі шириною до 0,5 мм від карбонатних прожилків і жил [13]. У порфіробластах флоренситу, ксенотиму і монациту (розміром до 800 мкм) спостерігаються сингенні включення апатиту (розміром до 20 мкм) і протовключення циркону й рутилу. Ширина зони розвитку порфіробластів анкериту (розміром до 100 мкм) не перевищує 10 см у напрямку від карбонатних прожилків [8].

Різновікові етапи деформацій на Бобриківському родовищі фіксуються за структурно-текстурними особливостями мінеральних агрегатів, відсутністю ознак перетинання жил. Визначальною ознакою для формування жильних мінеральних агрегатів Бобриківського родовища є механічні властивості осадової товщі, карбонатних агрегатів жил та кварцових мінеральних агрегатів. Завдяки тому, що карбонатні жили були найбільш крихкими, формування жильних мінеральних агрегатів за участі кварцу під час подальших етапів деформацій відбувалося по карбонатних прожилках, у місцях найшвидшого розвантаження тектонічних напружень [1, 3].

Найбільш ранніми проявами мінералізації на Бобриківському родовищі є пірит-арсенопіритові мінеральні агрегати у вигляді порфіробластів. Часто порфіробласти розташовані вздовж кліважних тріщин, утворюючи таким чином прожилкоподібні агрегати, орієнтовані як субпаралельно так і перпендикулярно до шаруватості порід. Потужність таких прожилків рідко перевищує 3 см. Характерною особливістю пірит-арсенопіритових прожилкоподібних агрегатів є орієнтація головок індивідів піриту та арсенопіриту у сторону вмісної породи, що зумовлює гребінчасту конфігурацію контакту прожилка з вмісною породою. У межах прожилкоподібних агрегатів пірит і арсенопірит росли одночасно, про що свідчить індукційна границя між ними. Основними домішками у піриті за результатами мікрозондового рентгеноспектрального аналізу є As (4,55 ат.%), Ni (до 2,17 ат.%) і Co (до 0,47 ат.%). У арсенопіриті основними домішками є Co (до 1,03 ат.%) і Ni (до 0,95 ат.%). Для жильного арсенопіриту властиві значні коливання вмісту As в межах 26,52-32,72 ат.% з незначним максимумом у інтервалі 29,5-32,0 ат.%, в той час як для метакристалів арсенопіриту основна кількість значень складає інтервал 27,5-29,5

ат.% As. За вмістом Co і Ni метакристалічний і жильний арсенопірити майже не відрізняються. Зроблено висновок про те, що вкраплення піриту й арсенопіриту у вигляді метакристалів і пірит-арсенопіритові прожилкоподібні агрегати складають єдину прожилково-вкраплену мінералізацію сульфідної стадії, у межах якої мінералоутворення відбувається в умовах стиснення і зсуву, без вільного простору [9].

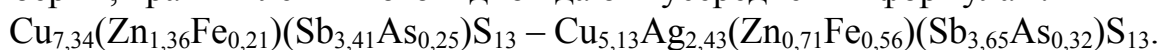
У сидерит-сульфідних прожилках сидерит займає призальбандові ділянки і представлений паралельно-тичкуватими або паралельно-волокнистими агрегатами від медово-жовтого до світло-сірого кольору, складеними індивідами довжиною 0,2-2,0 см. Сидерит утворює індукційні границі з апатитом, монацитом, ксенотимом і мусковіт-фенгітом. Участь сидериту у будові тіней тиску в зальбандових частинах пірит-арсенопіритових прожилкоподібних агрегатів та формування сигмаподібних сидерит-сульфідних прожилків, виповнених паралельно-тичкуватим агрегатом, вказує на утворення у режимі пластичних деформацій. Мікроскопічні дослідження засвідчили, що формування жильних агрегатів сидериту по системі тріщин супроводжувалося перекристалізацією пірит-арсенопіритових агрегатів та утворенням нових генерацій піриту й арсенопіриту [3]. Головними ізоморфними домішками у сидериті з жильних агрегатів є MgO і MnO, вмісти яких коливаються в межах 0,05-19,84 і 0,05-11,71 ваг.% відповідно. Порівняння хімічного складу сидериту жильних агрегатів і порфіробластів сидериту засвідчило, що основна маса порфіробластів сидериту має вузький інтервал значень вмісту MgO (5-18 ваг.%), ніж сидерит з жильних агрегатів. За вмістом MnO порфіробласти сидериту і жильний сидерит також відрізняються: порфіробласти сидериту містять незначну кількість MnO (переважно до 4 ат.%), в той час як для сидериту з жильних агрегатів властиві значні варіації вмісту Mn (до 18 ат.%). Зроблено висновок про те, що нижча активність  $Mn^{2+}$  і  $Fe^{2+}$  у флюїді, рівноважному з осадовими породами, порівняно з активністю цих компонентів у флюїді, який рухався по тріщинах, вказує на те, що джерелом  $Mg^{2+}$  були вмісні породи, в той час як  $Mn^{2+}$  і  $Fe^{2+}$  привносилися розчином.

Етап крихких деформацій карбонатних жил на Бобриківському родовищі фіксується формуванням кварц-полісульфідних жильних агрегатів, які самостійно майже не зустрічаються, проте беруть участь у будові деформованих сидерит-сульфідних агрегатів. У деформованих сидерит-сульфідних агрегатах формування агрегату піротин-сфалерит-галеніт-анкерит супроводжується інтенсивним заміщенням сидериту анкеритом та розчиненням піриту й арсенопіриту. Методом зафарбовування карбонатів і растрової мікроскопії досліджено вікові співвідношення між нерудними мінералами жильних агрегатів Бобриківського родовища [3]. На основі аналізу границь між сидеритом, анкеритом і кварцом встановлено, що процеси заміщення сидериту та анкериту кварцом контролюються зонами крихких деформацій сидерит-сульфідних жильних агрегатів. Заміщення сидериту анкеритом супроводжується збільшенням пористості агрегату (пояснюється відмінністю структурних типів сидериту і анкериту) і заповненням вільного простору галенітом. Розвиток сингенних зростків анкериту і галеніту відбувається по тріщинах спайності сидериту. У більш деформованих агрегатах сидериту з'являються неконтрольовані спайністю тріщини, які також виповнені анкеритом і галенітом. Між сидеритом і анкеритом спостерігається дугоподібна

конфігурація границі, що вказує на формування анкериту шляхом метасоматичного заміщення сидериту. При заміщенні анкеритом у сидериту на границі заміщення зменшується вміст MgO (від 7,24 до 6,71 ваг.%), збільшуються вмісти FeO (від 32,08 до 33,95 ваг.%) і MnO (від 3,55 до 3,70). Границя між кварцом і анкеритом має нерівну, звивисту конфігурацію, у якій помітно вирізняються виступи і заглиблення, що свідчить про заміщення анкериту кварцом. У жильних утвореннях, майже повністю складених кварцом, завжди спостерігаються релікти анкериту та сидериту. У фронті розвитку кварцових агрегатів утворюються пірит-сфалерит-галенітові та, починаючи з глибини ~ 600 м, піротин-сфалерит-галенітові агрегати. Встановлено, що основною домішкою у анкериті є MnO (до 10 ваг.%). Частка клінопіротину в агрегатах піротину на Бобриківському родовищі становить близько 40 %.

Катодолюмінесцентним імідж-аналізом виявлено неоднорідну будову жильних агрегатів кварцу (рис. 1), на основі чого виділено дві генерації кварцу [12]. Перша генерація представлена нерівномірнозернистим агрегатом, утвореним під час формування кварц-полісульфідних агрегатів, і складає основну частку кварцу у кварц-карбонат-сульфідних прожилках Бобриківського родовища. Індивідам кварцу властива зональність – у центральних зонах індивідів проявляється яскраве катодолюмінесцентне світіння, а в периферійних ростових зонах індивідів катодолюмінесценція проявлена у вигляді тонкої зональності або відсутня, що свідчить про зональний розподіл концентрацій елементів-домішок під час росту індивідів. Такий кварц асоціює зі сфалеритом, піротином і піритом. Під час наступного етапу деформації агрегати кварцу перекристалізуються і зональність зникає, індивіди набувають мозаїчної будови. У агрегатах деформованого кварцу, у тінях тиску навколо індивідів піриту або арсенопіриту утворюється друга генерація кварцу, у якій катодолюмінесцентне світіння слабо проявлене. У фронтальних частинах зон розвитку кварцу другої генерації спостерігаються виділення самородного золота [12].

Утворення халькопірит-бляклорудно-герсдорфітових агрегатів супроводжується заміщенням раніше утворених мінералів і реакційними співвідношеннями між новоутвореними мінералами. Кожний наступний новоутворений мінерал виявляє більш виразне тяжіння до тріщин за постійного їхнього поновлення, що є ознакою формування під час тектонічних рухів і постійної зміни фізико-хімічних параметрів гідротермальної системи [2]. Під час утворення халькопірит-бляклорудно-герсдорфітових мінеральних агрегатів найшвидших змін зазнає піротин, який інтенсивно заміщується халькопіритом. На горизонтах нижче 1000,0 м піротин заміщується магнетитом в асоціації з герсдорфітом, арсенистим піритом і сидеритом другої генерації. Халькопірит у свою чергу заміщується срібловмісною бляклою рудою, яка заміщується бурнонітом. На межі срібловмісної бляклої руди і бурноніту локально утворюються тетраедрит, дендритоподібний галеніт і полібазит, що свідчить про перерозподіл Ag у гідротермальній системі. Для бляклої руди Бобриківського родовища властивий широкий діапазон хімічного складу, типоморфним є вміст Ag (до 15 ваг.%) (рис. 2). Розрахунок формул показав, що блякла руда на Бобриківському родовищі є твердим розчином ряду тетраедрит-фрейбергит, крайні члени якого відповідають усередненим формулам:



Основна маса бляклої руди на родовищі представлена твердим розчином Ag-тетраедрит – фрейбергіт [8]. Тетраедрит є менш поширений, його утворення є локальним і підпорядковане реакційним взаємодіям між срібловмісною бляклою рудою і розчином, з якого формується бурноніт. Виділення тетраедриту розміром до 40 мкм спостерігаються у асоціації з самородним золотом на границі між сидеритом і кварцом. Бурноніт виповнює систему тонких тріщин у мінеральних агрегатах жил, при цьому містить численні сингенні виділення самородного золота (рис. 3). В асоціації з бурнонітом на контакті зі срібловмісною бляклою рудою спостерігаються дендритоподібні виділення галеніту другої генерації розміром до 200 мкм і полібазит у вигляді округлих виділень розміром не більше 30 мкм (рис. 4).

У складі халькопірит-бляклорудно-герсдорфітових мінеральних агрегатів, починаючи приблизно з глибини 200 м, спостерігаються дендритоподібні виділення герсдорфіту розміром до 1 мм, які просторово тяжіють до зони розвитку сидериту другої генерації на границі з піритом, сидеритом і кварцом [2]. Для виділень герсдорфіту властива неоднорідність внутрішньої будови та хімічного складу: внутрішні ділянки виділень герсдорфіту з пойкилітоподібною будовою містять сингенні включення халькопіриту і галеніту та вирізняються значними коливаннями вмістів Co і Fe до 11 ат. % (0,33 ф.о.) і 2,5 ат. % (0,07 ф.о.) відповідно, у периферійних ділянках виділень герсдорфіту відсутні включення інших мінералів, різко збільшується вміст Fe до 15 ат. % (0,45 ф.о.) і зменшується вміст Co до 0,9 ат. % (0,03 ф.о.). Співвідношення As/S у герсдорфіті змінюється в межах від 0,52 до 1,12, при цьому основна кількість значень є меншою 1. Герсдорфіт утворює індукційні границі з галенітом другої генерації і зустрічається у тісній асоціації з халькопіритом і арсенистим піритом, формуючи реакційні облямівки навколо їхніх агрегатів. Електронно-мікроскопічні дослідження засвідчили, що на границі між герсдорфітом і піритом формується пірит з зональною внутрішньою будовою. Встановлено, що зональність піриту зумовлена домішками As та Ni [2]. Характерною мінеральною асоціацією, синхронною до герсдорфіту на глибоких горизонтах, є магнетит і сидерит другої генерації у вигляді реакційних облямівок потужністю близько 200 мкм навколо піротину [11].

Досліджено просторову позицію, мінеральну асоціацію, варіації хімічного складу, форми і розмірності виділень самородного золота у жильному полімінеральному агрегаті Бобриківського родовища. Основною матрицею для виділень самородного золота є деформовані пірит-арсенопіритові мінеральні агрегати, у межах яких виділення самородного золота спостерігаються у тріщинах крихких деформацій, асоціюючи з галенітом, бурнонітом, бляклою рудою, кварцом та ін. Основними позиціями, які займає самородне золото у полімінеральному агрегаті жил є тріщини у мінералах, міжзерновий простір та інтерстиції, наростання на поверхні інших мінералів, мінеральні включення [12]. Форма виділень самородного золота звичайно підпорядкована конфігурації тріщин. Самородне золото на Бобриківському родовищі належить до пилоподібного (5-50 мкм) і дрібного (0,05-2 мм) класів. Пилоподібне самородне золото парагенетично пов'язане з бурнонітом, дрібне – з галенітом і кварцом.

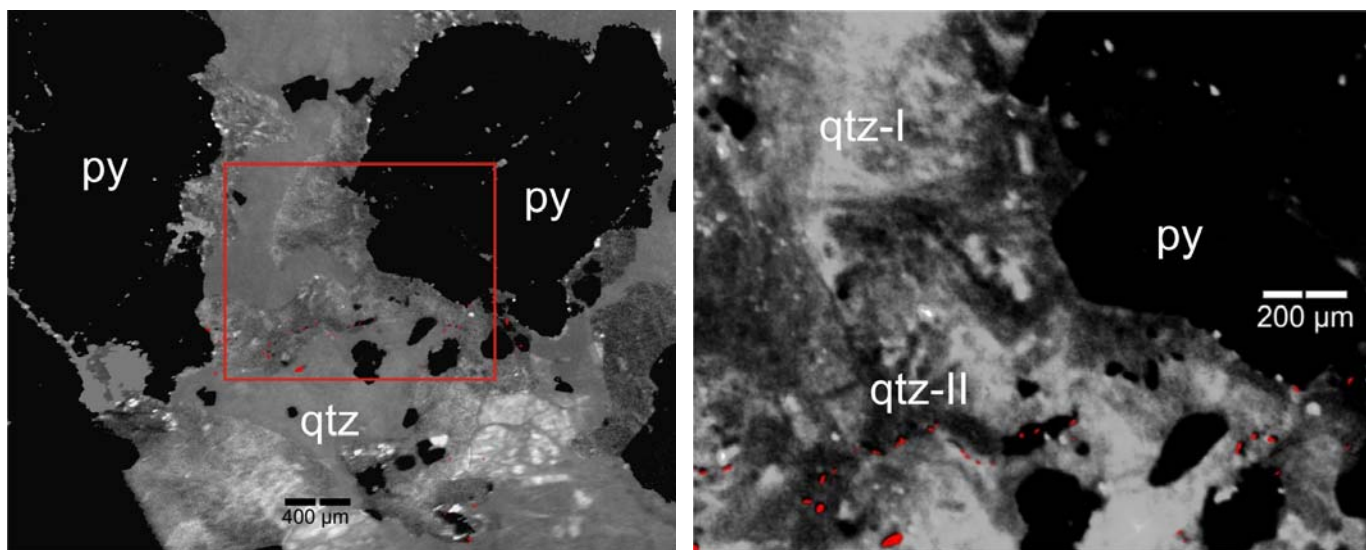


Рис. 1. Неоднорідна будова жильних агрегатів кварцу. Виділення самородного золота (позначено червоним кольором) у фронтальній частині зони розвитку перекристалізованого кварцу (qtz-II) (SEM CL), (св. 644, гл. 712,0 м).

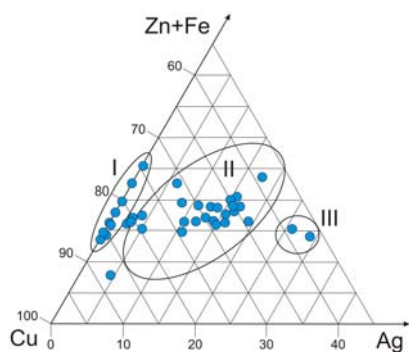


Рис. 2. Діаграма хімічного складу бляких руд з Бобрівського родовища. Римськими цифрами позначено області мінеральних видів: I – тетраедрит, II – Ag-тетраедрит, III – фрейбергит.

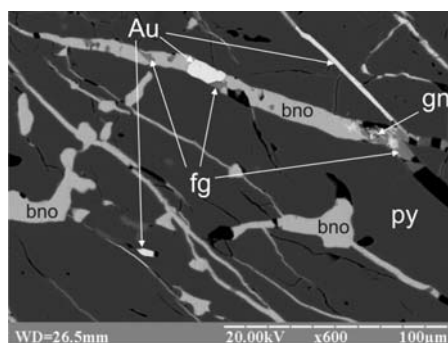


Рис. 3. Виділення самородного золота (Au) і релікти срібловмісної бляклої руди (fg) у бурноніті (bno), який виповнює тонку тріщинуватість у піриті (py) Бобрівського родовища (ЕМ, режим відбитих електронів) (св. 2Т, гл. 94,0 м).

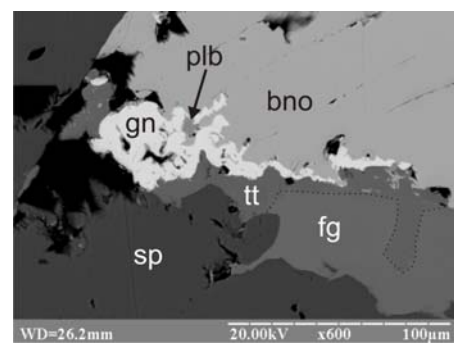


Рис. 4. Виділення тетраедриту (tt), галеніту (gn) і полібазиту (plb) на межі бурноніту (bno) і фрейбергіту (fg) (ЕМ, режим відбитих електронів) (св. 2Т, гл. 94,0 м).

Дослідження розмірності виділень самородного золота оцінено, виходячи із закономірностей теорії розподілу розмірності кристалів (CSD) (Marsh, 1988). Вказана теорія оперує поняттями “популяція” – вибірка (сукупність) кристалів у певній позиції або асоціації, і “щільність популяції” – число кристалів у межах певного діапазону розмірів. Виходячи з того, що самородне золото на Бобрівському родовищі у будь-якій з позицій у кварц-карбонат-сульфідному агрегаті асоціює з бляклою рудою, галенітом, бурнонітом або кварцом, виділено відповідні популяції. Встановлено, що для популяції самородного золота в асоціації з бурнонітом властивий найменший розмір виділень ( $< 30$  мкм) і висока щільність популяції (рис. 5). Популяція самородного золота в асоціації з кварцом має високу щільність в інтервалі розміру виділень до 40 мкм, проте зустрічаються поодинокі виділення більшого розміру (до 400 мкм). Для популяції самородного золота в

асоціації з галенітом властивий ширший інтервал розмірності виділень, плавна зміна щільності популяції і зміщений вправо пік розподілу [5]. Розмірність виділень самородного золота на Бобриківському родовищі має нормальний розподіл. Параметри популяцій свідчать про зміну ступеня перенасиченості. В умовах збірної перекристалізації спочатку утворюється пилоподібна популяція самородного золота у бурноніті, пізніше – популяція у галеніті, а наприкінці – популяція самородного золота у кварці, включаючи поодинокі виділення самородного золота дрібного класу [5].

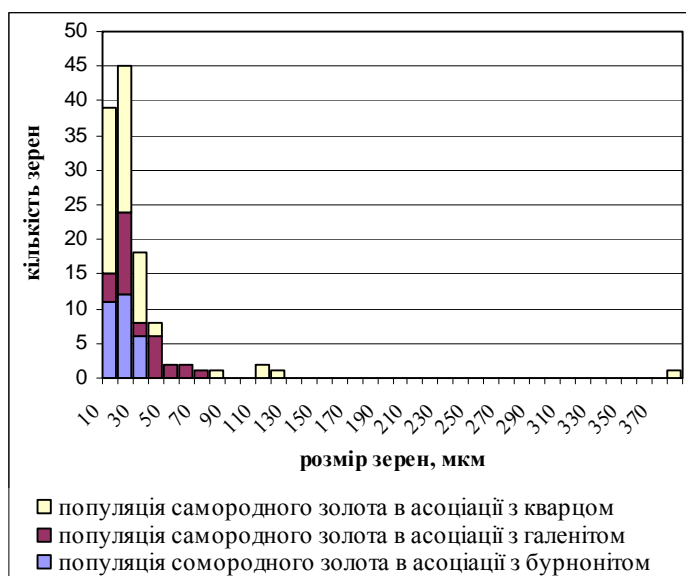


Рис. 5. Розподіл розмірності виділень самородного золота в кварц-карбонат-сульфідному агрегаті Бобриківського родовища.

Вміст Ag у популяціях самородного золота на Бобриківському родовищі коливається від 33,3 до 6,6 ат. %. Максимальні вмісти (33,3-31,5 ат.% Ag) зафіксовано у популяції самородного золота в бурноніті, а мінімальні (15,0-6,6 ат.% Ag) – у популяції самородного золота в кварці. Вміст Ag у популяції самородного золота у галеніті коливається від 25,0 до 18,0 ат. %.

На Бобриківському родовищі спостерігається вертикальний розподіл популяцій самородного золота: низькопробне самородне золото в асоціації з бурнонітом утворюється на верхніх горизонтах родовища, в той час як високопробне

золото в асоціації з кварцом і герсдорфітом поширене на глибоких горизонтах родовища. Вертикальним розподілом популяцій самородного золота на родовищі пояснюється тенденція зменшення вмісту Ag у самородному золоті зі збільшенням глибини.

На основі аналізу текстурно-структурних особливостей і основних закономірностей онтогенезу мінеральних агрегатів виділено мінеральні парагенетичні асоціації і побудовано схему стадійності гідротермального мінералоутворення на Бобриківському родовищі (табл. 1). Границі стадій гідротермального мінералоутворення фіксувались за різкою зміною у мінеральному складі агрегатів, яка передбачає корінну зміну хімічного складу мінералоутворювального розчину і за ознаками тектонічних деформацій (дроблення, формування тіней тиску). Кожна стадія гідротермального мінералоутворення супроводжується тектонічними деформаціями. Механічні властивості осадової товщі під впливом гідротермальної мінералізації змінюються. Порфіробласти піриту і арсенопіриту відіграють роль жорстких блоків у пластичній, насиченій поровим розчином, товщі осадових порід і навколо них виникають тінї тиску. Карбонатні агрегати є крихкими і відіграють роль ділянок розвантаження тектонічних

напружень. Кварцові агрегати є пластичними і тектонічні деформації реалізуються явищами перекристалізації і формуванням тіней тиску.

Послідовність мінеральних парагенетичних асоціацій, що сформувалися під час тектонічних, метаморфічних і гідротермальних перетворень теригенної товщі осадових порід в межах Бобриківського родовища, наведена у таблиці 1. У зв'язку з тим, що мінералізація на родовищі представлена прожилковим і вкрапленим типами, мінеральні парагенетичні асоціації у таблиці розділені на дві групи. Перша група мінеральних парагенетичних асоціацій представлена порфіробластичною (метакристалльною) мінералізацією (*відмічені курсивом*), друга група – мінеральні парагенетичні асоціації утворені у жильних мінеральних агрегатах (відмічені звичайним шрифтом). Процес мінералоутворення на Бобриківському родовищі поділений на три стадії: пірит-арсенопірит-сидерит-поліфосфатну, кварц-полісульфідну, кварц-халькопірит-бляклорудно-герсдорфітову. Під час кожної наступної стадії об'єм, який займають мінеральні парагенетичні асоціації порфіробластичної і жильної мінералізації у будові мінеральних агрегатів прожилково-вкрапленої мінералізації, щоразу зменшується.

Таблиця 1

Мінеральні парагенетичні асоціації у палеогідротермальній системі  
Бобриківського родовища

Стадії гідротермального мінералоутворення	Мінеральні парагенетичні асоціації ( <i>порфіробластичні, жильні агрегати</i> )
Пірит-арсенопірит-сидерит-поліфосфатна	<i>Піритова</i> <i>Пірит-арсенопіритова</i> Сидерит-апатитова <i>Ксенотим-флоренситова</i>
Кварц-полісульфідна	Кварц-пірит-сфалерит-галенітова Кварц-піротин-сфалерит-галенітова Кварц-галеніт-анкеритова <i>Анкеритова</i>
Кварц-халькопірит-бляклорудно-герсдорфітова	Халькопірит-фрейбергівта Тетраедрит-бурноніт-галенітова Халькопірит-герсдорфіт-галенітова Сидерит-магнетитова

Дослідження мінералогічних особливостей вмісних порід і жильної мінералізації з родовища Сухий Лог (РФ) засвідчили, що запропонована схема стадійності гідротермального мінералоутворення та виділені мінеральні парагенетичні асоціації на Бобриківському родовищі відображають загальну тенденцію для золоторудних родовищ орогенного типу, розміщених у чорносланцевих товщах, і у деталях повторюють послідовність виділення мінеральних асоціацій на родовищі Сухий Лог.

Процес становлення Бобриківського родовища, аналогічно до родовища Сухий Лог, вирізнявся довготривалістю і багатостадійністю. Інтерпретація результатів мінералогічних досліджень свідчить, що під час зминання у складки доволі пластичної і насиченої поровим розчином і кристалізаційною водою осадової товщі під час інверсії Донецької складчастої споруди (кінець карбонового або початок



пермського періоду) відбувалися процеси катагенезу. У пізньопермський час інверсія Донбасу набула ознак орогенезу (ранньоорогенна заальська фаза герцинського орогенезу), який, втрачаючи силу, тривав до середнього тріасу (пізньоорогенна пфальцська фаза герцинського орогенезу) (Saintot, Stephenson, Brem, Stovba, 2003). Під час катагенезу у вмісних породах відбулось перетворення смектиту у іліт, перетворення органічної речовини із виділенням сірки у розчин і як наслідок – формування фрамбоїдального піриту, утворення метакристалічної мінералізації піриту і арсенопіриту (пірит-арсенопіритова парагенетична асоціація). На стадії метагенезу у вмісних породах відбулось формування мусковіт-фенгіту, порфіробластів сидериту, синдеформаційних сидеритових (із фосфатами) жильних агрегатів (сидерит-апатитова і ксенотим-флоренситова парагенетичні асоціації), перегруповання органічної речовини (до антраксоліту, за С.А. Галієм). Карбонатні агрегати при цьому відіграли роль місць локалізації напруг всіх подальших деформацій. Таким чином, етап регіонального метаморфізму теригенної товщі осадових порід розпочався з мобілізації сірки (фрамбоїди піриту і метакристали піриту і арсенопіриту), а завершився формуванням карбонатних лужних розчинів (карбонатні жили з фосфатами). Етап тектоно-магматичної активізації ініціював зародження нової гідротермальної системи, результатом діяльності якої було утворення кварц-полісульфідної мінералізації по деформованих карбонатних агрегатах і прожилках.

П'ятий розділ **«Мінералого-геохімічна модель Бобриківського родовища»** присвячений обґрунтуванню фізико-хімічних параметрів мінералоутворюючих гідротермальних розчинів пареогідротермальної системи Бобриківського родовища на основі аналізу мінеральних рівноваг у жильних агрегатах і метасоматичних утворень у вмісних породах та узагальненні отриманих даних у вигляді мінералого-геохімічної моделі. Важливим джерелом інформації про фізико-хімічні параметри гідротермального мінералоутворення є присутність трьох сульфідів заліза (піриту, арсенопіриту, піротину) і магнетиту у рудних тілах Бобриківського родовища, зміна у часі піриту сидеритом, заміщення сидериту анкеритом, а анкериту – кварцом та ін.

У реальній термодинамічній системі по мірі перебігу гідротермального процесу встановлюються локальні рівноваги, а ступінь нерівноважності термодинамічної системи зменшується (Зарайский, 2007). При цьому термодинамічна система ніколи не досягає цілковитої рівноваги, а максимально до неї наближається. Якщо припустити, що становлення Бобриківського родовища є результатом діяльності єдиної гідротермальної системи, вкінці процесу мінералоутворення гідротермальна система була б максимально наближеною до рівноваги, що відобразилося б на структурно-текстурних особливостях мінеральних агрегатів. Проте, аналіз мінеральних парагенетичних асоціацій вказує на протилежну тенденцію, з чого випливає, що становлення Бобриківського родовища є наслідком діяльності трьох різновікових автономних гідротермальних систем, ступінь нерівноважності кожної з яких, від першої до останньої, зростає. Ступінь нерівноважності другої і третьої гідротермальних систем проявився зменшенням їхнього об'єму (звуженням і локалізацією до тріщин), що невідривно пов'язано зі зміною механічних властивостей порід під час тектонічних деформацій різного типу, які мали місце в



геологічній історії Донбасу. Дві останні гідротермальні системи діяли в градієнтному полі, де проявились виразні геохімічні градієнти.

Відсутність інтенсивних метасоматичних змін на Бобриківському родовищі під час діяльності першої гідротермальної системи, ініційованої регіональним метаморфізмом теригенної товщі осадових порід, пояснюється геохімічною рівновагою метагенного розчину з осадовими породами і низьким співвідношенням флюїд/порода. При низькому співвідношенні флюїд/порода головним чинником метасоматичних перетворень є зміна активності і концентрації того чи іншого хімічного елементу у гідротермальній системі, оскільки сам розчин з породою взаємодіє дуже слабо. Метасоматичні зміни вмісної породи на Бобриківському родовищі спостерігаються на відстані не більше 10 см від тріщини, що вказує на слабку метасоматичну переробку осадової товщі [8]. Виходячи з того, що теригенна товща осадових порід в межах Бобриківського родовища зазнала постдіагенетичних перетворень, які досягнули нижньої межі епіметаморфізму [8], фізико-хімічна рівновага порода-розчин під час діяльності першої гідротермальної системи визначається наявністю органічної речовини і мусковіту.

Перша фаза зминання теригенної товщі осадових порід в межах Бобриківського родовища призвела до розчинення хлориту і утворення метакристалічної мінералізації піриту і арсенопіриту. Електронно-мікроскопічні дослідження метакристалів піриту на Бобриківському родовищі засвідчили, що пірит утворився в осадовій породі, в якій ще існував хлорит [9]. Аутигенний кварц перекристалізовувався, змінював форму і доростав. Вибіркова приуроченість піриту і арсенопіриту до верств алевролітів і пісковиків на родовищі зумовлена варіаціями рН розчинів, рівноважних з пісковиками і алевролітами відповідно. Оскільки арсен переноситься лужними розчинами і осаджується при пониженні рН (Колонин, Пальянова, 1988), що властиве для прошарків пісковиків, то утворення арсенопіриту на Бобриківському родовищі відбувалося на геохімічному бар'єрі, яким слугували прошарки пісковиків і, відповідно, рівноважні з ними кислі розчини. У той час як сприятливими для формування піриту були лужні розчини, рівноважні з прошарками аргілітів і алевролітів.

Температуру формування пірит-арсенопіритового парагенезису оцінено за хімічним складом арсенопіриту (рис. 6). На фазову діаграму  $\log(f(S_2))$ -T винесено області значень арсенопіриту з концентрацією домішок Co, Ni, Mn і Sb меншою 0,5 ат.%, оскільки навіть незначні кількості цих елементів впливають на відношення As/S у арсенопіриті. Основна маса метакристалічного арсенопіриту містить від 27,5 до 29,5 ат.% As, що складає температурний інтервал 240-310 °C при фугитивності сульфідної сірки  $10^{-14}$ - $10^{-10,5}$  Па. Арсенопірит у складі прожилків містить 29,5-31,5 ат.% As, що відповідає температурі 310-430 °C і фугитивності сірки  $10^{-10,5}$ - $10^{-6,5}$ . Графічно отриманий температурний інтервал (240-430 °C) формування арсенопіриту Бобриківського родовища співпадає з опублікованими даними вивчення газорідинних включень (Курило, Бурмістрова, 1981).

Друга фаза зминання теригенної товщі осадових порід у межах Бобриківського родовища включала перегрупування органічної речовини, формування карбонатних паралельно-тичкуватих агрегатів, утворення метакристалічної мінералізації сидериту і фосфатів рідкісноземельних елементів у парагенезисі з мусковіт-

фенгітом [3, 13]. Заміщення хлориту слюдою і утворення карбонату свідчить про збільшення фугитивності  $\text{CO}_2$ , а також про зменшення фугитивності сірки внаслідок вироблення сульфідної сірки на утворення метакристалічної мінералізації піриту і арсенопіриту. При цьому значення фугитивності сірки залишались у полі стабільності піриту, про що свідчить доростання піриту і арсенопіриту під час утворення сидериту. Зростання співвідношення  $f\text{CO}_2/f\text{S}_2$  привело до еволюційної зміни пірит-арсенопіритового парагенезису сидерит-апатитовим і ксенотим-флоренситовим. Стабільність флоренситу зумовлена значеннями фугитивності кисню у полі активності сульфід-іону, при збільшенні парціального тиску кисню поле стабільності флоренситу зміщуватиметься у сторону лужного середовища, яке за умови високої активності  $\text{Ca}^{2+}$  призведе до формування апатиту (Gaboreau, Beaufort, Vieillard, 2005).

Під час діяльності першої гідротермальної системи середовище мінералоутворення було слабо градієнтним і переміщення золота, якщо й відбувалось, то локально. Можна припустити, що золото переміщувалось із зони з більшим рН у ділянки з меншим рН і накопичувалось у ділянках перегрупування органічної речовини.

Внаслідок діяльності другої гідротермальної системи по деформованих карбонатних мінеральних агрегатах утворилися мінеральні агрегати кварц-полісульфідної стадії. Головні рудні мінерали цієї стадії представлені піротином, сфалеритом і галенітом; жильні – кварц і анкерит. Формування порфіробластів анкериту на відстані не більше 10 см від рудних прожилків свідчить про слабку нерівноважність розчину і вмісних порід. Під час діяльності другої гідротермальної системи явища заміщення мінералів мають локальний характер і проявлені розчиненням порфіробластів сидериту і утворенням анкериту [8]. Утворення анкериту під час кварц-полісульфідної стадії зумовлено високою активністю  $\text{Ca}^{2+}$  і зростанням активності сірки. За таких умов сидерит стає нестабільним і заміщується анкеритом, який у свою чергу заміщується кварцом [3]. Геохімічним бар'єром, на якому утворився кварц, були ділянки змішування рівноважного з глинистими породами лужного розчину, який переносив ортокремнієву кислоту, і кислого розчину, який рухався по прошкарах пісковиків. Роль затравки для кристалізації кварцу відігравав кварц з пісковиків. Середовище мінералоутворення під час кварц-полісульфідної стадії мало кислу реакцію, що сприяло утворенню полісульфідів (Рафальський, Кондрашин, 1987). У ході осадження мінералів кварц-полісульфідної стадії пірит і арсенопірит перекристалізовувались, а фосфати залишались стійкими до змін параметрів середовища. Кисле середовище не сприяло осадженню самородного золота, радше відбувалося його розсіяння.

Параметри другої гідротермальної системи оцінено за особливостями хімічного складу сфалериту. Розрахована залізистість сфалериту з Бобриківського родовища складає 3-14 мол.% FeS. Ці дані й результати досліджень флюїдних включень у сфалериті, опубліковані С.А. Галієм і М.В. Курилом (Галій, Курило, 1980), визначають область формування сфалериту під час кварц-полісульфідної стадії у парагенезисі з піритом і піротином на діаграмі  $\log f\text{S}_2$ –T (рис. 7). Формування сфалериту відбувалося за фугитивності сірки  $10^{-6,5}$ – $10^{-12,5}$ .

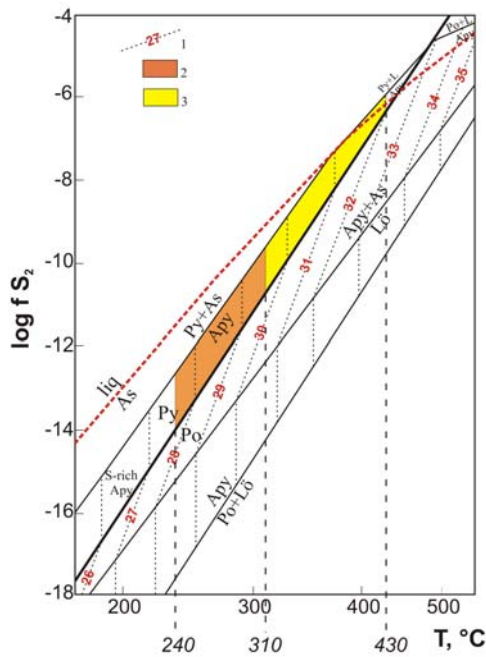


Рис. 6. Области метакристалічного (2) і жильного (3) арсенопіриту Бобріківського родовища на діаграмі стабільності арсенопіриту у координатах  $\log f(S_2)$ - $T$  з винесенням ізоплет ат.% As у арсенопіриті (1) (модифіковано за Kretchmar, Scott, 1976; Sharp, Essene, Kelly, 1985).

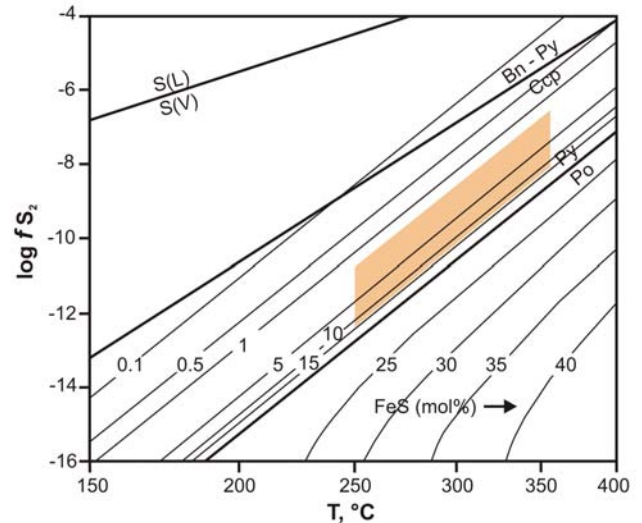


Рис. 7. Варіації вмісту FeS у сфалериті Бобріківського родовища на діаграмі  $\log fS_2$ - $T$ . Показано ізоплети мол.% FeS у рівноважному з піритом і піротином сфалериті, лінії рівноваг пірит (py)-піротин (po) і борніт (bn) + пірит (py) – халькопірит (ccp) (модифіковано за Czamanske, 1974; Scott, Barnes, 1971).

Третя гідротермальна система Бобріківського родовища характеризувалась найменшою рівновагою, внаслідок чого виникали інтенсивні геохімічні бар'єри, які проявились у вигляді реакційних співвідношень між мінералами [2]. Майже всі мінерали кварц-халькопірит-сульфосольної стадії утворилися шляхом заміщення.

Параметри гідротермального мінералоутворення під час кварц-халькопірит-бляклорудно-герсдорфітової стадії оцінено за умовами формування двох золотовмісних парагенезисів: тетраедрит-бурноніт-галенітового і халькопірит-герсдорфіт-галенітового, поширених на верхньому і нижньому горизонтах родовища відповідно. Температура формування бляклих руд Бобріківського родовища, за термометром Сека (Sack, Lynch, Foit, 2003), не перевищує 200 °C: 190-170 °C для фрейбергїту і близько 150-100 °C для Ag-тетраедриту (рис. 8).

Утворення на нижніх горизонтах родовища герсдорфіту і арсенистого піриту свідчить про дефіцит сульфідної сірки у гідротермальній системі, а утворення магнетиту у асоціації з герсдорфітом – про відновні умови середовища мінералоутворення. Одиначне спостереження ульманїту (NiSbS) в асоціації з герсдорфітом оцінено як ознаку високої концентрації Ni і низької концентрації Fe.

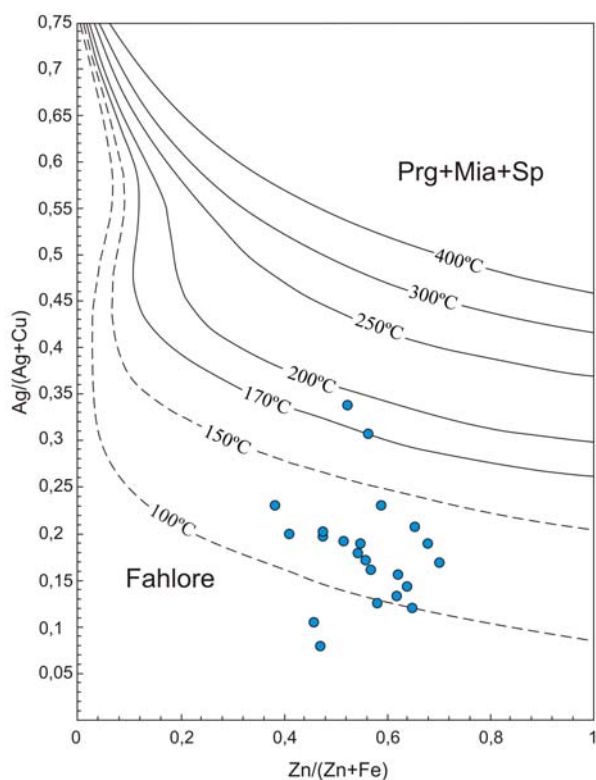


Рис. 8. Молярні величини  $\text{Ag}/(\text{Ag}+\text{Cu})$  і  $\text{Zn}/(\text{Zn}+\text{Fe})$  бляклих руд з Бобриківського родовища співставлені з розчинністю  $\text{Ag}$  у бляклій руді в системі  $\text{Ag}_2\text{S}-\text{Cu}_2\text{S}-\text{ZnS}-\text{FeS}-\text{Sb}_2\text{S}_3$  за температур від 100 до 400°C (блякла руда (fahlore) знаходиться у рівновазі з піраргіритом (prg), сфалеритом (sp) і міаргіритом (mia)). Градування здійснене за Sack, Lynch, Foit, 2003).

Бобриківському родовищі переносилось лужними розчинами у вигляді гідросульфідних комплексів  $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ .

Під час третьої гідротермальної системи нейтральні-слабко лужні розчини транспортували  $\text{As}$  і  $\text{Au}$  у складі гідросульфідних комплексів [11]. Зниження концентрації  $\text{H}_2\text{S}$  у розчині сприяло зменшенню розчинності золота і осадженню його у вільній формі, про що свідчить утворення герсдорфіту, арсенистого піриту і сидериту другої генерації. Співіснування серициту (мусковіту), сидериту, піриту і арсенопіриту у вмісних породах Бобриківського родовища свідчить про рН гідротермальних розчинів від 5 до 8. Розчинення кварцу під час утворення золотовмісної халькопірит-герсдорфіт-галенітової парагенетичної мінеральної асоціації на глибоких горизонтах родовища свідчить про лужну реакцію мінералоутворювального розчину. Окисно-відновний потенціал системи мінералоутворення визначався рівновагою пірит-піротин-магнетит. Окрім цього, заміщення піриту магнетитом також може бути ознакою збільшення лужності, або зменшення активності кисню з глибиною. Отже, цілком імовірно, що золото на

## ВИСНОВКИ

**1. Становлення Бобриківського родовища є результатом діяльності трьох різновікових автономних гідротермальних систем.**

Перша гідротермальна система виникла і діяла в умовах постдіагенетичного перетворення теригенної товщі осадових порід під час складчастості і регіонального метаморфізму. Гідротермальна система характеризувалась низьким співвідношенням вода/порода, врівноваженістю розчину щодо вмісних порід, мінералоутворенням за умов локального порушення геохімічної рівноваги (перетинання кліважними тріщинами пластів різного літологічного складу та викликане цим змішування локально врівноважених розчинів; мінералоутворення в тріщинах відриву внаслідок змішування розчинів, врівноважених із породою, на різних гіпсометричних рівнях при змінних р-Т параметрах). Результатом діяльності слабо каналізованої гідротермальної системи в режимі пластичних деформацій є утворення продуктів пірит-арсенопірит-сидерит-фосфатної стадії у вигляді метакристалічної мінералізації піриту, арсенопіриту, сидериту і фосфатів (ксенотим,

флоренсит, монацит), синдеформаційних прожилків тичкуватого сидериту з апатитом, ореолів тіней тиску навколо метакристалів піриту і арсенопіриту, складених сидеритом.

Діяльність другої гідротермальної системи супроводжувала процеси магматичної активізації і спричинена вкоріненням інтрузій ( $P_1$ - $P_2$ ) у метаморфізовану теригенну товщу осадових порід Донецької складчастої області під час інверсії. Процес мінералоутворення пов'язаний з зонами крихких деформацій карбонатних агрегатів. Наслідком другої гідротермальної системи, яка діяла в умовах потоку речовини по деформованих мінеральних агрегатах пірит-арсенопірит-сидерит-фосфатної стадії, є часткова перекристалізація і регенерація дроблених піриту і арсенопіриту, заміщення сидериту анкеритом і галенітом, заміщення анкериту агрегатом кварцу з полісульфідами (піротин, сфалерит, галеніт). Висока активність сірки на верхніх горизонтах родовища і зниження її із глибиною зумовили виникнення пірит-піротинової зональності у вертикальному розрізі родовища.

Під впливом пізньорогеного магматизму ( $P_2$ - $T_1$ ) активувалась третя гідротермальна система, яка вирізнялася найменшим об'ємом і локалізацією у кварцових жилах. Гідротермальна система спричинила осадження самородного золота у тінях тиску перекристалізованого кварцу, локальне утворення арсенвмісного піриту, бляклих руд, герсдорфіту і магнетиту під час кварц-халькопірит-бляклорудно-герсдорфітової стадії. Встановились близько нейтральні умови середовища, сприятливі для перенесення золота і міді. На верхніх горизонтах родовища осадження золота відбулося внаслідок руйнування комплексів  $AuHS_0$  за температури 150-200 °C і за умов зменшення рН (у полі стабільності піриту і піротину), а на нижніх горизонтах – внаслідок руйнування комплексів  $Au(HS)_2^-$  за температури понад 200 °C і за умов збільшення рН (у полі стабільності магнетиту). Зони осадження самородного золота локалізовані у ділянках розтягу, зокрема у тінях тиску навколо піриту, де відбувається кристалізація кварцу і самородного золота.

**2. Зростання фізико-хімічних градієнтів у послідовному ряду гідротермальних систем відображається збільшенням ступеня їхньої нерівноважності, що проявляється інтенсивністю мінералогічної зональності під час діяльності кожної наступної гідротермальної системи Бобриківського родовища.**

Відсутність інтенсивних і чітко проявлених метасоматичних змін вмісних порід Бобриківського родовища пов'язана з низьким співвідношенням флюїд/порода протягом всього гідротермального процесу. Мінеральний склад осадових порід є наслідком метаморфічних перетворень, а не метасоматозу.

Рання гідротермальна система, що функціонувала під час постдіагенетичного перетворення теригенної товщі осадових порід, охоплювала весь об'єм резервуару осадових порід і вирізнялася низьким ступенем нерівноважності та слабо градієнтним середовищем мінералоутворення. Мінералогічна зональність під час цього етапу проявлена локальним заміщенням доломіту сидеритом, утворенням метакристалічної мінералізації піриту і арсенопіриту, яка приурочена до прошарків аргілітів і пісковиків, відповідно. Гідротермальна система вирізнялася зростанням

співвідношення  $f\text{CO}_2/f\text{S}_2$ , що зумовило зміну в часі пірит-арсенопіритового парагенезису сидерит-фосфатною асоціацією.

Дві останні гідротермальні системи діяли в градієнтному полі, де були виразні геохімічні градієнти. Підвищена активність  $\text{Ca}^{2+}$  і зростання активності сірки зумовила заміщення сидериту анкеритом під час утворення кварц-полісульфідної стадії. Навколожильні зміни вмісних порід проявлені заміщенням порфіробластів сидериту анкеритом поширені на відстані не більше 10 см від прожилків. Кисле середовище мінералоутворення сприяло заміщенню анкериту кварцом і осадженню сфалериту, галеніту і піротину на нижніх горизонтах родовища. На верхніх горизонтах під час утворення мінералів кварц-полісульфідної стадії пірит і арсенопірит регенерувались і частково доростали, а фосфати залишалися незмінними.

Третя гідротермальна система вирізнялася найбільшим ступенем нерівноважності, значним проявом заміщень і перекристалізацією у жильних мінеральних агрегатах. Гідротермальна система займала найменший об'єм і була строго локалізована до мікротріщин, зумовлених деформацією попередньо утворених мінеральних агрегатів. Мінералоутворення відбувається на локальних геохімічних бар'єрах, свідченням чого є неперервне заміщення на мікрорівні: кожен наступний мінерал кварц-халькопірит-бляклорудно-герсдорфітової стадії утворювався шляхом заміщення попереднього. Гідротермальна система вирізнялася низькою фугитивністю сірки, лужним середовищем, що зумовило на нижніх горизонтах родовища локальне перевідкладення кварцу, утворення арсенвмісного піриту, герсдорфіту і заміщення піротину магнетитом. На верхніх горизонтах лужне середовище і висока фугитивність сірки зумовили утворення халькопіриту і ряду стибієвих сульфосолей.

### **3. Утворення самородного золота на Бобриківському родовищі відбулося наприкінці гідротермального процесу внаслідок зміни рН середовища від слабо лужного до слабо кислого.**

Самородне золото на Бобриківському родовищі парагенетично пов'язане з халькопіритом, бурнонітом і галенітом. Самородне золото накладене на деформовані мінеральні агрегати – продукти першої і другої гідротермальних систем, і виповнює мікротріщини в сульфідах, та утворює зерна у фронтальних зонах тіней тиску в кварцових агрегатах навколо зерен піриту.

Врівноваженість гідротермального розчину із кварц-слюдистими породами та незначні геохімічні градієнти в ранній гідротермальній не сприяли розчиненню та переміщенню золота на значні відстані, вірогідніше відбувалося накопичення золота у зонах перегрупування органічної речовини. Під час діяльності другої гідротермальної системи відсутність виразних геохімічних градієнтів і кисле середовище мінералоутворення унеможливили міграцію золота в межах гідротермальної системи. За таких умов золото радше розсіювалось. Близьконеїтральні і низькотемпературні умови середовища мінералоутворення, що існували в межах третьої гідротермальної системи, сприяли розчиненню золота й концентруванню його в розчині на глибоких горизонтах системи та кристалізації його за умов значних геохімічних градієнтів, що сформувалися на верхніх горизонтах родовища.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Статті у фахових наукових виданнях*

1. Відображення деформацій у будові мінеральних агрегатів Бобриківського золоторудного родовища / **О. Цабан**, Л. Скакун, О. Литвинович, Р. Середяк // Мінерал. зб. – 2006. – № 56. Вип. 1-2. – С. 67–75.
2. Золотовмісний мінеральний парагенезис у рудах Бобриківського родовища / **О. Цабан**, Л. Скакун, О. Литвинович, Р. Серкіз // Мінерал. зб. – 2007. – № 57. Вип. 2. – С. 60–69.
3. Мінералогія карбонатів Бобриківського золоторудного родовища та їхнє місце у формуванні полімінерального агрегату / **О. Цільмак**, Л. Скакун, О. Литвинович, Р. Серкіз // Вісн. Львів. ун-ту. Сер. геол. – 2008. – Вип. 22. – С. 30–41.
4. Типоморфні особливості арсенопіриту потенційно золотоносних ділянок Бобриківського золото-поліметалевого рудного поля (Нагольний кряж, Донбас) / О. Литвинович, В. Єхванов, Ю. Пахнющий, В. Степанов, **О. Цабан**, О. Шваєвський, О. Савіна // Мінерал. зб. – 2009. – № 59. Вип. 2. – С. 149–161.
5. Популяції самородного золота в кварц-карбонат-сульфідних агрегатах Бобриківського золоторудного родовища / **О. Цільмак**, Л. Скакун, О. Литвинович, Р. Серкіз // Геохім. та рудоутв. – 2009. – Вип. 27. – С. 101-105.
6. Деякі електричні особливості арсенопіриту як типоморфний критерій розшуку та оцінки золотого зруденіння в складчастих вуглецевмісних слабкометаморфізованих літокомплексах (Нагольний кряж, Донбас) / О. Литвинович, В. Єхванов, Ю. Пахнющий, В. Степанов, **О. Цабан**, О. Шваєвський, О. Савіна // Вісн. Львів. ун-ту. Сер. геол. – 2010. – Вип. 24. – С. 131–144.
7. Типоморфізм та умови формування бляклих руд Бобриківського золоторудного родовища / **О.В. Цільмак**, Л.З. Скакун, О.Р. Литвинович, Р.Я. Серкіз // Зап. Укр. мінерал. тов-ва. – 2011. – Т. 8. – С. 216-218.
8. Еволюція мінерального складу коложильних метасоматитів Бобриківського золоторудного родовища / **О.В. Цільмак**, Л.З. Скакун, Р.Я. Серкіз // Геохім. та рудоутв. – 2012. – Вип. 31-32. – С. 119-126.

### *Статті у фахових наукових виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз*

9. Особливості формування метакристалів піриту і арсенопіриту Бобриківського золоторудного родовища (Донбас) / **О.В. Цільмак**, Л.З. Скакун // Мінерал. журн. – 2015. – № 3. – С. 28-36.

### *Тези та матеріали доповідей*

10. Литвинович О. Застосування неруйнівного методу визначення мінералого-фізичних параметрів локалізації золотого зруденіння на прикладі Бобриківського рудного поля (Нагольний кряж) / О. Литвинович, В. Єхванов, В. Степанов, Ю. Пахнющий, О. Шваєвський, **О. Цільмак**, О. Савіна // Стан і перспективи сучасної геологічної освіти і науки: тези доп. наук. конф., присвяч. 65-річчю геол. ф-ту Львів. нац. ун-ту ім. Івана Франка (м. Львів, 13-15 жовтня 2010 р.). – Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2010. – С. 124-125.
11. Фізико-хімічні умови утворення золотовмісного парагенезису на Бобриківському родовищі (Нагольний кряж) / **О. Цільмак**, Л. Скакун // Мінералогія : сьогодення і майбуття: матеріали VIII наукових читань імені академіка Євгена Лазаренка



- (присвячено 150-річчю заснув. каф. мінералогії у Львів. ун-ті) (м. Львів-Чинадієве, 11-14 вересня, 2014 р.). – Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2014. – С. 163–165.
12. Позиція самородного золота у кварц-карбонат-сульфідних жилах Бобриківського родовища (Нагольний кряж) / **О. Цільмак**, Л. Скакун // Фундаментальне значення і прикладна роль геологічної освіти і науки: тези доп. наук. конф., присвяч. 70-річчю геол. ф-ту Львів. нац. ун-ту ім. Івана Франка (м. Львів, 7-9 жовтня 2015 р.). – Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2015. – С. 225-226.
  13. Рідкісноземельна мінералізація Бобриківського золото-поліметалевого родовища (Нагольний кряж, Донбас) / **О. Цільмак**, Л. Скакун, Р. Серкіз // Геохронологія та рудоносність докембрію та фанерозою (до 110 річниці від дня народження академіка АН УРСР Семененка Миколи Пантелеймоновича): тези наук. конф. з міжнародною участю (м. Київ, 17-18 листопада 2015 р.). – Київ: Ін-т геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка, 2015. – С. 122-123.

### АНОТАЦІЯ

**Цільмак О.В. Мінералого-геохімічна модель Бобриківського золоторудного родовища. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата геологічних наук за спеціальністю 04.00.20 – мінералогія, кристалографія (геологічні науки). – Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України, Київ, 2016.

Дисертація присвячена дослідженню прожилково-вкрапленої мінералізації у вуглецевмісних теригенних товщах осадових порід Бобриківського золоторудного родовища. Доведено становлення прожилково-вкрапленої мінералізації внаслідок діяльності трьох різновікових автономних гідротермальних систем. Достовірно встановлено позицію самородного золота у кварц-карбонат-сульфідному агрегаті у тінях тиску перекристалізованого кварцу, піриту й арсенопіриту й доведено формування самородного золота під час завершальної стадії гідротермального мінералоутворення. На основі текстурно-структурних особливостей мінеральних агрегатів запропоновано нову схему стадійності гідротермального мінералоутворення на Бобриківському родовищі з виділенням мінеральних парагенетичних асоціацій. Отримано нові дані щодо типоморфних особливостей піриту, арсенопіриту, карбонатів, фосфатів, сульфосолей, герсдорфіту, самородного золота.

**Ключові слова:** мінеральний агрегат, порфіробласт, мінеральний парагенезис, гідротермальна система, самородне золото, Бобриківське золоторудне родовище.

### АННОТАЦИЯ

**Цильмак О.В. Минералого-геохимическая модель Бобриковского золоторудного месторождения. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата геологических наук по специальности 04.00.20 – минералогия, кристаллография (геологические науки). – Институт геохимии, минералогии и рудообразования им. М.П. Семененко НАН Украины, Киев, 2016.

Диссертация посвящена исследованию прожилково-вкрапленной минерализации в углеродсодержащих терригенных толщах осадочных пород



Бобриковского золоторудного месторождения. Доказано формирование прожилково-вкрапленной минерализации в результате деятельности трех разновозрастных автономных гидротермальных систем. Достоверно установлено позицию самородного золота в кварц-карбонат-сульфидном агрегате в тенях давления перекристаллизованного кварца, пирита и арсенопирита; доказано формирование самородного золота во время завершающей стадии гидротермального минералообразования. На основе текстурно-структурных особенностей минеральных агрегатов предложена новая схема стадийности гидротермального минералообразования на Бобриковском месторождении с выделением минеральных парагенетических ассоциаций. Получены новые данные о типоморфных особенностях пирита, арсенопирита, карбонатов, фосфатов, сульфосолей, герсдорфита, самородного золота.

**Ключевые слова:** минеральный агрегат, порфиروبласт, минеральный парагенезис, гидротермальная система, самородное золото, Бобриковское золоторудное месторождение.

## SUMMARY

**Tsilmak O.V. Mineralogical and geochemical model of the Bobrykove gold deposit. – Manuscript copyright.**

Thesis for candidate's degree in Geological Science, speciality 04.00.20 – Mineralogy and Crystallography (geological sciences). – M.P. Semenenko Institute of geochemistry, mineralogy and ore formation of the National Academy of sciences of Ukraine, Kyiv, 2016.

The dissertation is devoted to the studying of the vein-disseminated mineralization in the carbonaceous clastic sedimentary rocks from the Bobrykove gold deposit. It is proved that the vein-disseminated mineralization was formed as a result of an activity of three autonomous hydrothermal systems of the different ages. The first hydrothermal system was weakly canalized and was activated under postdiagenetic conversion of clastic sedimentary rocks and operated during folding and regional metamorphism, so it was in a plastic deformation mode. The result of it was consisted in disseminated mineralization of pyrite, arsenopyrite, siderite and REE-phosphates (xenotime, florencite, monacite), veinlets of the columnar siderite with apatite and shadows pressure consisting of siderite around pyrite and arsenopyrite porphyroblasts. The second hydrothermal system was initiated by rooting intrusions ( $P_1$ - $P_2$ ) in metamorphosed carbonaceous sedimentary rocks during inversion of the Donbas fold belt. Ore-forming process at hydrothermal system coincides with the zone of brittle deformation carbonate units. The second hydrothermal system operated in flow conditions on deformed pyrite-arsenopyrite-siderite-phosphate aggregates, there was the formation of quartz veins with pyrrhotite, sphalerite, galena, partial regeneration of pyrite and arsenopyrite, replacement of siderite by ankerite and galena aggregates. Under the influence of late-orogeny magmatism ( $P_2$ - $T_1$ ) was activated the third hydrothermal system, it had less volume and localization in the deformed quartz veins. Activity of the last hydrothermal system initiated deposition of the native gold in the shadows pressure of the deformed quartz, local formation of arsenian pyrite, sulphosalts (Ag-tetrahedrite, freibergite, bournonite, polybasite), magnetite and herschelite during late stage of the ore-forming.

The absence of an intensive and clear metasomatic host rocks alteration on the Bobrykove gold deposit was connected with a low fluid-rock ratio during the ore-forming process. The mineral composition of sedimentary rocks is most likely the result of the metamorphic transformations than the metasomatism.

The first hydrothermal system covered the entire volume of the sediment reservoir and had a low degree of disequilibrium and weak gradient of mineral-forming environment. Mineralogical zoning during this stage shows a local dolomite replacement by siderite, the formation of disseminated pyrite and arsenopyrite mineralization, which are located in the layers of mudstone and sandstone, respectively. The hydrothermal system is characterized by an increase in the  $f\text{SO}_2/f\text{S}_2$  ratio, which resulted in the change of time pyrite-arsenopyrite assemblages by siderite-phosphate.

The second and third hydrothermal systems operated in a gradient field. The geochemical gradients were expressive. A volume of hydrothermal system decreased and localized in the cracks. Increased activity of  $\text{Ca}^{2+}$  and sulfur led to the replacement of siderite by ankerite during the formation of quartz-polysulfide stage. Metasomatic alteration of the host rocks are common at a distance of no more than 1 mm toward from veins. The second hydrothermal system was characterized by an acid mineral-forming environment, which contributed to the formation of quartz, sphalerite and galena. Pyrite and arsenopyrite are regenerated and partially grown, while phosphates remained unchanged during the quartz-polysulfide stage.

The third hydrothermal system had the highest degree of disequilibrium, a significant substitution and recrystallization development of the vein mineral aggregates. This hydrothermal system occupied the lowest volume and was strictly localized in the microcracks caused by deformation of pre-formed mineral aggregates. Due to the emergence of the intense geochemical barriers each following mineral of quartz-chalcopyrite-grey cooper ore-gersdorffite stage formed by the replacement of the previous one. The hydrothermal system was characterized by low sulfur fugacity, alkaline environment, which led to the local formation of arsenian pyrite, gersdorffite and replacement of pyrrhotite by magnetite.

Native gold on the Bobrykove gold deposit paragenetically bound with bournonite and galena. Native gold superimposed on the deformed mineral aggregates formed during the activity of the first and second hydrothermal systems, and took place in the microcracks and shadows pressure.

Low gradient environment, in which acted the first hydrothermal system initiated by regional metamorphism of carbonaceous clastic sedimentary rocks, did not contribute to transport of the gold complexes over significant distances. Perhaps there was an accumulation of gold in the zones of the organic matter regrouping. The lack of geochemical gradients and acidic environment made it impossible to transport the gold complexes over significant distances during the second hydrothermal system action. Under such conditions, gold is likely to dissipate. The third hydrothermal system's effect was characterized by the strongly gradient environment, which led to the transport of gold in hydrosulfide complexes by an alkaline solution. The native gold deposited due to a pH decrease.

**Keywords:** mineral aggregate, porfiroblast, mineral paragenesis, hydrothermal system, native gold, Bobrykove gold deposit.