

<https://doi.org/10.15407/mineraljournal.44.03.111>  
УДК 553.21/24+548.2

**М.М. Павлунь**, д-р геол. наук, професор  
E-mail: mykola.pavlun@lnu.edu.ua; <http://orcid.org/0000-0002-8634-6576>  
**Г.І. Гоцанюк**, канд. геол. наук, доцент  
E-mail: hotsanyuk@ukr.net; <http://orcid.org/0000-0002-2794-7013>  
**А.В. Іваніна**, канд. геол.-мін. наук, доцент  
E-mail: ant\_iv@ukr.net; <http://orcid.org/0000-0003-4112-941X>  
Львівський національний університет імені Івана Франка  
79005, м. Львів, Україна, вул. Грушевського, 4

## ТЕРМОБАРОГЕОХІМІЧНІ ПОШУКОВО-ОЦІНОЧНІ КРИТЕРІЇ ЗОЛОТОГО ЗРУДЕНІННЯ РОДОВИЩА БАЛКА ШИРОКА В СЕРЕДНЬОМУ ПРИДНІПРОВ'І

Побудовано схему стадійності й термобаричного режиму формування золотого зруденіння родовища Балка Широка (Середньопридніпровський мегаблок Українського щита) та визначено послідовність і термобаричні інтервали утворення руд. Мінеральні парагенезиси об'єднано в чотири мінеральні асоціації, які формують послідовний ряд мінеральних комплексів: допродуктивний магнетит-кварцовий, продуктивний полісульфідний, який охоплює дві продуктивні золотовмісні асоціації (арсенопірит-пірит-кварцову з золотом і золото-сульфосольову) та післяпродуктивний карбонатний (кварц-кальцитова мінеральна асоціація). Продуктивні на золото асоціації формувалися в досить вузькому діапазоні змін температури й тиску специфічного за складом і агрегатно-густинним станом рудоутворювального середовища. Це позначилося на фазовому типоморфізмі відповідних родин флюїдних включень. Зокрема, поширені вуглекислотно-водні включення з різним співвідношенням фаз:  $\Gamma\text{-P}_{\text{CO}_2}\text{-P}_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $\text{P}_{\text{CO}_2}\text{-}\Gamma\text{-P}_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $\text{P}_{\text{CO}_2}\text{-P}_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $\Gamma\text{-P}_{\text{CO}_2}$ . Найоптимальніша температура гомогенізації газопо-рідких включень (за першим типом) — 210–290 °С. У мінералах наявні родини флюїдних включень дво- і однофазового  $\text{CO}_2$  з широкими варіаціями його густини (від 0,65 до 0,87 г/см<sup>3</sup>) та гомогенізацією в рідку фазу. Ці типоморфні особливості є термобарогеохімічними пошуковими критеріями та оцінними ознаками золотого зруденіння. Не менш важливим є визначення палеотемпературного градієнта і просторової екстраполяції його зміни з глибиною, що дає змогу обчислювати вертикальний розмах зруденіння, рівень його ерозійного зрізу та глибину виклинювання.

**Ключові слова:** золоте зруденіння, мінеральний парагенезис, мінеральна асоціація, мінеральний комплекс, термобарогеохімія, флюїдні включення, параметри кристалізації, Балка Широка, Український щит.

**Вступ.** Науковим підґрунтям пошуків є уявлення про закономірне просторово-часове утворення і поширення родовищ корисних копалин, а також про геохімічні особливості елементів, хімічних сполук і їхніх комплексів у різних геологічних і фізико-хімічних умовах. Розпочинаючи пошуки, необхідно чітко

уявити, які геолого-тектонічні та фізико-хімічні закономірності, що визначають і контролюють просторове положення рудних тіл, зон та ділянок родовища. Ці закономірності, які визначають перспективу виявлення корисних копалин, у даному випадку, золотого зруденіння на родовищі Балка Широка, на-

Цитування: Павлунь М.М., Гоцанюк Г.І., Іваніна А.В. Термобарогеохімічні пошуково-оціночні критерії золотого зруденіння родовища Балка Широка в Середньому Придніпров'ї. *Мінерал. журн.* 2022. 44, № 3. С. 111–119. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.44.03.111>

зивають пошуковими критеріями. Критерії як засіб для пошукового прогнозування охоплюють пошукові передумови та пошукові ознаки. Пошукові передумови — це будь-які фізико-хімічні чинники, що прямо або побічно свідчать про можливість знаходження у даному випадку золотого зруденіння, а пошуковими ознаками називають конкретні термобарогеохімічні (ТБГХ) чинники, які безпосередньо свідчать про наявність руд золота в межах досліджуваного родовища.

**Мета роботи** — вивчити фізико-хімічні умови та встановити ТБГХ-параметри формування родовища Балка Широка, зокрема виокремити продуктивні на золото мінеральні асоціації та встановити особливості просторово-часової еволюції фізико-хімічних умов їхнього утворення та з'ясувати типоморфізм відповідних сімейств флюїдних включень у мінералах, що і є ТБГХ-пошуковими критеріями золотого зруденіння на родовищі.

**Результати досліджень та обговорення.** Серед різних напрямів сучасної термобарогеохімії (ТБГХ) — теоретичного, аналітичного, методичного, генетичного, прикладного — останній є найважливіший як з погляду реалізації різномасштабних прогнозно-металогенічних робіт, так і під час вирішення геологічних завдань, що потребують розв'язання на різних етапах геологорозвідувального процесу. Теоретичним підґрунтям ТБГХ-прогнозування, пошуків та оцінки зруденіння є стійкість режиму фізико-хімічних умов утворення продуктивних мінеральних парагенезисів і асоціацій. Вони формуються в доволі вузькому діапазоні зміни ТБГХ-параметрів специфічного за хімічним складом та агрегатно-густинним станом рудоутворювального середовища, що проявляється у фазовому типоморфізмі відповідних родин флюїдних включень, практично незалежно від геотектонічних умов і металогенічної спеціалізації регіонів. Ця обставина засвідчує виразну конвергентність фізико-хімічних умов і ТБГХ-показників розвитку генетично споріднених рудоутворювальних процесів — постмагматичних формацій вольфраму, олова, молібдену, золота, свинцю, цинку, сурми, кіноварі тощо [3—5, 8, 10].

Не менш важливим завданням прикладної ТБГХ є можливість діагностики та просто-

рової екстраполяції градієнтів і трендів цих параметрів (ТБГХ-зональність) з визначенням для різноглибинних формацій просторового положення зон, які фізико-хімічно сприятливі для розвитку золотого зруденіння Балки Широкої, а також верхньо- і нижньорудних фізико-хімічних рівнів їхнього виклинювання з урахуванням структурно-фаціальних умов рудолокалізації [6, 7, 14].

Водночас під час оцінювання вертикального розмаху сприятливої для рудоконцентрації самородного металу фізико-хімічної зони на основі градієнтного аналізу ТБГХ-зональності варто брати до уваги різний ступінь термостатування різноглибинних флюїдів [6] і його обернено-функціональний зв'язок з величиною  $\Delta T/100$  м як показника інтенсивності зміни *PT*-режиму: для вулканогенно-гідротермальних і певною мірою плутоногенно-гідротермальних високо- та порівняно флуктуативних процесів з навхрестізохоричним трендом розвитку  $\Delta T/100$  м значно більший, аніж для низькофлуктуативних метаморфогенно-гідротермальних з близько ізохоричним трендом перебігу мінералоутворювальних процесів [4, 11, 15]. Саме цим, імовірно, можна пояснити стиснутий по вертикалі та порівняно концентрований (бонанцевий) тип розподілу зруденіння в першому та почасти другому випадках і розтягнутий по вертикалі (до кількох кілометрів) за порівняно низьких вмістів металу, але з дуже великими запасами — у третьому [6, 9, 11].

Стисло розглянемо питання пошуково-оціночних критеріїв золотого зруденіння родовища Балка Широка.

Послідовність і термобаричні (*T, C, P, MPa*) інтервали формування складу руд родовища Балка Широка показано в таблиці [13], де мінеральні парагенезиси об'єднано в чотири мінеральні асоціації, які формують допродуктивний магнетит-кварцовий комплекс, продуктивний полісульфідний, який охоплює пірит-арсенопірит-кварцову з золотом та золото-сульфосольову мінеральні асоціації та післяпродуктивний карбонатний комплекс кварц-кальцитової мінеральної асоціації, що охоплює два парагенезиси.

Наявні матеріали засвідчують, що власне золотоносна сульфідна мінералізація (полі-

сульфідний комплекс) має доволі специфічні риси *PT*-режиму та хімізму рудогенерувальної системи. У цьому відношенні вона суттєво відмінна від допродуктивних власне кварцових парагенезисів з магнетитом і післяпродуктивних суттєво карбонатних парагенезисів, що предметно показано на схемі стадійності та термобаричного режиму формування родовища Балка Широка [15].

У чому ж полягає радикальна винятковість фізико-хімічних умов формування продуктивного на золото полісульфідного комплексу та характер флюїдних включень у його мінеральних складових.

Арсенопірит-пірит-кварцова з золотом асоціація, розвиток якої пов'язаний з новим етапом активізації тектонічних рухів, у досліджених розрізах рудних тіл проявлена здебільшого дуже масштабно. Вона є найранішою в складі золотовмісного полісульфідного мінерального комплексу. Від ранніх асоціацій відмінна суттєвим підвищенням ролі сульфідів і їхнім різноманіттям. Як виявлено, формування цього мінерального різновиду знаменується різким підвищенням температури розчинів з яскраво проявленою термобарогеохімічною спеціалізацією.

За результатами мінералотермометрії, формування рудної речовини в цей період розпочалося з виділення дрібнозернистих агрегатів продуктивного кварцу II-а і турмаліну (турмалін-кварцовий парагенезис — Г) за температури 385—360 °С; у деяких випадках до них приєднується пірит II-а (*p-n* провідність), нерідко останній сингенетичний раннім зародженням кварцу II-а без участі турмаліну. В піриті II-а фіксується вкраплення золота. Зважаючи на термобарогеохімічні дослідження, дещо пізніше кристалізувалися найраніші зародження піриту II-а (385—370 °С), і далі за 370 °С розпочинається кристалізація піротину II (кварц-піротин-піротовий парагенезис — Д).

Мінерали установлених парагенетичних асоціацій просторово тяжіють до зальбандованих частин рудних парагенезисів, центральна частина яких найчастіше виповнена середньозернистим кварцом II-а, халькопіритом, сфалеритом і арсенопіритом I-а з золотом (золото-арсенопірит-сфалерит-халькопірит-кварцовий парагенезис — Е), епізодично тут

наявні й мінерали пізніх асоціацій. Перехід від дрібно- до середньозернистих агрегатів кварцу II-а в одних випадках здійснюється дуже різко, в інших — поступово, без ознак суттєвої перерви в мінералоутворенні. В іншому випадку збільшення зернистості мінеральних агрегатів можна інтерпретувати як результат перепадів тиску внаслідок синхронізованих змін цього параметра з внутрішньорудними тектонічними флуктуаціями та перенасиченням металонесних розчинів у початковий період кристалізації з поступовою стабілізацією термодинамічної рівноваги рудоутворювальної системи з встановленням відносного теплового балансу розчинів зі стінками рудовмісних тріщин. Такий перебіг думок не тільки сприяє розумінню всього різноманіття встановлених під час досліджень парагенетичних асоціацій у період формування мінералів полісульфідного золотонесного комплексу, але й добре узгоджується з результатами термобарогеохімічного вивчення флюїдних інклюзивів у кварці II-а з рудних зон.

У дрібнозернистих різновидах кварцу II-а виявлено три типи первинно-вторинних газиво-рідинних включень: двофазові, що вміщують не тільки рідину (водний розчин), але, імовірно, граничні та неграничні вуглеводні, і високогустинну вуглекислоту (0,914 г/см<sup>3</sup>), що непрямо підтверджуються кріометричними дослідженнями та термічним розкриттям включень, гомогенізація яких відбувається в рідинну фазу за 385—310 °С. У конкретних кварцових індивідах два інших різновиди включень утворені синхронно та відмінні за співвідношеннями фаз: двофазові з наповненнями водним розчином 75—65 % і трифазові з діоксидом вуглецю, які є замкнутими багатокомпонентними мікросистемами — водний розчин (рідка фаза H<sub>2</sub>O), водно-вуглекислий розчин (рідка фаза CO<sub>2</sub>) і газова фаза CO<sub>2</sub>. Зміна фазового складу включень пояснюється первинною неоднорідністю початкових мінералоутворювальних гідротерм, що розглядається як результат гетерогенного стану системи [9, 10].

Вивчення трифазових включень, що вміщують рідинний діоксид вуглецю, показало, що їхня часткова гомогенізація в рідинну фазу (зникнення газової фази CO<sub>2</sub>) відбува-

ється в температурному інтервалі 8,5—15,5 °С, в окремих випадках до 28,2 °С. За даними Амага [18, 19], густина гомогенної рідинної вуглекислоти в таких включеннях становить від 0,809—0,866 до 0,688 г/см<sup>3</sup>. Сингенетичні їм двофазові газопо-рідинні (без рідинної СО<sub>2</sub>) включення досягають повної гомогенізації за 370—310 °С. Такі сімейства включень свідчать, що кристалізація дрібнозернистих зароджень кварцу II-а відбувалася за участю гетерогенних водно-вуглекислотних розчинів у температурному інтервалі 385—310 °С за суттєвих варіацій тиску — >194—123, іноді до 93 МПа.

У дрібнозернистому кварці II-а, що асоціює з халькопіритом, арсенопіритом I-а і сфалеритом (арсенопірит-сфалерит-халькопірит-кварцовий парагенез — E), знайдено первинно-вторинні газопо-рідинні трифазові включення з галітом (до 20—40 % об'єму вакуолі); під час їхнього дослідження з'ясувалося, що фаза галіту розчиняється після зникнення газової фази (150—179 °С) за температури 330—350 °С, що дало змогу оцінити тиск, який в такому випадку становив 190—170 МПа.

Золото-сульфосольова асоціація, яка, як і попередня, є золотоносною, завершує процес рудоутворення в період виділення мінералів полісульфідного продуктивного комплексу. За даними на цей час результатами досліджень, асоціація не отримала дуже широкого розвитку в досліджених рудних тілах, вона характеризується не тільки мінеральною своєрідністю, але й сформована певним геохімічним типом розчинів, які брали участь у формуванні деяких парагенезисів у її складі. Ця асоціація представлена середньозернистими агрегатами кварцу II-б з одночасною вкрапленістю піриту II-б (*n-p* провідність) і за нашими спостереженнями пірит II-б розташований по зонах росту кварцу II-б (кварц-піритовий парагенезис — Ж). Дещо пізніше до них приєднався арсенопірит I-б і халькопірит, з ранніми зародженнями якого відмічаються зростки сульфосолей та золота (кварц-халькопірит-арсенопірит-сульфосольовий з золотом парагенезис — З), з пізнішими — клейофан (клеюфан-халькопірит-кварцовий парагенезис — I). Часто спостерігаються тісно асоційовані клейофан і галеніт: результати наших досліджень свід-

чать, що ці мінерали кристалізувалися одночасно (клеюфан-галеніт-кварцовий парагенезис — К).

У кварці II-б, який є наскрізним мінералом асоціації, виокремлено сімейства синхронних флюїдних включень — газопо-рідинних з рідким діоксидом вуглецю і без нього. За інклюзивами без видимої фази СО<sub>2</sub> визначали температуру мінералоутворення золото-сульфосольової асоціації, за суттєво вуглекислотного складу — густину СО<sub>2</sub> (0,688—0,653 г/см<sup>3</sup>), за допомогою *PT*-діаграми стану бінарної системи Н<sub>2</sub>О—СО<sub>2</sub> визначався тиск, за якого відбувалася кристалізація мінералів асоціації. Температура повної гомогенізації включень змінюється від 290 до 210 °С, часткової гомогенізації — 26,0—28,0 °С, що дало змогу розрахувати тиск у системі мінералоутворень в 93,0—79,0 МПа. Завершують процес формування золотоносного комплексу (полісульфідний) мінерали кварц-анкеритового парагенезису — А; у пізніх зародженнях кварцу II-б, сингенетичного анкериту, знайдено первинно-вторинні включення, що гомогенізуються в рідку фазу за 210—200 °С.

Отже, продуктивні на золото мінеральні асоціації формувалися в умовах певного термобаричного й агрегатного стану флюїдів і внутрішнього хімізму.

Зокрема, температурні стрибки, які стійко проявляються у всіх точках спостереження, нами зафіксовано для початку виділення арсенопірит-пірит-кварцової з золотом (до 50 °С) і перепади для кварц-кальцитової (10 °С) мінеральних асоціацій. У часі такі зміни температурного режиму відповідають періодам активізації до- і внутрішньорудних тектонічних напружень, ознаки яких (текстури перетину, дроблення і цементації) трапляються всюди.

У відповідності з ними дані про стрибкоподібні підвищення температури можуть слугувати одним з надійних критеріїв у процесі визначення меж розвитку окремих комплексів, зокрема продуктивного на золото. Про це свідчить також суттєва зміна хімічного складу рудоутворювальних розчинів на початку кристалізації арсенопірит-пірит-кварцової із золотом асоціації, що доведено наявністю в мінералах первинно-вторинних

включень, що вміщують насамперед вуглекислоту та тверді фази NaCl, не властиві попереднім пірит-кварцовим (з магнетитом) агрегатам чи наступним кварц-кальцитовим.

Стосовно агрегатного стану розчинів, то кристалізація ранніх зароджень мінералів допродуктивного комплексу здійснювалась здебільшого із газових розчинів, які зі зниженням температури та зрідження в близько критичних умовах відносно плавно трансформувалися в гідротерми. Судячи по критичних явищах в інклюзівах, конденсація газоподібних розчинів відбувалась у відносно вузькому температурному діапазоні — 395—375 °С. Пізніші мінеральні зародження першого дорудного та мінерали наступних мінеральних комплексів виділялися в умовах гідротермальної системи.

На відміну від допродуктивного мінерального комплексу продуктивні парагенетичні асоціації формувались в умовах періодичної гетерогенізації (закипання) гідротерм. Чіткі ознаки кипіння рудоутворювальних розчинів повсюди проявлені в мінералах арсенопірит-пірит-кварцової з золотом і золото-сульфосольової асоціацій. Формування парагенетичних асоціацій післяпродуктивного комплексу відбувалося у відносно спокійній обстановці з гомогенних гідротермальних розчинів, які мали загалом порівняно низькі температури. Усе це засвідчує конвергентність фізико-хімічних умов формування головних золотоносних парагенезисів, незалежно від типу ендегенних процесів, рівня їхньої баричності та специфіки геолого-структурних ситуацій.

Подібно абсолютній більшості золоторудних родовищ, Балка Широка характеризується розвитком золото-сульфідної мінералізації, насамперед в умовах високо-середньотемпературних (380—350 до 210—200 °С) за участі різної густини винятково вуглекислотно-водних розчинів з проявами ознак інтенсивної гетерогенізації та дегазації, здебільшого за рахунок CO<sub>2</sub>. Власне такий режим тривалого невривноваження гідротермальної системи з відгонкою вуглекислотних компонентів (а вуглець, подібно Fe<sup>2+</sup> магнетиту, є додатковим потенціал регулювальним компонентом) слугує важливою передумо-

вою різкої зміни кислотно-лужних, окиснювально-відновних умов і руйнування в зв'язку з цим золотоносних комплексів [1, 8] та кристалізації самородного металу:  $\text{Na} [\text{AuCl}_2] + \text{CH}_4 \rightarrow \text{Au} \downarrow + \text{CO}_2 \uparrow + \text{NaCl}$ , тобто  $8\text{Au}^+ + \text{C}^{4+} \rightarrow 8\text{Au}^0 + \text{C}^{4+}$ . Швидко та ефективно реакція може відбуватися також під час перенесення золота у вигляді хлорауратних комплексів, наприклад,  $\text{KAuCl}_4$  [12]. Зважаючи на потенціал визначальної ролі сполук вуглецю і генерацію у висхідних гідротермах CO<sub>2</sub> під час окиснення CH<sub>4</sub> [17], що ми визначили на родовищах Східного Узбекистану [16], ця міграційно-кристалізаційна модель має загальне значення та є додатковим свідченням конвергентності фізико-хімічних умов розвитку золотої мінералізації.

Ознаки прояву подібних процесів достатньо впевнено дешифруються під час вивчення складу та стану флюїдних включень у мінеральних родовищах, завдяки чому можуть і повинні використовуватися у ході здійснення прогнозно-оцінювальних і пошукових робіт. Треба також враховувати, що продуктивний період розвитку полісульфідної мінералізації, як і в більшості родовищ, характеризується доволі нерівномірним виділенням золота в складі окремих асоціацій і дрібніших мінеральних парагенезисів. Це зумовлено різницею механізмів появи його концентрацій. У ранньосулфідних асоціаціях (з піритом II-а (*n-p* провідність), піритом II, арсенопіритом I-а, халькопіритом I-а) переважають процеси селективного осадженого золота на енергоактивних поверхнях сульфідних зерен і в мікротріщинах, у пізньосулфідних (власне золото-сульфосольова асоціація) провідна роль належить співкристалізації самородного золота з піритом II-б (*n-p* провідність), арсенопіритом I-б, халькопіритом I-б, сфалеритом, галенітом, бляклими рудами й іншими сульфосолями. Як засвідчили дослідження Г. Джеймса і Г. Банкрофта, ймовірність адсорбції та відновлення золота на поверхні сульфідів (пірит, арсенопірит, піротин) — чи не головний механізм концентрування золота, особливо за порівняно низьких концентрацій і температури. Спочатку золото адсорбується у вигляді хлориду чи гідроксиду. Опісля сульфідний напівпровідник під час перенесення електронів

діє як відновник за реакцією:  $\text{KAuCl}_4^- + 2\text{S}^{2-} + 12\text{H}_2\text{O} \rightarrow 8\text{Au}^0 + 3\text{SO}_4^{2-} + 24\text{H}^+ + 32\text{Cl}^-$ , або  $2\text{AuCl}_2^- + 3\text{S}^{2-} \rightarrow 2\text{Au}^0 + 3\text{S}^0 + 8\text{Cl}^-$ .

Сьогодні для дослідженого родовища ми не можемо достеменно кількісно оцінити внесок процесів осадження золота на ранніх сульфідах і за його співкристалізації з сульфідами, бляклими рудами та іншими сульфосолями в продуктивні власне золотоносні стадії, однак численні аналогії дають підстави вважати, що провідна роль усе ж таки належить пізнім виділенням самородної металеві фази золота у зв'язку з процесами масово-спонтанного руйнування золотоносних комплексів у діапазоні 280—200 °С. Такий міграційний і кристалізаційний геолого-геохімічний цикл для самородного золота доведений експериментально [2] й обґрунтований статистичним аналізом дуже представницької вибірки ТБГХ-даних [3—5, 8, 10]. Власне такий або дуже близький температурний інтервал 270—210 °С устанавлюється для Балки Широкої по кварцу II-а з халькопіритом, бляклими рудами, а для родовища загалом оптимальний інтервал 290—210 °С.

Нарешті, розглянемо ще один механізм регуляції фізико-хімічного режиму, трансляції та руйнування золотоносних комплексів флюїдів та кристалізації самородного золота на певних ділянках родовища, де здебільшого були крихкі деформації. Саме такими були геолого-структурні та фізико-хімічні умови формування золота для Балки Широкої з її протяжними кулісноподібними зонами інтенсивного катаклазу, сітчастої тріщинуватості та брекчіювання порід у вузлах зчленування з поперечними структурами. Чіткий літологічний контроль зруденіння залізистими кварцитами можна задовільно пояснити потенціал визначальною (для гідротермальної системи) роллю магнетиту як "відновника" золота, що звільнялось під час руйнування поширених у природі хлорауратних комплексів, зокрема за реакцією  $(\text{Na}, \text{K}) [\text{AuCl}_2] + \text{FeFe}_2\text{O}_4 \rightarrow \text{Au} \downarrow + \text{Fe}_2\text{O}_3 + (\text{Na}, \text{K}) \text{Cl}$ , тобто  $\text{Au}^{1+} + \text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Au}^0 + \text{Fe}^{3+}$ . Самі ж висококомпонентні прошарки джеспілітів, порівняно з іншими петротипами порід родовища, були найсприятливішими ділянками крихкого розвантаження тектонічних напружень

і бар'єрно-спонтанного осадження золота [6, 11, 13].

З огляду на усе сказане доцільно розглядати окремо два структурно неоднакові комплекси ТБГХ-критеріїв золотого зруденіння, що використовуються на різних стадіях вивчення та оцінення об'єктів: 1 — критерії проявів мінералоутворювальної діяльності вуглекислотно-водних розчинів у масштабах всього продуктивного періоду, охоплюючи весь набір сульфідних і золото-сульфосольових асоціацій, різною мірою золотоносних; 2 — критерії підвищеної золотоносності руд, що стосується умов розвитку власне золотих парагенезисів, які відображають специфіку РТ-режиму руйнування металоносних комплексів і кристалізації золота в складі пізніх сульфідно-сульфосольових асоціацій в діапазоні температури в 290—210 °С. Загалом критерії 1-ої групи орієнтовані на першочергове вирішення пошукових і частково прогностно-розбракувальних завдань для з'ясування можливого розмаху золотого зруденіння у вертикальному перерізі; 2-ої — вони більш важливі в плані перспективної оцінки руд і локального прогнозування в межах конкретних рудних ділянок, тіл, золоторудних стовпів-бананців. На даному етапі досліджень обґрунтованіше можна говорити про характер і зміст критеріїв тільки першої групи, що відносяться до вирішення пошукових завдань і дрібномасштабного прогнозування. До числа сприятливих серед них відносяться такі: 1) розвиток у складі рудних тіл мінералоутворювальних асоціацій, в яких наявні первинно-вторинні, а в допродуктивному кварці I — вторинні включення вуглекислотно-водного складу, без різниці типу їхніх фазових співвідношень ( $\Gamma - \text{P}_{\text{CO}_2} - \text{P}_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $\text{P}_{\text{CO}_2} - \Gamma - \text{P}_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $\Gamma - \text{P}_{\text{CO}_2}$ ); 2) загалом високо-середньотемпературний діапазон (380—200 °С) повної гомогенізації дво-трьохфазових інклюзивів названих типів, найоптимальніший температурний інтервал 290—210 °С, поширення в мінеральних сімействах флюїдних включень з дво- і однофазової  $\text{CO}_2$  з широкими варіаціями її густини (від 0,87 до 0,65 г/см<sup>3</sup>) з гомогенізацією в рідку фазу; 4) методично достовірні дані про різке падіння тиску (більше, ніж на 70—80 МПа) і зниження густини капсульо-

ваної  $\text{CO}_2$  (на  $n$  0,1 г/см<sup>3</sup>); 5) дані про значну величину температурного інтервалу (більше 100 °C) формування продуктивних асоціацій у конкретних перерізах рудних тіл; 6) декрептометричні дані про значне збільшення рівня газонасиченості полімінеральних проб руди або навколорудних метасоматитів; 7) хроматографічні дані про різке підвищення частки  $\text{CO}_2$  у газовій суміші капсульованих флюїдів; 8) дані термоградієнтного аналізу, що свідчать про відносно невеликі розміри відповідного показника (менше 11—12 °C/100 м), що дає змогу дійти висновку про суттєвіше поширення зруденіння нижче рівня ерозійного зрізу.

Несприятливими ознаками золотого зруденіння потрібно вважати такі: 1) поширення в рудах мінеральних асоціацій інклюдивів з переважанням багатозонних (з нерозчинними твердими фазами типу  $\Gamma\text{—P}_{\text{H}_2\text{O}}\text{—T}$ ) включень без  $\text{CO}_2$ , а також власне водних газопо-рідинних включень, що теж позбавлені  $\text{CO}_2$ ; 2) порівняно високотемпературна (>400 °C) газова гомогенізація газопо-рідинних включень або багатозонних — з розчиненням NaCl опісля зникання газової фази; 3) поширення в мінералах винятково рідино-газових включень без  $\text{CO}_2$  з гомогенізацією в рідинну фазу в інтервалі 280—240 °C і 150—80 °C; 4) декрепто-хроматографічні дані про низький рівень газонасиченості полімінеральних рудних і навколорудних проб за незначного вмісту  $\text{CO}_2$ ; 5) дані про подальшу стабілізацію *PT*-режиму і гомогенний стан розчинів за несуттєвих варіацій їхніх барогустинних показників.

Що стосується аналізу мінливої поведінки рудних тіл (зон) на глибину їхнього вертикального розмаху та перспективності, то це вкрай важливе завдання, як початок системних досліджень, проілюстроване в [13], на прикладі поки що розвідувального профілю "О" в інтервалі глибин ~500 м, де палеотемпературний градієнт становив 10 °C на 100 м.

Розрахунки показали [7, 13], що вертикальний розмах цієї мінералізації нижче ерозійного зрізу може бути оцінений у 700—800 м, тобто нижче розкритої свердловинами частини зруденіння в 500 м, орієнтовно на 200—300 м. У відношенні зруденіння загалом, охоплюючи допродуктивну мінералі-

зацію з магнетитом, то його вертикальний розмах з різним ступенем золотоносності може становити не менше 500 м глибше від його розкритої частини, тобто >1000 м. Усі ці розрахунки добре узгоджуються з оцінкою загальної генетичної позиції родовища, фізико-хімічні умови якого, особливо в зеленіокам'яних структурах, мають великий розмах зруденіння (понад 1000 м) за невеликих вмістів самородного золота. А виявлена тенденція до зменшення теплового градієнта (до 9—8 °C/100 м) дає змогу розглядати отримані оцінки як мінімально можливі. Отримані на сьогодні ТБГХ-дані також дають змогу вирішувати і деякі інші елементи локального прогнозу з виокремленням ознак закипання і дегазації  $\text{CO}_2$  на ділянках підвищеної золотоносності рудних зон. У деяких випадках водночас з'являється можливість передбачити не тільки положення, але й просторову поведінку золоторудних стовпів-бонанців, що має першочергове значення для розвідувальних, експлуатаційних робіт та геолого-економічної оцінки запасів на родовищі.

Чіткіша конкретизація критеріїв "пошукової" групи (перша) і цілеспрямоване розроблення "оціночних" критеріїв (2 група) є головним завданням ТБГХ-досліджень у наступні періоди — уже опісля війни і нашої Перемоги. Водночас передбачається їхня виробнича апробація та ТБГХ-обґрунтування конкретних рекомендацій у плані експресної корекції напрямку геологорозвідувальних і, ймовірно, експлуатаційних робіт на родовищі Балка Широка.

**Висновки.** 1. З огляду на викладене, в статті доцільно розглядати два структурно неоднакові комплекси ТБГХ-критеріїв та оціночних ознак золотого зруденіння, що використовуються на різних стадіях вивчення і оцінки об'єктів.

Критерії першої групи — це критерії проявів мінералоутворювальної діяльності різногустинних вуглекислотно-водних розчинів у масштабах усього продуктивного періоду.

Критерії підвищеної золотоносності руд, що стосуються умов розвитку власне золотих парагенезисів, які відображають специфіку *PT*-режиму руйнування металоносних комплексів і кристалізації золота.

На даному етапі досліджень обґрунтованішими є дані про характер і зміст критеріїв тільки першої групи, що відносяться до вирішення пошукових завдань і дрібномас-

штабного прогнозування. На пізнішому етапі досліджень планується оцінювання вертикального поширення зруденіння з глибиною рудолокалізації.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Банникова Л.А., Барсуков В.Л. Использование изотопных и химических данных для изучения окислительно-восстановительных реакций в гидротемальных системах. *Геохимия*. 1985. № 3. С. 314—323.
2. Вилор Н.В., Сарапулова В.Н. К вопросу о миграционной способности золота при эндогенных процессах. *Вопросы геологии месторождений золота*. Томск, 1970. С. 178—182.
3. Лазько Е.М., Ляхов Ю.В., Пизнюр А.В. Физико-химические основы прогнозирования постмагматического оруденения. Москва: Недра, 1981. 256 с.
4. Лазько Е.М., Ляхов Ю.В., Павлунь М.М., Пизнюр А.В., Попівняк І.В. Принципи термобарогеохімічного прогнозування, пошуків та оцінки золоторудних родовищ на території України. *Вісн. Львів. ун-ту. Сер. геол.* 1992. Вип. 11. С. 25—40.
5. Лазько Е.М., Ляхов Ю.В., Павлунь М.М., Пизнюр А.В., Попівняк І.В. Термобарогеохімія в прикладній геології (пошуки, розвідка та експлуатація родовищ). *Мінерал. зб.* 1992. № 45, вип. 2. С. 15—21.
6. Ляхов Ю., Павлунь М., Ціхонь С. Термостатованість палеогідросистем як основа генетичної типізації золоторудних родовищ України. *Мінерал. зб.* 2002. № 52, вип. 2. С. 38—43.
7. Ляхов Ю., Павлунь М., Ціхонь С., Попівняк І. Кількісне термобарогеохімічне моделювання полів золотого зруденіння в практиці локального прогнозування. *Мінерал. зб.* 2001. № 51, вип. 1. С. 22—34.
8. Ляхов Ю.В. Флюидний режим рудообразующих процессов и факторы концентрации золота в разнотемных условиях. *Мінерал. зб.* 1988. № 42, вип. 2. С. 26—33.
9. Ляхов Ю.В., Павлунь М.М. Термобарогеохімічне обґрунтування рудноформаційної приналежності ендегенних золоторудних родовищ України: теоретичні та методологічні аспекти. *Мінерал. зб.* 2002. № 52, вип. 1. С. 68—73.
10. Ляхов Ю.В., Павлунь Н.Н., Пизнюр А.В., Попівняк І.В. Термобарогеохімія золота. Львов: Світ, 1995. 280 с.
11. Ляхов Ю.В., Павлунь Н.Н., Сиворонов А.А., Бобров А.Б., Поздеев К.М., Галун Н.Л., Ціхонь С.И. Типы золотоконцентрирующих наногидросистем Украины (по данным термобарогеохимии). *Тр. ВНИИСИМС*. Т. 26. *Синтез минералов и методы их исследования*. Александров, 2000. С. 381—386.
12. Овчинников Л.Н. Прикладная геохимия. Москва: Недра, 1990. 230 с.
13. Павлунь М. Деякі особливості генезису родовища Балка Широка (Український щит) за результатами термобарогеохімічних досліджень. *Вісн. Львів. ун-ту. Сер. геол.* 2021. Вип. 35. С. 3—9. <http://dx.doi.org/10.30970/vgl.35.01>
14. Павлунь М.М. Досвід крупномасштабного прогнозування грейзенового молібден-вольфрамового зруденіння в герцинідах Джунгаро-Балхашія (Центральний Казахстан). *Мінерал. зб.* 2002. № 51, вип. 2. С. 22—33.
15. Павлунь М.М. Про метаморфогенно-гідротермальну природу родовищ золоторудних формацій Українського щита. *Мінерал. журн.* 2015. 37, № 3. С. 98—111. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.37.03.098>
16. Павлунь Н.Н., Костенко А.И., Костин В.А. Масс-спектрометрические исследования углеродсодержащих соединений при решении генетических вопросов на золоторудных объектах Восточного Узбекистана. *Материалы XII Всесоюз. симпоз. по стабильным изотопам в геохимии*. Москва, 1989. С. 198—200.
17. Углерод и его соединения в эндогенных процессах минералообразования (по данным изучения включений в минералах). *Труды Республ. совещ.* Львов, 1975. 267 с.
18. Amagat E.H. Nouveau réseau d'isothermes de l'acide carbonique. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*. 1891. 113. P. 446—451.
19. Amagat E.H. Sur la détermination de la densité de liquéfiés et de leurs vapeurs saturées. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*. 1892. 114. P. 1093—1098.

Надійшла 28.07.2022

#### REFERENCES

1. Bannikova, L.A. and Barsukov, V.L. (1985), *Geochemistry*, No. 3, Moscow, pp. 314-323 [in Russian].
2. Vilor, N.V. and Sarapulova, V.N. (1970), *Issues of geology of gold deposits*, Tomsk, pp. 178-182 [in Russian].
3. Lazko, E.M., Liakhov, Yu.V. and Pizniur, A.V. (1981), *Physico-chemical foundations for predicting post-magmatic mineralization*, Nedra, Moscow, 256 p. [in Russian].
4. Lazko, Ye.M., Liakhov, Yu.V., Pavlun, M.M., Pizniur, A.V. and Popivniak, I.V. (1992), *Visnyk Lviv University. Ser. Geol.*, Iss. 11, Lviv, pp. 25-40 [in Ukrainian].



5. Lazko, Ye.M., Liakhov, Yu.V., Pavlun, M.M., Pizniur, A.V. and Popivniak, I.V. (1992), *Mineral. Coll.*, No. 45, Iss. 2, Lviv, pp. 15-21 [in Ukrainian].
6. Liakhov, Yu., Pavlun, M. and Tsikhon, S. (2002), *Mineral. Coll.*, No. 52, Iss. 2, Lviv, pp. 38-43 [in Ukrainian].
7. Liakhov, Yu., Pavlun, M., Tsikhon, S. and Popivniak, I. (2001), *Mineral. Coll.*, No. 51, Iss. 1, Lviv, pp. 22-34 [in Ukrainian].
8. Liakhov, Yu.V. (1988), *Mineral. Coll.*, No. 42, Iss. 2, Lviv, pp. 26-33 [in Russian].
9. Liakhov, Yu.V. and Pavlun, M.M. (2002), *Mineral. Coll.*, No. 52, Iss. 1, Lviv, pp. 68-73 [in Ukrainian].
10. Liakhov, Yu.V., Pavlun, N.N., Pizniur, A.V. and Popivniak, I.V. (1995), *Thermobarogeochemistry of gold*, Svit, Lvov, 280 p. [in Russian].
11. Liakhov, Yu.V., Pavlun, N.N., Sivoronov, A.A., Bobrov, A.B., Pozdeev, K.M., Galun, N.L. and Tsikhon, S.I. (2000), *Proc. of VNIISIMS*, Vol. 26, *Synthesis of minerals and methods for their study*, Aleksandrov, pp. 381-386 [in Russian].
12. Ovchinnikov, L.N. (1990), *Applied geochemistry*, Nedra, Moscow, 230 p. [in Russian].
13. Pavlun, M. (2021), *Visnyk of the Lviv University. Ser. Geol.*, Iss. 35, Lviv, pp. 3-9 [in Ukrainian]. <http://dx.doi.org/10.30970/vgl.35.01>
14. Pavlun, M.M. (2002), *Mineral. Coll.*, No. 51, Iss. 2, Lviv, pp. 22-33 [in Ukrainian].
15. Pavlun, M.M. (2015), *Mineral. Journ. (Ukraine)*, Vol. 37, No. 3, Kyiv, pp. 98-111 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.37.03.098>
16. Pavlun, N.N., Kostenko, A.I. and Kostin, V.A. (1989), *Proc. of the XII All-Union Sympos. on stable isotopes in geochemistry*, Moscow, pp. 198-200 [in Russian].
17. (1975) Carbon and its compounds in endogenous processes of mineral formation (according to the study of inclusions in minerals), *Proceedings of the Republican meeting*, Lvov, 267 p. [in Russian].
18. Amagat, E.H. (1891), *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Vol. 113, pp. 446-451.
19. Amagat, E.H. (1892), *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Vol. 114, pp. 1093-1098.

Received 28.07.2022

M.M. Pavlun, DrSc (Geology of Metallic and Non-Metallic Minerals), Prof.

E-mail: mykola.pavlun@lnu.edu.ua; <http://orcid.org/0000-0002-8634-6576>

H.I. Hotsaniuk, PhD (Paleontology and Stratigraphy), Assist. Prof.

E-mail: hotsanyuk@ukr.net; <http://orcid.org/0000-0002-2794-7013>

A.V. Ivanina, PhD (Paleontology and Stratigraphy), Assist. Prof.

E-mail: ant\_iv@ukr.net; <http://orcid.org/0000-0003-4112-941X>

Ivan Franko National University of Lviv

4, Hrushevskiy St., Lviv, Ukraine, 79005

#### THERMOBAROGEOCHEMICAL EXPLORATION AND ASSESSMENT CRITERIA OF GOLD MINERALIZATION OF THE BALKA SHYROKA DEPOSIT (MIDDLE DNEIPER REGION)

A scheme of the staging and thermobaric regime of the formation of the Balka Shyroka deposit gold mineralization (Middle Dnieper megablock of the Ukrainian Shield) was constructed, and the sequence and thermobaric intervals of ore formation were determined. Mineral parageneses are combined into four mineral associations that form a series of mineral complexes: pre-productive magnetite-quartz, productive polysulphide, which includes two productive gold-bearing associations (arsenopyrite-pyrite-quartz with gold and gold-sulphosalt) and post-productive carbonate (quartz-calcite mineral association). Gold-producing associations were formed in a rather narrow range of temperature and pressure changes of the ore-forming environment specific to its composition and aggregate-density state. This affected the phase typomorphism of the respective families of fluid inclusions. Carbon dioxide-water inclusions with different phase ratios are common:  $\Gamma\text{-P}_{\text{CO}_2}\text{-P}_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $\text{P}_{\text{CO}_2}\text{-}\Gamma\text{-P}_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $\text{P}_{\text{CO}_2}\text{-P}_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $\Gamma\text{-P}_{\text{CO}_2}$ . The most optimal temperature for homogenization of gas-liquid inclusions (according to the first type) is 210-290 °C. In minerals, there are families of two-phase and one-phase CO<sub>2</sub> fluid inclusions with wide variations in its density (from 0.65 to 0.87 g/cm<sup>3</sup>) and homogenization into the liquid phase. These typomorphic features are thermobarogeochemical search criteria and evaluation signs of gold mineralization. Equally important is the definition of the paleotemperature gradient and the spatial extrapolation of its change with depth, which makes it possible to calculate the vertical extent of mineralization, the level of its erosional section, and the depth of thinning out.

**Keywords:** gold mineralization, mineral paragenesis, mineral association, mineral complex, thermobarogeochemistry, fluid inclusions, crystallization parameters, Balka Shyroka deposit, Ukrainian Shield.