

УДК 553.21/24:549.41(477)

## ТЕРМОБАРОГЕОХІМІЯ ПРОЦЕСІВ РУДОУТВОРЕННЯ НА ЗОЛОТОРУДНОМУ РОДОВИЩІ БАЛКА ШИРОКА (УКРАЇНСЬКИЙ ЩИТ)

**Микола Павлунь**, д-р геол. наук, професор,  
професор кафедри геології корисних копалин і геофізики  
[mykola.pavlun@lnu.edu.ua](mailto:mykola.pavlun@lnu.edu.ua)  
<https://orcid.org/0000-0002-8634-65762>

**Олег Гайовський**, канд. геол. наук, доцент,  
завідувач кафедри геології корисних копалин і геофізики  
[oleh.hayovskyu@lnu.edu.ua](mailto:oleh.hayovskyu@lnu.edu.ua)  
<https://orcid.org/0009-0000-5178-4173>

**Тарас Шваєвський**, аспірант кафедри геології корисних копалин і геофізики  
[Taras.Shvaievskiy@lnu.edu.ua](mailto:Taras.Shvaievskiy@lnu.edu.ua)  
Львівський національний університет імені Івана Франка,  
вул. М. Грушевського, 4, Львів, Україна, 79005

У статті схарактеризовано морфологію, морфометрію та фазовий склад флюїдних включень у мінералах руд родовища золота Балка Широка (Середнє Придніпров'я, Український щит). Контрастність головних парагенезисів і чіткі прояви ознак їхніх часових співвідношень (а це текстури перетинання, заміщення, брекчіювання й цементації) дають підстави для виокремлення низки послідовно утворених мінеральних асоціацій стійкого складу і їхніх комплексів, які суттєво відрізняються за продуктивністю. За допомогою термобарогеохімічних досліджень виділено найстійкіші асоціації мінералів і визначено температуру мінералоутворення. Допродуктивний комплекс представлений пірит-кварцовою асоціацією (з магнетитом) і охоплює три парагенезиси – магнетит-кварцовий (435–390 °С), піротин-пірит-кварцовий із магнетитом (395–320) і кварц-сидеритовий із перевідкладеним магнетитом (280–240 °С). Продуктивний полісульфідний комплекс складений такими двома послідовними мінеральними асоціаціями, як арсенопірит-пірит-кварцова із золотом (385–310 °С, 194–123 МПа) і золото-сульфосольова (290–200 °С, 93–79 МПа). Перша охоплює такі парагенезиси: турмалін-кварцовий (385–300 °С), кварц-піротин-піритовий (385–310) і золото-арсенопірит-сфалерит-халькопірит-кварцовий (335–310 °С), друга – кварц-піритовий (290–210 °С), кварц-халькопірит-арсенопірит-сульфосольовий із золотом (275–210), клейофан-халькопірит-кварцовий (245–210), клейофан-галеніт-кварцовий (245–210) і кварц-анкеритовий (210–200 °С). Післяпродуктивний карбонатний комплекс представлений кварц-кальцитовою мінеральною асоціацією, до складу якої входять кальцит-пірит-кварцовий (150–110 °С) і кварц-кальцитовий (110–90 °С і нижче) парагенезиси.

На підставі наведених даних розроблено модель стадійності й термобарогеохімічного режиму формування родовища Балка Широка. Вона відображає еволюцію мінерального складу руд, агрегатний стан і хімічний склад розчинів, що можна успішно застосовувати під час розшуків, оцінювання та прогнозування золотого зруденіння з глибиною і на флангах родовища Балка Широка.

*Ключові слова:* термобарогеохімія, флюїдні включення, мінеральна асоціація, парагенезис, родовище золота, Середнє Придніпров'я, Український щит.

DOI <https://doi.org/10.30970/min.74.04>

**Вступ.** Термобарогеохімія процесів рудоутворення визначається послідовністю формування мінеральних асоціацій і головних парагенезисів, які часто об'єднані в мінеральні комплекси, та термобарогеохімічними даними їхньої кристалізації, агрегатним станом і складом відповідних флюїдних включень у мінералах. Ці дані – основа синтезу схеми стадійності і *PT*-режиму формування родовища та вирізнення допродуктивного, продуктивного й післяпродуктивного комплексу мінералів.

**Мета** – навести нові термобарогеохімічні дані про фізико-хімічний режим і термобарогеохімічні параметри формування золоторудного родовища Балка Широка.

**Результати досліджень і обговорення.** Родовище Балка Широка розташоване на високомагнітній ділянці західного крила антиклінальної складки серед метаморфізованих вулканогенних і вулканогенно-осадових товщ сланцево-джеспіліт-толейтової формації, що зазнали плікативних дислокацій. Вони поширені в зоні екзоконтактового впливу Чкаловського масиву тоналіт-плагіогранітної формації та реліктів лавово-субвулканічних полів ріодацитової вулканогенної формації, які інтродовані їхніми плутонічними комагматами з утворенням ріодацит-плагіогранітної вулкано-плутонічної асоціації [1, 2]. Джеспіліти представлені агрегатами кварцу, хлориту, біотиту, амфіболу. За результатами термобарогеохімічних (ТБГХ) досліджень, сульфідні й карбонатні, які повсюдно наявні в залізистих кварцитах, утворилися значно пізніше як мінералого-геохімічний наслідок рудоутворювальної діяльності пневматолітових і гідротермальних розчинів.

Зруденіння на родовищі приурочене до системи субпаралельних зон сітчасто-прожилкової мінералізації, іноді без чітких меж, складної конфігурації, нерідко з безрудними інтродованими інтервалами. Рудні зони супроводжуються не лише інтенсивно катаклазованими, мілонітизованими, а й метасоматично зміненими породами. До продуктів гідротермально-метасоматичних змін належать утворення березито-лиственітової формації. Це витримані за простяганням зони потужністю від 5–7 до 10–20 м і більше – у внутрішніх частинах породи лиственітизовані (березити по кислих породах), карбонатизовані, поступово переходять в аргілітизовані в жильних чи лінзоподібних рудних тілах кварц-сульфідного складу, для яких притаманний спектр мінерального різноманіття, потужність змінюється від десятків сантиметрів до декількох метрів, а протяжність не перевищує перших сотень метрів. Рудні тіла найчастіше займають згідне положення у зонах метасоматично змінених порід, а їхня локалізація і нерідко напрямок визначаються позицією пластів залізистих кварцитів і структурними флуктуаціями вмісних порід – флексури, S-подібні складки та ін.

Родовище Балка Широка характеризується порівняно стійким золото-кварц-сульфідним типом зі схожим мінеральним складом у межах досліджених нами рівнів жильних тіл. Особливо широким розвитком у рудах користуються прості сульфідні, кристалізація деяких з них відбувалася неодноразово у вигляді ряду послідовних генерацій (у розумінні Д. Григор'єва, 1961): пірит I, II-а, б, III → піротин I, II → халькопірит I → сульфосоли срібла I → галеніт I. Часто окремі генерації мінералів зазначеного ряду або їхні зародження тісно асоціюють із золотом. Ця обставина (з урахуванням ТБГХ і мінералого-фізичних (ТЕРС) досліджень) може бути пояснена сепаратним осадженням частини золота в період рудоутворення або кристалізацією сульфідів спільно з іншою частиною золота під час формування порівняно вузьких парагенезисів (Банкрофт, 1985). У рудах порівняно стійко присутній магнетит I, сфалерит I (марматит-клейофан), карбонати I, II, III (сидерит, анкерит, кальцит), іноді трапляється марказит I, II; у виділеннях кварцу II-а, б зафіксовано вкраплення самородного золота. Мінерали руд родовища кристалізувалися в певній послідовності, оскільки формують досить контрастні за складом мінеральні парагенетичні асоціації. Їхній склад, характер взаємовідношень і порядок виділення мінералів у рамках кожної асоціації дає змогу представити формування руд родовища як результат розвитку складного ендегенного процесу. Цілеспрямоване вивчення мінералів і їхніх поєднань методами ТБГХ дає підстави з'ясувати зміни агрегатного стану рудоутворювальних розчинів, їхнього хімічного складу й термобаричного режиму в координатах часу і простору.

Дані мікроскопічного вивчення флюїдних інклюдивів у прозорих і напівпрозорих мінералах руд родовища засвідчують, що вони у своєму складі мають широкий розвиток одно-, двох- і трифазових включень, які за агрегатним станом і хімічним складом відповідають різним типам мінералоутворювальних розчинів. Разом із тим не всі генерації мінералів і далеко не завжди і повсюдно мають однакову ступінь насиченості флюїдними включеннями. Наприклад, у таких мінералах, як сидерит, анкерит, кальцит, вони трапляються дуже зрідка. Натомість кварц, навпаки, часто перенасичений включеннями різних генетичних типів.

За морфологією ступінь їхньої кристаломорфологічної досконалості знижується від ранніх генерацій до пізніх. При цьому вакуолі включень, намагаючись набути енергетично вигідніші обриси, нерідко наближаються за формою до витягнутої сфери, іноді до негативного кристала мінералу-господаря. Для кварцу характерні різноманітні комбінації призм і ромбоєдрів, а для карбонатів – зростання різних ромбоєдрів. Пізнішим генераціям цих мінералів притаманні неправильні каверноподібні вакуолі включень. Такі самі форми характерні для різних вторинних включень незалежно від генерації мінералу-господаря, при цьому їхні обриси нерідко суттєво ускладнені у зв'язку з явищами «розшнуровання» й перенаповнення вакуолей у вузлах перетину різновікових залікованих тріщин (Калюжний, 1960). Тріщини головню призводять до значних змін первинного наповнення включень, тим самим створюючи своєрідну «заборону» для термометричних визначень незалежно від методів вивчення (гомогенізації, кріометрії тощо). Адже без урахування цього ТБГХ-дослідження як такі абсолютно марні, а теоретичні побудови хибні, як і зовсім неправильними будуть наші уявлення про перебіг процесів мінералогенезу, фізико-хімічну природу утворення мінералів і руд та їхню прогностичну оцінку.

Розмір включень у мінералах досліджуваного родовища змінюється від 0,05–0,01 до 0,005–0,001 мм і менше. Дуже зрідка у кварці, який тісно асоціює із золотом, халькопіритом і піритом, трапляються мікрівключення розміром 0,03–0,05 мм (св. 2848-11, гл. 315,4 м). Найпоширеніші включення розміром 0,005–0,010 мм, які є головним об'єктом досліджень.

Однофазні включення представлені водним розчином із низькою концентрацією солей, про що свідчить відсутність у них твердих фаз і прямі спостереження їхнього термометричного розкриття без утворення сольового залишку. Такі включення представляють релікти теплотворного середовища і присутні здебільшого в найпізніших зародженнях мінералів (кварц, клейофан, карбонати), які завершують процес формування родовища.

Двофазні включення – це релікти газових і водних розчинів, перші більш високотемпературні щодо других. Залежно від густини початкових розчинів виникають суттєво газоподібний і рідинно-газовий або газозво-рідкий фазовий склад. Перші, з наповненим водним розчином (від 5–25 до 45 %), характерні для ранніх зароджень кварцу, який асоціює з магнетитом, піритом; інші, з наповненням 65–85 %, притаманні пізнішим зародженням тієї самої генерації, а також генерації кварцу, який асоціює з турмаліном, арсенопіритом (із золотом), сульфосолями (із золотом), сфалеритом, галенітом і анкеритом. Газозво-рідкі включення з наповненням від 85–95 до 100 % трапляються в мінералах кварц-кальцитової асоціації.

Трифазові включення – це мікропроби розчинів, в одному випадку водно-вуглекислотні, а в іншому – хлоридно-натрієві (профіль «0», св. 2848, гл. 315,4 м; св. 2848П, гл. 573,4 м). Водно-вуглекислотні розчини частіше є газозво-рідкими з фазою рідкого діоксиду вуглецю (CO<sub>2</sub>), який займає 10–25 % об'єму вакуолі, однак нерідко спільно з ним трапляються включення, рідка вуглекислота у яких займає до 30–35 і навіть 90–95 % об'єму вакуолі. Хлоридно-натрієві розчини, крім газової і рідкої фаз, містять одну, зрідка дві тверді фази, що складені галітом, який займає 20–40 % об'єму вакуолі. Трифазові включення з твердою фазою трапляються в залікованих тріщинах у кварці, який асоціює з арсенопіритом, однак відносно кварцу, вони сингенетичні до магнетиту, піриту й піротину, тому поводять себе як вторинні включення.

Включення з CO<sub>2</sub> порівняно широко поширені у кварці, який асоціює з піритом, піритом, халькопіритом, арсенопіритом, бляклими рудами, золотом, сфалеритом і галенітом,

та значно розвинені на родовищі. Ці інклюзиви в кварці розташовані по зонах росту (первинні), частіше у вигляді об'ємних «роїв», які приурочені до центральних частин зерен (первинно-вторинні вклучення).

Контрастність головних парагенезисів і достатньо чіткі ознаки їхніх вікових співвідношень (текстури перетину, заміщення, брекчіювання, дроблення і цементації) дає нам змогу використати низку послідовно утворених мінеральних асоціацій<sup>1</sup> стійкого складу й вирізнити їхні комплекси, які суттєво відрізняються за ступенем продуктивності, що відображено в табл. 1 [6]. Крім цього, певні матеріали ми використали з праць [3, 8].

В окремих випадках локально розвинені мінеральні поєднання, у яких один-два члени вказаних парагенетичних асоціацій [8] випадають або ж на конкретній ділянці родовища не проявлені, однак назагал такі поєднання за складом і часом утворення дуже близькі головним, найстійкішим асоціаціям і через це розглядаються як їхні фаціальні різновиди.

Пірит-кварцова асоціація (з магнетитом) є найранішою, кристалізація її мінералів відбувалася, вірогідно, після формування магматичних тіл гранітоїдного складу, які закартовано у межах родовища і на прилеглий території (Чкаловський масив). Ця мінеральна асоціація дуже широко розвинута в межах вивченого розрізу профілю «0». Вона представлена дрібнозернистим сірих відтінків кварцом I, з раннім зародженням якого виділився синхронний магнетит (суцільні агрегати або дрібне вкраплення), формуючи магнетит-кварцовий парагенезис (А).

Таблиця 1

### Послідовність і термобарогеохімічні інтервали формування мінерального складу руд родовища Балка Широка

Мінеральний комплекс	Мінеральна асоціація і парагенезис
I. Допродуктивний магнетит-кварцовий ( $T = 435\text{--}240\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	1. <i>Пірит-кварцова (з магнетитом) мінеральна асоціація</i> (435–240 °C): А – магнетит-кварцовий (435–390 °C); Б – піротин-пірит-кварцовий (із магнетитом) (395–320 °C); В – кварц-сидеритовий (із перевідкладеним магнетитом) (280–240 °C).
II. Продуктивний полісульфідний ( $T = 385\text{--}200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $P = 194\text{--}79\text{ МПа}$ )	2. <i>Арсенопірит-пірит-кварцова (із золотом) мінеральна асоціація</i> (385–310 °C, 194–123 МПа): Г – турмалін-кварцовий (385–300 °C); Д – кварц-піротин-піритовий (385–310 °C); Е – золотого-арсенопірит-сфалерит-халькопірит-кварцовий (335–310 °C). 3. <i>Золото-сульфосольова мінеральна асоціація</i> (290–200 °C, 93–79 МПа): Ж – кварц-піритовий (290–210 °C); З – кварц-халькопірит-арсенопірит-сульфосольовий із золотом (275–210 °C); І – клейофан-халькопірит-кварцовий (245–210 °C); К – клейофан-галеніт-кварцовий (245–210 °C); Л – кварц-анкеритовий (210–200 °C).
III. Післяпродуктивний карбонатний ( $T = 150\text{--}90\text{ }^{\circ}\text{C}$ і нижче)	4. <i>Кварц-кальцитова мінеральна асоціація</i> (150–110 °C): М – кальцит-пірит-кварцовий (150–110 °C); Н – кварц-кальцитовий (110–90 °C).

<sup>1</sup> Мінеральна асоціація – термін, який ми вживаємо в розумінні Н. Петровської (1973): це поєднання мінералів, які виникли закономірно в єдиному процесі, що обмежений у просторі й часі та відбувається за визначених фізико-хімічних умов. Назва мінеральних асоціацій і парагенезисів будується за принципом збільшення ролі мінералів. А мінеральний парагенезис – це закономірне поєднання мінералів, утворених тільки як рівноважна мінеральна система в рамках термодинамічних умов, що допускають виникнення цієї системи, і в обмежений відрізок часу, що відповідає одному ступеню мінеральної рівноваги.

Дещо пізніше до нього приєднується пірит I *n*-провідності й піротин I (піротин-пірит-кварцовий (епізодично з магнетитом) парагенезис (Б)). Мінерали кварц-сидеритового (з магнетитом) парагенезису (В) виділилися в тісній асоціації з найпізнішими зародженнями кварцу I, сидериту й магнетиту; магнетит, імовірно, виник унаслідок часткового розчинення більш ранніх утворень оксидів заліза (у складі залізистих кварцитів) та їхнього наступного перевідкладення. Нерідко мінералами асоціації складені тонкі прожилки (0,3–1,0 см), у яких рудні мінерали утворюють нерівномірне вкраплення не лише у виділеннях кварцу I, а й у біляжилних зонах гідротермально змінених порід.

Релікти мінералоутворювальних розчинів виявлено лише у виділеннях кварцу I, і вони представлені таким комплексом первинних і первинно-вторинних включень: суттєво газовими (наповнення рідким (водним) розчином до 25 %); рідинно-газовими (наповнення водним розчином до 45 %); газиво-рідкими (наповнення від 50–70 до 75–85 %). Суттєво газові й рідинно-газові інклюзиви, які гомогенізувалися в газову фазу за 390–435 °С, поширені в ранніх зародженнях кварцу I, який асоціює з магнетитом. Газово-рідкі включення гомогенізуються в рідку фазу в інтервалі 320–395 °С. У включеннях перехідного наповнення нерідко спостерігаються критичні явища, які свідчать про перехід газоподібних розчинів у рідкі: 395–375 °С – за цих умов у системі рудоутворення завершувалася кристалізація мінералів магнетит-кварцового парагенезису (А) і розпочиналося формування піротин-пірит-кварцового, часто з магнетитом парагенезису (Б). Найпізніші газиво-рідкі включення з  $T_{\text{гом}}$  280–240 °С характерні для кварц-сидеритового парагенезису (В), що відповідає завершенню формування пірит-кварцової асоціації й магнетит-кварцового комплексу [8].

Арсенопірит-пірит-кварцова із золотом асоціація, розвиток якої пов'язаний із новим етапом активізації тектонічних рухів, дуже поширена в рудних тілах. Вона є надранньою у складі золотовмісного полісульфідного мінерального комплексу. Від ранніх асоціацій відрізняється суттєвим підвищенням ролі сульфідів та їхнім різноманіттям. Формування цього мінерального поєднання фіксувалося різким підвищенням температури розчинів з яскраво виявленою ТБГХ-спеціалізацією.

Формування рудної речовини в цей період розпочалося з виділення дрібнозернистих агрегатів продуктивного кварцу IIа і турмаліну (турмалін-кварцовий парагенезис – Г) за температури 385–360 °С; у деяких випадках до них приєднується пірит IIа (*p-n* провідності), який нерідко сингенетичний раннім зародженням кварцу IIа без участі турмаліну. У піриті IIа наявні вкраплення золота; ще дещо пізніше від кристалізації ранніх зароджень піриту IIа (385–370 °С) і далі, за 370 °С розпочинається кристалізація піротину II (кварц-піротин-піритовий парагенезис – Д) [8].

Мінерали цих парагенетичних асоціацій просторово тяжіють до зальбандових частин рудних прожилків, центральна частина яких найчастіше виповнена середньозернистим кварцом IIа, халькопіритом, сфалеритом і арсенопіритом Ia із самородним золотом (золото-арсенопірит-сфалерит-халькопірит-кварцовий парагенезис – Е), епізодично тут наявні й мінерали пізніших асоціацій. Нерідко можна спостерігати, що перехід від дрібно- до середньозернистих агрегатів кварцу IIа в одних випадках відбувається дуже різко, в інших – поступово, без ознак суттєвої перерви в мінералоутворенні. У другому випадку помітне збільшення зернистості мінеральних агрегатів можна інтерпретувати як наслідок перепадів тиску, спричинених внутрішньорудними тектонічними флуктуаціями й перенасиченням металоносних розчинів у початковий період кристалізації з поступовою стабілізацією термодинамічної рівноваги рудоутворювальної системи зі встановленням відповідного балансу розчинів зі стінками рудовмісних тріщин.

У дрібнозернистих різновидах кварцу IIа виявлено три типи первинно-вторинних газиво-рідких включень: двофазні, що містять не лише водний розчин, а й, імовірно, граничні



і неграничні вуглеводні й високогустинну вуглекислоту ( $> 0,914 \text{ г/см}^3$ ), що побічно підтверджується криометричними дослідженнями й термометричним розкриттям включень, гомогенізація яких відбувається в рідку фазу за  $385\text{--}310 \text{ }^\circ\text{C}$ . У конкретних кварцових індивідах два інші різновиди включень утворені синхронно та розрізняються за співвідношенням фаз: двофазні з наповненим водним розчином  $65\text{--}75 \%$  і трифазні з  $\text{CO}_2$ , які представляють закриті багатокомпонентні мікросистеми – водний розчин (рідка фаза  $\text{H}_2\text{O}$ ), водно-вуглекислотний розчин (рідка фаза  $\text{CO}_2$ ) і газова фаза  $\text{CO}_2$ . Мінливість фазового складу включень пов'язана і є наслідком первинної неоднорідності початкових мінералоутворювальних гідротерм, що В. Калюжний інтерпретував (1960, 1982) як результат гетерогенного стану системи.

Трифазові включення з рідким  $\text{CO}_2$  частково гомогенізуються в рідку фазу (зникає газова фаза  $\text{CO}_2$ ) за  $8,5\text{--}15,5 \text{ }^\circ\text{C}$ , в окремих випадках за  $28,2 \text{ }^\circ\text{C}$ . З огляду на дані праць [9, 10], густина гомогенної рідкого  $\text{CO}_2$  в таких включеннях відповідає значенням від  $0,866\text{--}0,809$  до  $0,688 \text{ г/см}^3$ . Сингенетичні до них двофазові газопо-рідкі (без рідкого  $\text{CO}_2$ ) включення сягають повної гомогенізації за  $370\text{--}310 \text{ }^\circ\text{C}$ . Подібні родини включень свідчать про те, що виділення дрібнозернистих зароджень кварцу Па відбувалося за участі гетерогенних водно-вуглекислотних розчинів у температурному інтервалі  $385\text{--}310 \text{ }^\circ\text{C}$  за суттєвих варіацій тиску від  $> 194\text{--}123$  до  $93 \text{ МПа}$ .

У середньозернистому кварці Па, який асоціює із халькопіритом, арсенопіритом Іа, сфалеритом, золотом (арсенопірит-сфалерит-халькопірит-кварцовий парагенезис – Е), виявлено первинно-вторинні газопо-рідкі трифазні включення з галітом (до  $20\text{--}40 \%$  об'єму вакуолі). Фаза галіту в них розчиняється після зникнення газової фази ( $150\text{--}179 \text{ }^\circ\text{C}$ ) за температури  $350\text{--}330 \text{ }^\circ\text{C}$ ; тиск у такому випадку оцінено в  $190\text{--}170 \text{ МПа}$ .

Золото-сульфосольова асоціація завершує процес рудоутворення в період виділення мінералів полісульфідного комплексу. Асоціація не дуже поширена в рудних тілах, має мінеральну своєрідність і певні геохімічні типи флюїдних включень, які відображають сутність певних типів гідротермальних розчинів у формуванні низки парагенезисів у її складі. Вона складена середньозернистими агрегатами кварцу Пб з одночасними вкрапленнями піриту Пб (*n-p* провідність). За нашими спостереженнями, нерідко пірит Пб розташований по зонах росту кварцу П (кварц-піритовий парагенезис – Ж), дещо пізніше до них приєднуються арсенопірит Іб і халькопірит, з ранніми зародженнями якого трапляються зростання сульфосолей і золота (кварц-халькопірит-арсенопірит-сульфосольовий із золотом парагенезис – З) і пізніше формується клейофан-халькопірит-кварцовий парагенезис – І). Часто спостереженнями визначено асоціацію клейофану й галеніту – ці мінерали виділялися одночасно, вони формують клейофан-галеніт-кварцовий парагенезис – К).

У кварці Пб, який є наскрізним мінералом асоціації, виділяється родина синхронних включень – газопо-рідкі з рідким  $\text{CO}_2$  і без нього. За включеннями без видимої фази  $\text{CO}_2$  визначено температуру мінералоутворення золото-сульфосольової асоціації, а за включеннями суттєво вуглекислотного складу – густину  $\text{CO}_2$  ( $0,688\text{--}0,653 \text{ г/см}^3$ ). Температура повної гомогенізації таких інклюзивів змінюється від  $290$  до  $210 \text{ }^\circ\text{C}$ , часткової –  $26,0\text{--}28,0 \text{ }^\circ\text{C}$ , що дає змогу на *PT*-діаграмі стану бінарної системи  $\text{H}_2\text{O}\text{--}\text{CO}_2$  визначити тиск в інтервалі  $93,0\text{--}79,0 \text{ МПа}$ . Завершують процес формування золотоносного полісульфідного комплексу мінерали кварц-анкеритового парагенезису – Л. У пізніх зародженнях кварцу Пб, які сингенетичні до анкериту, виявлено первинно-вторинні включення з гомогенізацією в рідку фазу за  $210\text{--}200 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Кварц-кальцитова мінеральна асоціація є речовинним свідченням діяльності нової порції розчинів, шляхи руху якої визначалися характером тектонічних напружень на завершених рудного процесу. Мінерали асоціації є найпізнішими в складі руд родовища, нерідко

цементують або перерізають мінеральні агрегати всіх зазначених вище парагенезисів. Головними рисами асоціації є наявність кварцу III, піриту III *p*-провідності й кальциту.

Напівпрозорий середньозернистий кварц III, що асоціює з піритом III і ранніми зародженнями кальциту (кальцит-пірит-кварцовий парагенезис – М), є господарем комплексу газиво-рідких первинно-вторинних включень, які гомогенізувалися в діапазоні 150–110 °С. Індивіди кальциту фіксуються також і з пізнішими агрегатами кварцу III (кварц-кальцитова парагенетична асоціація – Н), де виявлено газиво-рідкі інклюзиви (частіше овальної, зрідка каверноподібної форми, у кальциті – у вигляді ромбоєдрів), які гомогенізуються за 110–90 °С. Часто наявні однофазні рідкі включення зі стовідсотковим наповненням, що свідчить про тепловодні (50–40 °С) умови кристалізації і, можливо, неодноразову перекристалізацію пізнього кварцу III.

Для того щоб виконати описані вище дослідження з вирізнення мінеральних асоціацій і головних рудних парагенезисів родовища (як генетичної основи для розуміння послідовності процесів рудоутворення), ми застосували методи польового топомінералогічного картування, вивчили речовинний склад, текстурно-структурні особливості й часові взаємовідношення руд, виконали мікроскопічну діагностику, провели мінералого-парагенетичний аналіз. Використали також головні методи ТБГХ-досліджень флюїдних включень у мінералах, виконали типізацію включень за розміром і формою, складом і агрегатним станом, часом утворення щодо мінералу-господаря, застосували барометрію і вимірювання ТЕРС мінералів-напівпровідників тощо. Чому ми так детально на цьому зупиняємось – тому що останніми десятиліття в наукових працях про генезис і ТБГХ-характеристики утворення родовищ корисних копалин вчені ігнорують ці дані, а подають тільки інтегровані характеристики процесів рудоутворення, як це неодноразово робили і ми [5–7]. Однак для того, щоб синтезувати модель процесів формування родовища й розкрити термобарогеохімічний режим та його стадійність, ці дані є вихідними і незамінними (рис. 1). А результати ТБГХ-вивчення послідовних асоціацій і парагенезисів руд, у тому числі продуктивних на самородне золото, дають змогу визначити, що процес рудоутворення відбувався за участі газоподібних і рідких розчинів.

Фазово-агрегатний стан і хімічний склад флюїдних включень у мінеральних асоціаціях руд родовища, температурний і баричний рівень їхнього захоплення, дають підстави припускати, що ТБГХ-процес рудоутворення здійснювався за участі газоподібних і рідких розчинів. Загальна еволюція фізико-хімічного стану розчинів зводиться до такого.

Гомогенізація первинно-вторинних включень різновікових генерацій засвідчує, що температура розчинів, які брали участь у формуванні мінеральних парагенезисів, змінювалася від 435 до 90 °С і дещо нижче. На загальному тлі регресивного температурного режиму мінералоутворення чітко виявлені стрибкоподібні зміни цього параметра, що свідчить про переривчастість рудного процесу в зв'язку з різночасовим надходженням послідовних порцій розчинів. Визначено температурні стрибки для початку кристалізації комплексу ранніх сульфідів (до 180 °С) і перепади температури для полісульфідного комплексу (до 50 °С). За часом такі різкі зміни температурного режиму відповідають періодам суттєвої активізації до- і внутрішньорудних тектонічних напружень, ознаки яких (текстури перетинання, дроблення й цементації) виявлені повсюдно, а ці дані можуть слугувати надійним критерієм для визначення меж розвитку окремих мінеральних комплексів [6]. Про це свідчить також зміна хімічного складу мінералоутворювальних розчинів на початку кристалізації арсенопірит-пірит-кварцової асоціації, що доведено наявністю в мінералах первинно-вторинних включень вуглеводнів, вуглекислоти і твердих фаз NaCl, які не властиві попереднім пірит-кварцовим (із магнетитом) агрегатам або наступним кварц-кальцитовим.

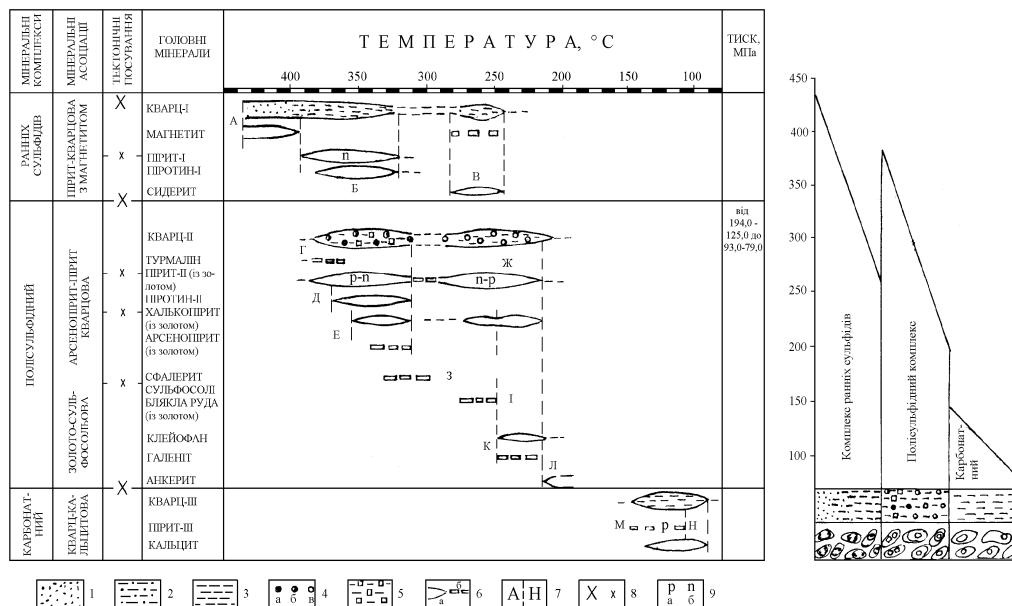


Рис. 1. Схема стадійності і термобаричного режиму формування золоторудного родовища Балка Широка: Температурні інтервали кристалізації мінералів та агрегатний стан мінералоутворювальних розчинів за даними гомогенізації включень: 1 – газоподібних; 2 – критичних; 3 – рідких гомогенних; 4 – гетерогенних з вуглекислою (а), високогустинною – 0,809–0,866 г/см<sup>3</sup> (б) та низькогустинною – 0,653–0,688 г/см<sup>3</sup> CO<sub>2</sub> (в); 5 – порівняно висококонцентровані флюїди з NaCl; 6 – температурні інтервали кристалізації рудних мінералів, що визначені за часовими співвідношеннями з термометрично вивченими мінералами (а) та за результатами мінераграфічних досліджень (б); 7 – температурні границі виділення головних мінеральних парагенезисів: магнетит-кварцового (А), піротин-пірит-кварцового з магнетитом (В), кварц-сидеритового (з перевідкладеним магнетитом) (В'), турмалін-кварцового (Г), кварц-піротин-піритового (Д), золото-арсенопірит-сфалерит-халькопірит-кварцового (Е), кварц-піритового (Ж), кварц-халькопірит-арсенопірит-сульфосольового з золотом (З), клейофан-халькопірит-кварцового (І), клейофан-галеніт-кварцового (К), кварц-анкеритового (Л), кальцит-пірит-кварцового (М), кварц-кальцитового (Н); 8 – тектонічні зсуви: а – між мінеральними комплексами, б – між мінеральними парагенезисами; 9 – дані досліджень ТЕРС піриту: а – діркова провідність, б – електронна

Процес кристалізації мінералів, які входять до складу окремих комплексів, має еволюційний характер і тільки локально ускладнений короткочасними фізико-хімічними флуктуаціями, які не можна трактувати як міжстадійні.

Щодо агрегатного стану розчинів, то кристалізація раних зароджень мінералів допродуктивного комплексу А здійснювалася головню з газових розчинів. Газові розчини зі зниженням температури і через зрідження в близькокритичних умовах порівняно плавно трансформувалися в гідротермальні. Зважаючи на критичні явища у включеннях, конденсація таких розчинів відбувалася в доволі вузькому температурному інтервалі 395–375 °С. Пізніші мінеральні зародження першого і мінерали наступних комплексів кристалізувалися за умов гідротермальної системи.

Натомість продуктивні парагенетичні асоціації формувалися за умов періодично киплячих (гетерогенних) гідротерм, чіткі ознаки яких повсюдно наявні в мінералах арсенопірит-пірит-кварцової із золотом і золото-сульфосольової асоціацій (сингенетичні включення



відмінні за співвідношенням фаз): двофазні з наповненням водним розчином 75–65 % і трифазні з  $\text{CO}_2$ , які є замкнутими багатокомпонентними системами – водний розчин (рідка  $\text{H}_2\text{O}$ ), водно-вуглекислотний розчин (рідкий  $\text{CO}_2$ ) і газова фаза  $\text{CO}_2$ . Зміна фазового складу включень зумовлена первинною неоднорідністю початкових мінералоутворювальних гідротерм, що їх трактують як результат гетерогенного стану системи [6, 7].

Формування парагенетичних асоціацій післяпродуктивного комплексу відбувалося за порівняно стабільних умов з гомогенних гідротермальних розчинів, які мали загалом порівняно низьку температуру.

У процесі мінералоутворення рудовмісні тріщини зазнають неодноразового привідкривання, а збільшення «робочого» об'єму неминуче супроводжується падінням тиску. Це призводить до різкого перенасичення розчинів, що в нашому випадку фіксується за включеннями з твердими фазами  $\text{NaCl}$ , які сингенетичні мінеральним зародженням золото-арсенопірит-халькопірит-кварцового парагенезису (Е). Порушення рівноваги мінералоутворювальної системи внаслідок баричних флуктуацій супроводжувалося відділенням летких компонентів, деяким зниженням температури, зміною кислотності – лужності і розпадом металоносних сполук з утворенням низки певних мінеральних парагенезисів. Роль таких порушень особливо значною була у формуванні продуктивного комплексу мінералів. Саме у кварці Па, б ми виявили родину сингенетичних включень, які відображають умови гетерогенізації водно-вуглекислотних розчинів, а також багатофазові (з  $\text{NaCl}$ ), які відповідають гомогенним умовам мінералоутворення.

За включеннями гетерогенного середовища оцінено тиск, який близький до істинного, – 194,0–79,0 МПа. За включеннями, які гомогенізуються з розчиненням галіту після зникнення газової фази, визначено нижню межу ймовірного тиску в системі рудоутворення – 190,0–170,0 МПа.

Що стосується хімізму мінералоутворювальних розчинів, то різноманіття фазового складу флюїдних включень (двофазних, трифазних із  $\text{CO}_2$  і трифазних з мінералом-в'язнем) дає змогу визначити не тільки особливості їхнього складу, а й сумарну сольову концентрацію розчинів у різні періоди формування руд родовища Балка Широка.

Мінерали допродуктивного комплексу кристалізувалися за участі головно пневматолітових і гідротермальних розчинів помірної концентрації (від 9–11 до 20–24 мас. %  $\text{NaCl}$ ), які містять, вірогідно,  $\text{CO}_2$ , про що свідчить наявність у кварці І первинно-вторинних включень, гомогенізація яких відбувається з критичними явищами за 395–375 °С. А своєрідність хімічного складу гідротермальних розчинів під час формування мінеральних асоціацій продуктивного комплексу виявилась у суттєвій ролі вуглеводнів,  $\text{CO}_2$  і  $\text{NaCl}$ , які не властиві розчинам до- і післяпродуктивного періодів рудного процесу. Рідка фаза  $\text{CO}_2$  наявна головно в первинно-вторинних включеннях у дрібнозернистих агрегатах кварцу Па, а хлористий натрій у вигляді кубічних кристалів – у газово-рідких включеннях середньозернистого кварцу Па. Можна припустити, що спершу водно-вуглекислотні розчини продуктивного періоду в процесі рудоутворювальної діяльності й хімічної взаємодії з бічними породами суттєво збагатилися хлористим натрієм (до 40–42 мас. %  $\text{NaCl}$ ) за умови зниження ролі  $\text{CO}_2$  внаслідок періодичного падіння тиску й дегазації системи. Післяпродуктивний комплекс мінералів формувався, імовірно, зі слабо концентрованих розчинів.

**Висновки.** Родовище Балка Широка – це середньобаричне (до 200 МПа) пневматолітово-гідротермальне високо-середньотемпературне родовище (> 435–200 °С) з чітким інверсійно-регресивним режимом формування. Рудогенерувальна система еволюціонувала близько-субізохорично від вуглекислотно-водно-сольової до суттєво вуглекислотно-водної (головно гетерогенної) та, насамкінець, власне водної (уже гомогенної). Родовище належить до середніх і великих глибин.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бобров О. Б. Корисні копалини України. Ч. 1. Золоторудні родовища Українського щита : метод. посібник. Львів : ВЦ ЛДУ, 1997. 58 с.
2. Бобров О. Б., Гурський Д. С., Сіворонов А. О., Павлунь М. М. та ін. Геолого-генетична типізація золоторудних родовищ України. Київ : УкрДГРІ, 2004. 468 с.
3. Коптюх Ю. М., Гостяєва Н. М., Лазаренко О. Є. та ін. Нові дані з геології та умов утворення золотопрояву Балка Широка. *Мінерал. зб.* 1995. № 48. Вип. 1. С. 115–117.
4. Калюжний В. А. Методи вивчення багатофазових включень у мінералах. Київ : Вид-во АН УРСР, 1960. 184 с.
5. Павлунь М. М. Про метаморфогенно-гідротермальну природу родовищ золоторудних формацій Українського щита. *Мінерал. журн.* 2015. Т. 37. № 3. С. 98–111.
6. 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.
7. Павлунь М. М., Гоцанюк Г. І., Іваніна А. В. Термобарогеохімічні і пошуково-оціночні критерії золотого зруденіння родовища Балка Широка в Середньому Придніпров'ї. *Мінерал. журн.* 2022. Т. 44. № 3. С. 111–119. DOI: <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.44.03.111>.
8. Фомін Ю. О., Савченко Л. Т., Деміхов Ю. М., Петько В. М. Мінералого-геохімічні і ізотопні дослідження золотоджеспілітових руд Балки Широкої. *Мінерал. зб.* 1995. № 48. Вип. 1. С. 110–114.
9. Amagat E. H. Nouveau réseau d'isothermes de l'acide carbonique. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences.* 1891. Т. 113. Р. 446–451.
10. Amagat E. H. Sur la détermination de la densité de liquéfiés et de leurs vapeurs saturées. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences.* 1892. Т. 114. Р. 1093–1098.

## REFERENCES

1. Bobrov, O.B. (1997). Korynsni kopalyny Ukrainy. Ch. 1. Zolotorudni rodovyshcha Ukrainskoho shchyta [Minerals of Ukraine. Part 1. Gold ore deposits of the Ukrainian Shield.]. Lviv: Publishing Centre of Ivan Franko State University of Lviv [in Ukrainian].
2. Bobrov, O.B., Hurskyi, D.S., Sivoronov, A.O., & Pavlun, M.M. et al. (2004). Heoloho-henetychna typizatsiia zolotorudnykh rodovyshch Ukrainy [Geological and genetic typing of gold ore deposits of Ukraine]. Kyiv: UkrSGRI [in Ukrainian].
3. Koptiukh, Yu.M., Hostiaieva, N.M., & Lazarenko, O.Ye. et al. (1995). Novi dani z heolohii ta umov utvorennia zolotoprojavu Balka Shyroka [New data on the geology and conditions of formation of the Balka Shyroka gold manifestation]. *Mineralogical Collection.* 48 (1). P. 115–117 [in Ukrainian].
4. Kaliuzhnyi, V.A. (1960). Metody vyvchennia bahatofazovykh vkluchen u mineralakh [Methods of studying multiphase inclusions in minerals]. Kyiv: Publishing House of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR [in Ukrainian].
5. Pavlun, M.M. (2015). Pro metamorfohenno-hidrotermalnu pryrodu rodovyshch zolotorudnykh formatsii Ukrainskoho shchyta [On the metamorphogenic-hydrothermal nature of deposits of gold ore formations of the Ukrainian Shield]. *Mineralogical Journal.* 37 (3). P. 98–111 [in Ukrainian].
6. Pavlun, M. (2021). Deiaki osoblyvosti henezysu rodovyshcha Balka Shyroka (Ukrainskyi shchyt) za rezultatamy termobarogeokhimichnykh doslidzhen [Some features of the genesis of the Balka Shyroka deposit (Ukrainian Shield) according to thermobarogeochemical research results]. *Visnyk of the Lviv University. Series Geology.* 35. P. 3–9 [in Ukrainian].

7. Pavlun, M.M., Hotsaniuk, H.I., & Ivanina, A.V. (2022). Thermobarogeokhimichni i poshukovo-otsinochni kryterii zolotoho zrudennia rodovyshcha Balka Shyroka v Seredniomu Prydniprovii [Thermobarogeochemical and prospecting-evaluation criteria of gold mineralization of the Balka Shyroka deposit in the Middle Dnieper region]. *Mineralogical Journal*. 44 (3). P. 111–119. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.44.03.111> [in Ukrainian].
8. Fomin, Yu.O., Savchenko, L.T., Demikhov, Yu.M., & Petko, V.M. (1995). Mineralohheokhimichni i izotopni doslidzhennia zolotodzhespilitovykh rud Balky Shyrokoj [Mineralogical, geochemical and isotopic studies of gold-jaspilite ores of Balka Shyroka]. *Mineralogical Collection*. 48 (1). P. 110–114 [in Ukrainian].
9. Amagat, E.H. (1891). Nouveau réseau d'isothermes de l'acide carbonique. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*. 113. P. 446–451 [in French].
10. Amagat, E.H. (1892). Sur la détermination de la densité de liquéfiés et de leurs vapeurs saturées. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*. 114. P. 1093–1098 [in French].

Стаття надійшла до редакції 27.05.2024

Стаття прийнята до друку 24.06.2024

## THERMOBAROGEOCHEMISTRY OF ORE FORMATION PROCESSES AT THE BALKA SHYROKA GOLD ORE DEPOSIT (UKRAINIAN SHIELD)

**Mykola Pavlun, Oleh Haiovskyi, Taras Svaievskyi**

*oleh.hayovskyy@lnu.edu.ua*

*Ivan Franko National University of Lviv,*

*4, Hrushevskoho St., Lviv, Ukraine, 79005*

The article characterizes the morphology, morphometry, and phase composition of fluid inclusions in minerals of the Balka Shyroka gold deposit ores (Middle Dnieper region, Ukrainian Shield). The contrast of the main mineral parageneses and clear manifestations of the signs of their time relationships are revealed, namely the textures of intersection, replacement, brecciation, and cementation. This gave rise to the identification of a number of sequentially formed mineral associations of stable composition and their complexes, which differ significantly in terms of productivity. The most stable associations of minerals were selected and the temperature of mineral formation was determined with the help of thermobarogeochemical studies. The pre-productive complex is represented by a pyrite–quartz association (with magnetite) and includes three parageneses – magnetite–quartz (435–390 °C), pyrrhotite–pyrite–quartz with magnetite (395–320) and quartz–siderite with redeposited magnetite (280–240 °C). The productive polysulphide complex is composed of two sequential mineral associations, such as arsenopyrite–pyrite–quartz with gold (385–310 °C, 194–123 MPa) and gold–sulphosalts (290–200 °C, 93–79 MPa). The first of them covers the following parageneses: tourmaline–quartz (385–300 °C), quartz–pyrrhotite–pyrite (385–310) and gold–arsenopyrite–sphalerite–chalcopyrite–quartz (335–310 °C), the second one – quartz–pyrite (290–210 °C), quartz–chalcopyrite–arsenopyrite–sulphosalts with gold (275–210), cleiophane–chalcopyrite–quartz (245–210), cleiophane–galena–quartz (245–210) and quartz–ankerite (210–200 °C). The post-productive carbonate complex is represented by a quartz–calcite mineral assemblage, which includes calcite–pyrite–quartz (150–110 °C) and quartz–calcite (110–90 °C and below) parageneses.

A model of the staging and thermobarogeochemical regime of the Balka Shtroka deposit formation was developed on the basis of the given data. It reflects the evolution of the mineral composition of ores, aggregate state and chemical composition of solutions. It can be successfully applied during prospecting, evaluation and forecasting of gold mineralization with depth and on the flanks of the Balka Shyroka deposit.

*Key words:* thermobarogeochemistry, fluid inclusions, mineral association, paragenesis, gold deposit, Middle Dnieper region, Ukrainian Shield.