

## СТАТТІ

УДК 553.26:549.41(477)

DOI <https://doi.org/10.30970/vgl.39.02>

### ГЕОЛОГІЧНА БУДОВА І ТЕРМОБАРОГЕОХІМІЧНА ЗОНАЛЬНІСТЬ ЗОЛОТОРУДНИХ РОДОВИЩ МЕТАМОРФОГЕННО-ГІДРОТЕРМАЛЬНОГО КЛАСУ УКРАЇНСЬКОГО ЩИТА

**Микола Павлунь**

*Львівський національний університет імені Івана Франка,  
вул. М. Грушевського, 4, Львів, Україна, 79005  
e-mail: mykola.pavlun@lnu.edu.ua*

У статті стисло схарактеризовано суть термобарогеохімічної зональності й вертикальний розмах зруденіння на різноглибинних золоторудних родовищах Українського щита. Проаналізовано геологічну будову об'єктів у докембрії – на нижньому структурному поверсі, де поширені, зокрема, метаморфогенно-гідротермальні родовища золота великих глибин. Відповідна геологічна ситуація визначила просторово значну витриманість тектонічних елементів родовищ на цьому поверсі й великий ступінь термостатованості за високої ізотермічності прогрітих бокових порід усієї вертикальної колони. Це сприяло формуванню стійких мінеральних асоціацій без помітних змін мінерального складу. Вертикальної зональності рудних тіл у межах величезного вертикального інтервалу майже немає. І тут на допомогу приходить термобарогеохімічна зональність, яку можна визначити на будь-якому рудному об'єкті.

Наведено конкретні особливості зональної будови золоторудних родовищ Українського щита (Майське, Балка Широка, Балка Золота, Сергіївське) і термобарогеохімічної зональності. Схарактеризовано її значення для прогнозно-металогенічної оцінки поширення зруденіння з глибиною.

*Ключові слова:* золото, метаморфогенно-гідротермальні родовища, термобарогеохімічна зональність, докембрій, Український щит, Майське родовище, родовище Балка Широка, родовище Балка Золота, Сергіївське родовище.

**Постановка проблеми.** Термобарогеохімічна зональність метаморфогенно-гідротермальних золоторудних родовищ Українського щита (далі – УЩ) практично дуже слабо вивчена, до того ж на гіпербарних об'єктах великих глибин, де мінералого-геохімічна зональність майже не виявлена, а на родовищах зеленокам'яних структур дуже специфічна. Водночас її дослідження дають змогу уточнювати генетичну позицію родовища, прогнозувати поширення зруденіння з глибиною.

**Мета** – розкрити специфіку термобарогеохімічної зональності на родовищах золота УЩ, показати тренди й закономірності зміни в просторі головних термобарогеохімічних параметрів процесів золотоутворення – термобарогеохімічну зональність.

**Виклад основного матеріалу.** Під зональністю традиційно розуміють упорядковане й закономірне поширення в просторі рудоутворювальних компонентів – хімічних елементів, мінералів чи їхніх парагенетичних асоціацій, а визначену за ними зональність називають мінералого-геохімічною (Рундквист, Неженский, 1975; Смирнов, Еремеев,

1976; Соколов, 1976). Якісна і кількісна оцінка такої зональності можлива на родовищах з полімінеральною комплексною мінералізацією. Натомість великі труднощі виникають на об'єктах, де розвинута проста, нерідко мономінеральна рудна мінералізація, наприклад, пов'язана із золоторудною убогосульфідною формацією чи каситерит-кварцовою та ін. У цьому разі такі мінерали мають обмежене значення для виявлення зональності, водночас, як це не парадоксально, саме вони містять якісно нові й майже універсальні для вивчення зональності родовищ об'єкти – флюїдні включення. Адже головні фізико-хімічні параметри мінералоутворення, що їх виявляють за допомогою включень, закономірно змінюються не тільки із часом, а й у просторі, зумовлюючи повсюдні прояви зональності, яку назвали термобарогеохімічною (далі – ТБГХ) (Лазько, 1981); вона може бути температурна, фазометрична, газохімічна, гідрохімічна та ін. на різних родовищах, що переконливо доведено в працях львівських науковців С. Лазька, Ю. Ляхова, М. Павлуна, А. Пізнюра, І. Попівняка (1976, 1984, 1994, 1995 та ін.). Особливо вагоме значення вона має для метаморфогенно-гідротермальних родовищ УЩ, оскільки чинники ТБГХ-зональності тут зумовлені певним поєднанням геолого-структурних і літолого-фаціальних умов, енергетичними чи парагенетичними зв'язками золотого зруденіння з ультраметаморфічними або власне магматичними процесами, особливостями *PT*-режиму й динаміки спрямовано-регресивного розвитку гідротермальної системи на великих, але все ж таки різних глибинах [1; 3; 5; 7–10; 12; 13 та ін.]. Особливо це стосується діагностики ступеня термостатованості рудоутворювальної системи через значення палеотемпературного градієнта ( $\Delta T/100\text{м}$ ), а власне зміна неоднорідності теплових полів залежить також від динаміки потоку й ентальпії флюїдів, ступеня нагрівання вмісних порід, їх проникності, теплоємності та зміни інших теплофізичних властивостей (Шарапов, 1971).

Спочатку розглянемо геологічні умови глибини формування родовищ і ймовірний вертикальний розмах зруденіння, зокрема для родовищ метаморфогенно-гідротермального класу (Вольфсон, 1976) на УЩ, а тоді перейдемо до опису ТБГХ-зональності на цих об'єктах, яка має для них хоч і фрагментарне, однак вагоме значення через слабе розкриття родовищ буровими свердловинами та гірничими виробками.

За Ю. Білібіним (1955), три послідовні ритми розвитку геосинклінально-складчастої ділянки відповідають трьом ярусам – нижньому, середньому і верхньому, що сьогодні в тектонічних побудовах синонімічно використовують як термін «структурний поверх» (Вольфсон, 1976). Майже загальноприйнятою геотектонічною нормою є твердження, що давні метаморфічні утворення (докембрійські) належать до нижнього структурного поверху (основи, фундаменту), утворення власне складчастого й орогенного етапів розвитку земної кори відповідають середньому поверху, а платформного – верхньому. Однак така уніфіковано-ідеалізована і проста схема витримується далеко не завжди: відомі провінції, де середнього структурного поверху нема, і тоді на нижньому поверсі (на основі, фундаменті) безпосередньо залягає верхній структурний поверх. Такі провінції охоплюють великі ділянки давніх платформ. Часто у фундаменті чи на щиті (виведеній на поверхню частині фундаменту) діагностують процеси автономної чи відображеної активізації; це могло відбуватись у протерозої (протоактивізація) (Казанский, 1969), згодом у палеозої і навіть кайнозої: у давньому субстраті формувалися різні типи родовища значно молодшого віку.

Тому коректна діагностика глибини процесів утворення родовищ украй важлива для прогнозно-металогенічних оцінок території, оскільки має великий вплив на особливості будови родовищ, речовинний склад руд (парагенезиси) і білярудних метасоматитів, вертикальний розмах та масштаби зруденіння.

Головним методом визначення глибини петро- й рудогенезу вважають якомога точнішу реставрацію літолого-стратиграфічного розрізу й геологічних умов формування

родовищ, однак це вдається зробити тільки на рудоносних площах слабкодислокованих шаруватих товщ. Тому застосовують експериментальні дослідження розпаду твердих розчинів, визначення значення тиску за флюїдними включеннями з  $\text{CO}_2$  і  $\text{NaCl}$  та іншими термобарогеохімічними параметрами, визначення ступеня термостатованості через значення палеотермоградієнта ( $\Delta T/100$  м) у палеогідротермальних системах рудоутворення [9; 11 та ін.], який обернено пропорційно пов'язаний з глибиною і вертикальним розмахом зруденіння й залежить від структурного поверху його залягання.

Загалом спостереження засвідчують, що віддаль між верхніми частинами найвищих і найнижчих прихованих рудних тіл на одному родовищі здебільшого не перевищує 600–800 м, а загальний вертикальний розмах зруденіння значно змінний – від декількох сотень метрів до 3–4 км, найчастіше – 0,8–1,5 км. Однак залежно від того, у якому структурному поверсі поширене зруденіння, воно по-різному закінчується догори і з глибиною.

У нижньому структурному поверсі (фундаменті) залягають породи архею і протерозою, зовсім спорадично – низів палеозою, що зазнали метаморфічних змін і високих ступенів метаморфізму та утворені навіть за умов ультраметаморфізму. Порооди фундаменту інтенсивно дислоковані з утворенням синклінальних складок і мікросланцюватості та міжформаційних і міжпластових зривів. За таких умов зруденіння формується здебільшого внаслідок метасоматичного заміщення і частково – завдяки виповненню слабо поширених порожнин. Воно залягає у своєрідних метасоматитах зональних стадій формування давніх розломів, де виявлені розсланцювання й міліонізація порід. Для таких утворень стійкою є кварц-мікроклін-плагіоклаз-біотит-амфіболова асоціація (наприклад, золотоносні біотит-кварц-олігоклазові метасоматити Майського родовища в чорнокіт-гранулітовому комплексі  $\text{AR}_1$  Дністерсько-Бузького мегаблока УЩ). Наявні чіткі ознаки течії матеріалу в разі домінування пластичних деформацій дислокаційного метаморфізму за умов винятково високого тиску й температури (Вольфсон, 1976).

У детально вивчених районах глибина формування верхніх частин рудних тіл цього поверху коливається від 800–1000 до 1500 м, а вертикальний розмах, порівняно зі зруденінням вищих структурних поверхів, максимальний – від 2,0–2,5 до 3,5–4,0 км (золоторудне родовище Колар в Індії). Тобто глибина залягання рудних тіл сягає 5 км – нижче починається перехід рудоконтролювальних і рудовмісних розривів у зони пластинчастої течії, де немає умов для відкладання руд. Така просторова велика витриманість тектонічних елементів родовищ описуваного поверху і високий ступінь термостатованості за високої ізотермічності прогрітих бокових порід усієї вертикальної колонії сприяють формуванню в них стійких мінеральних асоціацій майже без помітних змін мінерального складу у величезному інтервалі – вертикальній зональності рудних тіл майже немає (Вольфсон, 1976).

Золоторудні родовища УЩ належать до метаморфогенно-гідротермальних утворень великих глибин [9], геологоструктурна позиція яких майже тотожна або дуже близька до описаної вище для нижнього (архейського) структурного поверху.

На УЩ вирізняють такі три природно різні типи золотоконцентрувальних палеогідротермальних систем власне метаморфогенно-гідротермальних родовищ нижньо- і верхньоархейського віку ( $T$  – 500–50 °C за  $\Delta T/\Delta P$  – 3–10 °C) [1; 2; 9; 11]:

1. Порівняно термостатована ( $\Delta T$  – 8–10 °C/100 м) середньобарична (до 200 МПа) пневматолітово-гідротермальна система з інтенсивною гетерогенізацією густинного  $\text{H}_2\text{O}$ - $\text{CO}_2$ - $\text{NaCl}$ -флюїду, на початку процесу порівняно концентрованого (до 35 мас. %  $\text{NaCl}$ ). Генотип – Балка Широка у верхньоархейській Чортотлицькій зеленокам'яній структурі (далі – ЗКС) Середньопридніпровської зеленокам'яної області (далі – ЗКО), де ділянки розвантаження та міграції флюїдів просторово розірвані.

2. Порівняно термостатована ( $\Delta T$  – 5–8 °C/100 м) високобарична (до 250–300 МПа) система, від початку – гетерогенно-гідротермальна за участю порівняно високогустинного

H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-NaCl-флюїду (35–50 мас. % NaCl), пізніше – гомогенно-гідротермальна з обмеженим закипанням (гетерогенізацією) CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-розчину, просторово порівняно відірвана від джерел генерування флюїдів. Генотип – верхньоархейські родовища Балка Золота, Сергіївське (Сурська ЗКС).

3. Порівняно термостатована ( $\Delta T/\Delta P$  – 3–5 °C) гіпербарична (до 350 МПа) гомогенно-гідротермальна система за участю порівняно густинного флюїду складу H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-NaCl (сольова концентрація – до 47 мас. % NaCl), пізніше – гетерогенна з достатньо інтенсивною дегазацією CO<sub>2</sub>, наприкінці – суттєво водна, суміщена з джерелом генерування флюїдів. Генотип – Майське родовище в нижньоархейському чарнокіт-гранулітовому комплексі Дністерсько-Бузького мегаблока УЩ.

На цих родовищах, особливо на гіпербаричному Майському, значні труднощі виникають у разі виявлення мінералогеохімічної зональності, про що вже зазначено вище. Характер флюїдного режиму формування золотоносних зон сульфідизації дає змогу зачислити цей новий для регіону тип зруденіння до утворень, енергетично залежних від палеотеплових потоків ранньоархейських гранітних масивів палінгенного походження. Можна припускати, що найважливіші морфологічні й структурно-геохімічні особливості зруденіння цього родовища певним чином зумовлені локалізацією золотої мінералізації в біотит-кварц-олігоклазових метасоматитах у золотоносній структурі термобароаномальних фронтів із проявами процесів палінгенезу. Можна говорити про недалеке переміщення флюїдних мас і досить невисоку диференціацію перенесених ними рудних компонентів. Це відображено в розвитку процесів метасоматозу й відсутності чітко виявлених мінеральних асоціацій та їх зонального розподілу [1; 2; 5].

Натомість на верхньоархейських родовищах, розташованих порівняно далеко від флюїдогенерувальних центрів (Балка Широка та, особливо, Балка Золота і Сергіївське), рудну зональність можна простежити, хоч і з різною контрастністю, у вигляді фаціальної (відкладення) і стадійної (пульсаційної). Розпочнемо аналіз ТБГХ-зональності з Майського родовища [1; 4; 5; 13 та ін.].

Золоторудне *родовище Майське* розташоване на Саврансько-Синицівській площі, яка розташована на північному краю східної частини Дністерсько-Бузького мегаблока, сформованого утвореннями побузького чарнокіт-гранулітового структурно-формаційного комплексу. Геологічна позиція родовища визначена двома великими синкліналями, що складені діафторованими утвореннями лейкогранулітової і гіперстенової гнейсо-кристалосланцевої формацій. Родовище контрольоване розривним порушенням, що має субширотну орієнтацію і локалізоване ближче до північно-західного крила Савранської синкліналі. На площі робіт наявні два просторово індивідуалізовані автохтонні масиви апліто-пегматоїдних гранітів плутонічного вигляду, які утворилися під час метасоматозу й палінгенезу на етапі ультраметаморфізму, – Південний і Північний [1; 3; 5].

Вивчення особливостей рудної мінералізації родовища засвідчило, що мінералогеохімічна зональність тут виявлена дуже неконтрастно. Рудопідготовчими етапами на родовищі були нагромадження первинної речовини суперкрудальних формацій, метаморфізм і гранітизація за умов гранулітової фації, діафторез, динамометаморфізм та ультраметаморфізм за умов амфіболітової фації, кременисто-лужний метасоматоз, палінгенез та кислотне вилугування (передрудне) [4; 5].

Стисло розглянемо етап метаморфогенно-гідротермального рудоутворення [3; 4], на якому вирізняють дві стадії – сульфідного та вуглекислотно-водного метасоматозу. Стадія сульфідного метасоматозу дорудна. Рудогенна система була гомогенно-високощільною складу H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-NaCl з умістом солей до 40–45 мас. % NaCl. Температура змінювалася від 410 до 300 °C, тиск – 350–150 МПа. Друга стадія – продуктивна, третя – післяпродуктивна.

Під час продуктивної стадії формувалася золото-сульфідний комплекс, який охоплює три мінеральні парагенезиси: пірит-П-сфалерит-галенітовий, золото-бісмутиновий і золото-телуридний. Мінералоутворення відбувалося за умов гетерогенної гідротермальної системи з виділенням рідкого  $\text{CO}_2$  ( $1,2\text{--}0,8 \text{ г/см}^3$ ), пізніше – газоподібного ( $0,4\text{--}0,1 \text{ г/см}^3$ ). *ТР*-параметри: від  $310\text{--}300$  до  $200\text{--}100 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $70\text{--}50 \text{ МПа}$  [1; 5; 11].

Характер флюїдного режиму і структурно-речовинний його зв'язок з біотит-кварц-олігоклазовими золотоносними метасоматитами дає змогу зачислити цей тип до метаморфогенно-гідротермальних утворень із чіткими рисами геоенергетичної залежності від палеотеплових полів масиву палінгенних магматитів.

Як засвідчили дослідження, з глибиною спостерігається загальна для золото-сульфідно-кварцових зон родовищ закономірність, яка полягає в підвищенні температури, густини рідкого  $\text{CO}_2$ , тиску й сольової концентрації розчинів. У цьому ж напрямі у кварці-П допродуктивного сульфідного комплексу фіксується зміна газОВО-рідинних включень рідинно-газовими, що засвідчує посилення мінералоутворювальної діяльності газоподібних розчинів. Особливо інтенсивно така тенденція виявлена в Південному блоці родовища. Збільшення температури гомогенізації включень у кварці-П відображено у вертикальних палеотемпературних градієнтах за падінням рудних зон на глибині  $240 \text{ м}$  –  $12,5 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ м}$  у Південному блоці (свердловини 6714, 6715 профілю 21) та на глибині  $375 \text{ м}$  –  $7,2 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ м}$  – у Північному (свердловини 6702, 6701, 6700 профілю 26). Максимальна температура (рис. 1, 2) у період формування допродуктивного комплексу ранніх сульфідів –  $>420\text{--}410 \text{ }^\circ\text{C}$  – характерна для рудних зон у гранітоїдному масиві Південного блока. У цій високотемпературній ділянці виявилася діяльність висококонцентрованих розчинів ( $17,4\text{--}27,2 \text{ мас. \% NaCl}$ ), релікти яких простежено у вигляді флюїдних газОВО-рідинних багатофазових інклюзивів з галітом і силвіном.

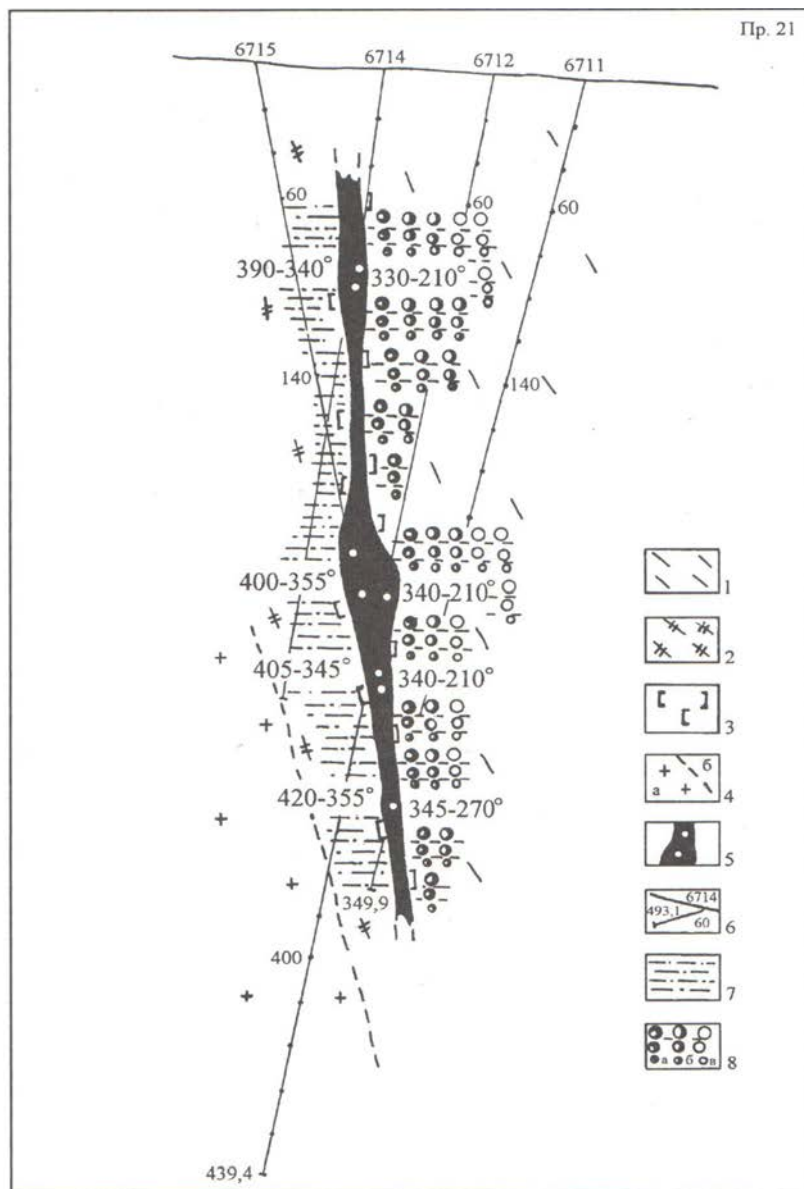
Головна особливість умов формування продуктивних мінеральних парагенезисів, зважаючи на флюїдні включення у кварці-IIIa, б, полягає в провідній ролі розчинів, які неодноразово гетерогенізувалися. У цьому разі варіації *РТ*-режиму розчинів такі: Південний блок –  $350\text{--}200 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $13,5 \text{ МПа}$  ( $282,0 \text{ м}$ ), густина рідкого  $\text{CO}_2$  –  $0,941\text{--}0,203 \text{ г/см}^3$ , Північний блок –  $340\text{--}225 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $11,5 \text{ МПа}$  ( $232,0 \text{ м}$ ),  $0,849\text{--}0,139 \text{ г/см}^3$ . Значення  $\Delta T/100 \text{ м}$  оцінюється в  $6,3 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ м}$  для ранньої продуктивної золото-пірит-кварцової мінеральної асоціації (кварц-IIIa) Південного блока, а під час формування золото-бісмутиніт-телуридного парагенезису воно зменшується до  $4,1 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ м}$  (кварц-IIIб).

Отримані результати засвідчують, що водно-вуглекислі розчини з різним ступенем інтенсивності гетерогенізації були поширені в Південному блоці родовища повсюдно, натомість у Північному блоці такий тип розчинів наявний здебільшого на глибоких гіпсометричних рівнях. Кількісне оцінювання густини рідкого й газоподібного  $\text{CO}_2$  засвідчило збільшення інтенсивності гетерогенізації золотоносних розчинів –  $0,930\text{--}0,139 \text{ г/см}^3$ , що прямо корелює з ділянками підвищеного вмісту золота; у межах рудних зон з низьким вмістом золота участь гетерогенних  $\text{H}_2\text{O}\text{--}\text{CO}_2$ -розчинів у мінералоутворенні невелика.

Значення вертикального градієнта температури розчинів під час формування післяпродуктивного комплексу мінералів оцінюють у  $2 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ м}$  у Південному блоці та  $2,8 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ м}$  – у Північному.

Виявлено також зміну густини  $\text{CO}_2$  і тиску за здійсненням рудних зон у Південному блоці: низькі рівні –  $0,940 \text{ г/см}^3$  і  $273 \text{ МПа}$ , середні рівні –  $0,930 \text{ г/см}^3$  і  $255 \text{ МПа}$ , високі рівні –  $0,927 \text{ г/см}^3$  і  $234 \text{ МПа}$ ; у Північному блоці: середні рівні –  $0,876 \text{ г/см}^3$  і  $203 \text{ МПа}$ , низькі рівні –  $0,894 \text{ г/см}^3$  і  $232 \text{ МПа}$ . Отже, можна оцінити узагальнений градієнт тиску, який відповідає  $16,2 \text{ МПа}/100 \text{ м}$  під час формування золото-пірит-кварцової асоціації та  $10 \text{ МПа}/100 \text{ м}$  – під час кристалізації золото-бісмутиніт-телуридної асоціації.





**Рис. 1. Характер мінливості температури, густини й інтенсивності гетерогенізації мінералоутворювальних розчинів у межах рудної зони профілю 21 (Південний блок):**  
 1 – біотитові плагіогнейси; 2 – мігматити; 3 – амфіболіти; 4 – аплітоподібні граніти (а), геологічні межі (б); 5 – золото-сульфідно-кварцова мінералізація, точки відбирання проб; 6 – номер і глибина свердловини; 7 – ділянки поширення кварцу-II (ранньосульфідний мінеральний комплекс) з включеннями водно-солевих розчинів; 8 – ділянки поширення кварцу-III (золото-сульфідний комплекс) з включеннями водно-вуглекислотних розчинів густиною (г/см<sup>3</sup>) 0,940–0,804 (а), 0,804–0,717 (б), 0,717–0,176 (в); густота крапу й поєднання його всіх (а–в) знаків указує на підвищений ступінь гетерогенізації гідротерм. Для обох комплексів показано температурний інтервал повної гомогенізації включень.

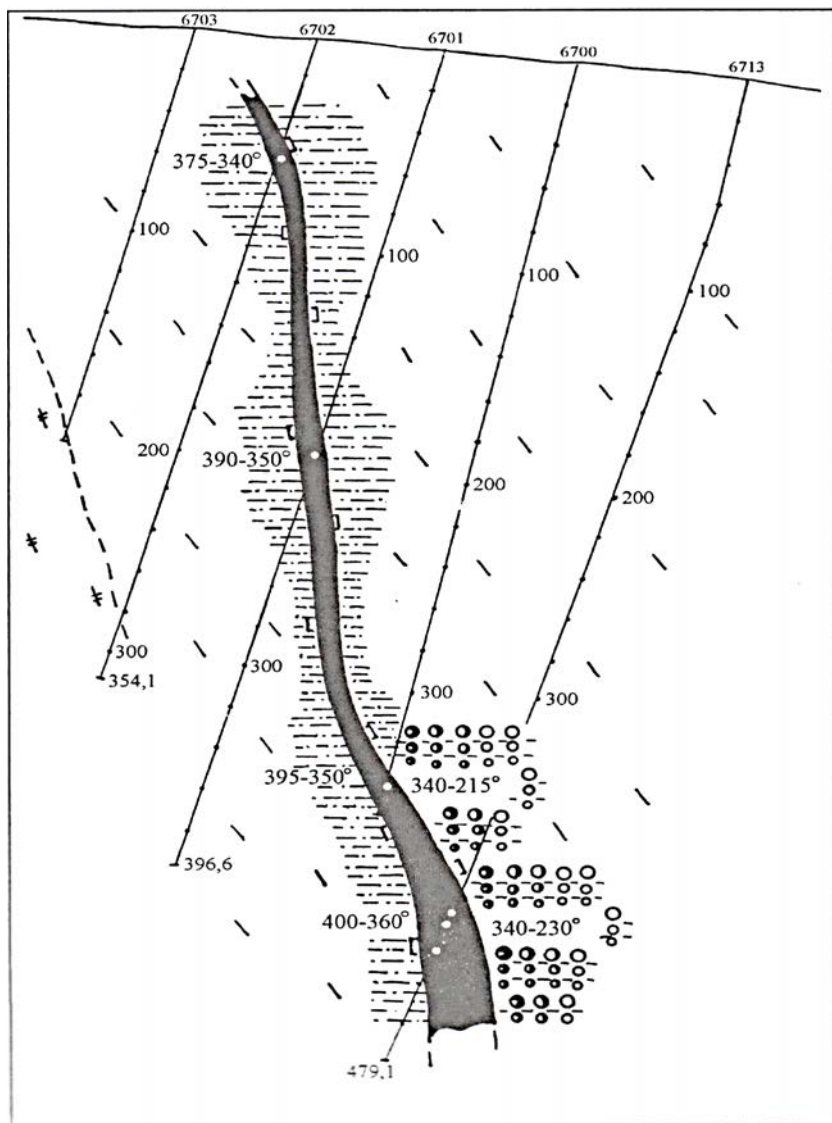


Рис. 2. Характер мінливості температури, густини й інтенсивності гетерогенізації мінералоутворювальних розчинів у межах рудної зони профілю 26 (Північний блок).  
Умовні позначення див. на рис. 1.

Продовжимо аналіз ТБГХ-зональності на *родовищі Балка Широка* [4, 10 та ін.]. Воно залягає в межах високомагнітної ділянки західного крила антиклінальної складки, побудованої утвореннями сланцево-джеспіліт-голеїтової формації. Ці породи поширені в зоні екзоконтактового впливу Чкалівського масиву тоналіт-плагіогранітної формації і ріолітів лавово-субвулканічних полів ріодацитової вулканогенної формації, що інтродовані їхніми плутонічними комагматами з утворенням ріодацит-плагіогранітної вулканоплутонічної асоціації (далі – ВПА).

Зруденіння приурочено до системи субпаралельних зон сітчасто-прожилкової мінералізації, іноді без чітких меж складної конфігурації. Рудні тіла найчастіше посідають згідне положення в зонах метасоматично змінених порід (лиственіт-березити). Їх локалізація і досить часто напрям визначені положенням пластів залізистих кварцитів і структурними флуктуаціями вмісних порід – флексури, S-подібні складки тощо. Таке просторове положення мають кварц-анкерит-сульфідні тіла в прошарках джеспілітів, які відігравали роль осаджувачів золота, що його привносили флюїди генерувальної ріодацит-плагіогранітної ВПА. Подеколи рудні тіла виходять за межі залізистих кварцитів.

Отже, родовище Балка Широка представлене серією кулісоподібних крутоспадних непротяжних зон сітчасто-прожилкової мінералізації, які просторово тяжіють до регіональної диз'юнктивної структури Східночортомлицького розлому [2; 4; 10]. Мінливість просторових змін головних ТБГХ-параметрів виявлена на підставі досліджень включень у відповідних зародженнях кварцу-Па, б продуктивних парагенезисів – золото-арсенопірит-сфалерит-халькопірит-кварцового (Па) і кварц-халькопірит-арсенопірит-сульфосольового із золотом (Пб) [4; 7]. Це дало змогу припустити вірогідну підвідну роль зазначеного розлому на підставі фрагментів лінійної фаціальної зональності із субпаралельною орієнтацією ізотерм і таким же розподілом інших параметрів уздовж зони розлому. Простежується єдина для цього родовища закономірність зменшення температури по піднесенню зон від 385 °C (505,0 м – глибокі рівні родовища) до 285 °C (125,0 м – верхні рівні). Чітко фіксується зменшення густини CO<sub>2</sub>, сольової концентрації розчинів і тиску також з переходом від глибоких до верхніх горизонтів рудних тіл розвідувального профілю «0» й у боки від розлому. У безпосередній близькості від розлому фіксується специфічна особливість формування продуктивних мінеральних парагенезисів, яка полягає в їх кристалізації з насичених CO<sub>2</sub> водно-вуглекислих розчинів. Вони в процесі рудоутворення неодноразово гетерогенізувалися з відокремленням діоксиду вуглецю та, імовірно, вуглеводнів. Баричний режим розчинів змінювався від 194,0–123,0 МПа на глибоких горизонтах родовища та в безпосередній близькості до структури Східночортомлицького розлому – 93,0–79,0 МПа на верхніх рівнях і з віддаленням від зони розлому. З огляду на це, густина рідкого CO<sub>2</sub> з підняттям золотоносних гідротерм у геологічному просторі родовища також синхронно змінювалася від 0,866–0,809 до 0,688–0,653 г/см<sup>3</sup>.

Аналогічні тренди зміни зафіксовані стосовно сольової концентрації гідротермальних розчинів: з їх підняттям та в боки від рудогенерувального розлому концентрація флюїдів змінювалась від 40–42 до помірно-концентрованих – 24 мас. % NaCl.

Виявлені закономірності зміни цих важливих параметрів треба обов'язково брати до уваги під час прогнозно-розшукових робіт у зоні Чортомлицької ЗКС, до того ж золоторудні тіла родовища «прив'язані» до прирозломних ділянок розвитку порід ріодацит-плагіогранітної ВПА і виразно демонструють зв'язки із субширотними розломами – вони для значної частини вулканітів та їх інтрузивних комагматів були **магмопідвідними** і, відповідно, рудогенерувальними, зумовлювали ремобілізацію і перерозподіл золота, наявного в залізистих кварцитах джеспіліт-толейтової формації, його трансляцію флюїдними потоками і наступне перевідкладання за інших термодинамічних і геолого-структурних умов [3].

Суттєво інша геологічна, морфоструктурна і рудноформаційна картина наявна на **родовищах тоналіт-зеленокам'яного СФК Середньопридніпровської ділянки**. Тут вулканогенні породи, метаморфізовані за умов амфіболітової до зеленосланцевої фації, супроводжуються комагматичними плутонічними утвореннями й формують вулcano-плутонічні асоціації. Достатня кількість таких асоціацій дає змогу в окремих випадках убачати деякий причинно-наслідковий зв'язок зруденіння з давнім магматизмом: дещо умовно його можна назвати парагенетичним, маючи на увазі, що процеси магматизму були



головним чинником мобілізації метаморфогенного флюїду і функціонування плутонометаморфогенної рудоутворювальної системи. Про це можна сказати при аналізі термобарогеохімічної зональності. Показовими щодо цього є родовища південної частини Сурської ЗКС – Балка Золота, Сергіївське та ін. Вони сформовані й локалізовані в єдиній ріодацит-плагіогранітній ВПА, з якою пов'язане та локалізоване золоте зруденіння в зонах прожилково-вкрапленої сульфідно-карбонат-кварцової мінералізації з середнім умістом сульфідів 3–5 %. Добре виражені лінійні субмеридіональні зони, контрольовані розривними порушеннями різного порядку й ореольного типу – в екзоконтаті лавово-субвулканічних порід і невеликих дайкоподібних тіл кварцових порфірів. У таких ореолах наявні системи різноорієнтованих прожилків середньою потужністю 0,5 см, які формують орієнтований штокверк складної морфології, рідше трапляються ділянки зближених жил потужністю 10–15 см. Тіла кварцових порфірів слабо мінералізовані в екзоконтаті. Концентроване ж зруденіння розвинуте в метабазах найближчого екзоконтакту, і з віддаленням субвулканічних інтрузій його інтенсивність зменшується [2; 4].

У жильно-штокверковому зруденінні Балки Золотої та в мінералізованій зоні Сергіївського родовища поширені середньо- й дрібнозернисті полімінеральні агрегати повнокристалічного вигляду. У подальшому вони були зруйновані й розкристалізовані внаслідок внутрішньорудного метаморфізму.

Термобарогеохімічна зональність тут і багатьох випадках усе ще досить фрагментарна. Полістадійний золотоносний сульфідно-карбонатно-кварцовий штокверк з віддаленням від тіл кварцових порфірів ріодацит-плагіогранітної ВПА розчленовується на розбіжно-відцентровий зональний ряд розвитку мінералів рідкіснометалевого (молібденіт-кварцового), ранньо- та пізньосульфідного золотого і кварц-карбонатного комплексів. У цьому ж напрямі високотемпературні (500–350 °C) і високобарні (260–200 МПа) процеси трифазової гетерогенізації внутрішньої зони змінюються середньотемпературними (300–200 °C) процесами продуктивного етапу рудоутворення середньої зони і середньо-низькотемпературними умовами (200–100 °C) післяпродуктивних стадій зовнішньої периферійної зони. Для зонально спрямованих термобарогеохімічних процесів характерні висока густина рідкого CO<sub>2</sub> (до 0,890–0,902 г/см<sup>3</sup>) та сольова концентрація (>35 мас. % NaCl) флюїдних фаз у безпосередній близькості до тіл кварцових порфірів, а також різкі падіння тиску (до 75–40 МПа) [7]. Аналіз мінералогічної і термобарогеохімічної зональності розкриває аномальну термобароградієнтну природу таких метаморфогенно-гідротермальних утворень, що пов'язані з формуванням кислих магматитів ВПА, а рушійним чинником мобілізації флюїдів був спрямовано-градієнтний спад тиску під час розряджання інтрузивних напружень і формування відцентрового тріщинного каркасу в екзоконтактових зонах кварцових порфірів, з якими пов'язані вибухоподібні процеси багатofазової гетерогенізації і золотонагромадження [6].

**Висновки.** Аналіз термобарогеохімічної зональності на метаморфогенно-гідротермальних родовищах золота УЩ засвідчив таке:

- здебільшого на родовищах виявлена фаціальна (відкладання) зональність (Майське, Балка Широка), хоча на золоторудних об'єктах Сурської ЗКС (Сергіївське) виявлено стадійну (пульсаційну) зональність;

- тренди й певні закономірності зміни термобарогеохімічних показників зональності дають підстави говорити про рудопідвідну й рудолокалізуювальну роль Чортотлицького розлому на родовищі Балка Широка, різний ерозійний зріз Північної і Південної ділянок на Майському родовищі та найбільший ерозійний зріз центральної частини Сергіївського родовища, де поширена молібденіт-кварцова (рідкіснометалева) мінеральна асоціація, облямована золотими рудами.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

1. Бобров О., Ляхов Ю., Павлунь М., Сіворонов А. Флюїдний режим процесів петро-рудогенезу та термобарогеохімічні критерії оцінки золотоносних зон Майського родовища (Савранське рудне поле, Побужжя). *Мінерал. зб.* 2001. № 51. Вип. 1. С. 12–21.
2. Бобров О. Б. Корисні копалини України. Ч. 1. Золоторудні родовища Українського щита. Львів : ВЦ ЛДУ, 1997. 58 с.
3. Бобров О.Б., Сіворонов А.О. Металогенія ранньоархейських зеленокам'яних поясів. *Зб. наук. праць УкрДГРІ.* Київ, 2001. С. 19–40.
4. Бобров О. Б., Сіворонов А. О., Гурський Д. С., Павлунь М. М., Ляхов Ю. В., Меркушин І. Є., Мудровська І. В., Малюк Б. І., Поздєєв К. М., Скакун Л. З., Бабинін О. К., Степанов В. Б., Лисенко О. А., Фаворов В. О., Гнугенко Н. О., Єхіванов В. А., Шумлянський В. О., Яценко Г. М. Геолого-генетична типізація золоторудних родовищ України. Київ : УкрДГРІ, 2004. 368 с.
5. Бобров О. Б., Сіворонов А. О., Меркушин І.Є., Гурський Д. С., Бакаржійєв А. Х., Маківчук О. Ф., Скакун Л. З., Гнугенко Н. О., Ляхов Ю. В., Фаворов В. О., Сергієнко В. М., Шевчук В. М. Майське золоторудне родовище (геологія, речовинний склад руд, модель утворення). Дніпропетровськ : Арт-Прес, Техпечать, 2000. 168 с.
6. Ляхов Ю., Павлунь М. Термобарогеохімічне обґрунтування рудно-формаційної належності ендегенних золоторудних родовищ України: теоретичні та методологічні аспекти. *Мінерал. зб.* 2002. № 52. Вип. 1. С. 68–73.
7. Ляхов Ю., Павлунь М., Ціхонь С. Термостатованість палеогідросистем як основа генетичної типізації золоторудних родовищ України (за даними дослідження флюїдних включень). *Мінерал. зб.* 2000. № 50. Вип. 2. С. 38–43.
8. Ляхов Ю. В., Сіворонов А. О., Бобров О. Б., Павлунь М. М., Литвинович О. Р., Краснощок В. М. Флюїдний режим метаморфогенно-гідротермального зруденіння золота Сурської зеленокам'яної структури (Український щит). *Мінерал. зб.* 1994. № 47. Вип. 1. С. 27–44.
9. Павлунь М. Теоретичне та практичне значення фазо- і газометричних моделей золоторудних родовищ (за флюїдними включеннями у мінералах). *Мінерал. зб.* 2000. № 50. Вип. 2. С. 31–37.
10. Павлунь М., Гайовський О., Шваєвський Т. Термобарогеохімія процесів рудоутворення на золоторудному родовищі Балка Широка (Український щит). *Мінерал. зб.* 2024. № 74. С. 45–55. <https://doi.org/10.30970/min.74.04>
11. Павлунь М. М. Фізико-хімічні умови і зональність розвитку молібден-вольфрамових та золоторудних формацій (за результатами термобарогеохімічних досліджень) : автореф. дис. ... д-ра геол. наук. Львів, 2003. 53 с.
12. Павлунь М.М. Про метаморфогенно-гідротермальну природу родовищ золоторудних формацій Українського щита. *Мінерал. журн.* 2015. Т. 37. № 3. С. 98–111. URL: <http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0000536069>
13. Stein H.G., Markey R.J., Sundblad K., Sivoronov A.A., Bobrov A.B., Malyuk B.I., Pavlun' M.M. Re-Os ages for molybdenites from the Maiske and Sergeevske gold deposits of Ukraine. *Геофиз. журн.* 1998. Т. 20. № 4. С. 114–117.

**REFERENCES**

1. Bobrov, O., Liakhov, Yu., Pavlun', M., & Sivoronov, A. (2001). Fluidnyi rezhym protsesiv petro-rudohenezu ta termobarogeochemichni kryterii otsinky zolotonosnykh zon Maiskoho rodovyshcha (Savranske rudne pole, Pobuzhzhia) [Fluid regime of the petro-ore-genesis processes and thermobarogeochemical criteria of the evaluation of gold-containing fields at the Mayske deposit (Savranske ore field, Boug region)]. *Mineralogical Collection*, 51 (1), 12–21. [in Ukrainian].

2. Bobrov, O.B. (1997). Korysni kopalyny Ukrainy. Ch. 1. Zolotorudni rodovyshcha Ukrainiskoho 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].
3. Bobrov, O.B., & Sivoronov A.O. (2001). Metaloheniia rannoarkheiskyykh zelenokamianykh poiasiv [Metallogeny of Early Archean greenstone belts]. In *Collection of Scientific Papers of the Ukrainian State Geological Exploration Institute*. Kyiv (pp.19–40). [in Ukrainian].
4. Bobrov, O.B., Sivoronov, A.O., Hurskyi, D.S., Pavlun, M.M., Liakhov, Yu.V., Merkushyn, I.Ye., Mudrovska, I.V., Maliuk, B.I., Pozdieiev, K.M., Skakun, L.Z., Babynin, O.K., Stepanov, V.B., Lysenko, O.A., Favorov, V.O., Hnutenko, N.O., Yekhivanov, V.A., Shumlianskyi, V.O., & Yatsenko, H.M. (2004). Heoloho-henetychna typizatsiia zolotorudnykh rodovyshch Ukrainy [*Geological and genetic typing of gold ore deposits of Ukraine*]. Kyiv: UkrSGRI. [in Ukrainian].
5. Bobrov, O.B., Sivoronov, A.O., Merkushyn, I.Ye., Hurskyi, D.S., Bakarzhiev, A.Kh., Makivchuk, O.F., Skakun, L.Z., Hnutenko, N.O., Liakhov, Yu.V., Favorov, V.O., Serhiienko, V.M., & Shevchuk, V.M. (2000). Maiske zolotorudne rodovyshche (heolohiia, rechovynnyi sklad rud, model utvorennia) [Maiske gold deposit (geology, material composition of ores, formation model)]. Dnipropetrovsk: Art-Pres, Tekhpechat. [in Ukrainian].
6. Lyakhov, Yu. & Pavlun, M. (2002). Termobarogeokhimichne obgruntuvannia rudno-formatsiinoi nalezhnosti endohennykh zolotorudnykh rodovyshch Ukrainy: teoretychni ta metodolohichni aspekty [Thermobarogeochemical grounds of the Ukraine gold-bearing endogenous deposits ore-formational belonging: theoretical and methodological aspects]. *Mineralogical Collection*, 52 (1), 68–73. [in Ukrainian].
7. Lyakhov, Yu., Pavloun', M., & Tsikhon', S. (2000). Termostatovanist paleohidrosystem yak osnova henetychnoi typizatsii zolotorudnykh rodovyshch Ukrainy (za danymy doslidzhennia fluidnykh vkluchchen [Thermostatic control of paleohydrosystems as the basis for genetic typization of the Ukrainian gold deposits (according to fluid inclusions investigations)]]. *Mineralogical Collection*, 50 (2), 38–43. [in Ukrainian].
8. Liakhov, Yu.V., Sivoronov, A.O., Bobrov, O.B., Pavlun, M.M., Lytvynovych, O.R., & Krasnoshchok, V.M. (1994). Fluidnyi rezhym metamorfohenno-hidrotermalnoho zrudennia zolota Surskoj zelenokamianoj struktury (Ukrainskyi shchyty) [Fluid regime of metamorphogenic-hydrothermal gold mineralization of the Surska greenstone structure (Ukrainian Shield)]. *Mineralogical Collection*, 47 (1), 27–44. [in Ukrainian].
9. Pavloun', M. (2000). Teoretychne ta praktychne znachennia fazo- i hazometrychnykh modelei zolotorudnykh rodovyshch (za fluidnymy vkluchenniamy u mineralakh) [Theoretical and applied significance of gold deposits phase- and gas-metric models (according to fluid inclusions in minerals)]. *Mineralogical Collection*, 50 (2), 31–37. [in Ukrainian].
10. Pavlun, M., Haiovskyi, O., & Svaievskyi, T. (2024). Termobarogeokhimiia protsesiv rudoutvorennia na zolotorudnomu rodovyshchi Balka Shyroka (Ukrainskyi shchyty) [Thermobarogeochemistry of ore formation processes at the Balka Shyroka gold ore deposit (Ukrainian Shield)]. *Mineralogical Collection*, 74, 45–55. <https://doi.org/10.30970/min.74.04> [in Ukrainian].
11. Pavlun', M.M. (2003). Fyzyko-khimichni umovy i zonalnist rozvytku molibden-volframovykh ta zolotorudnykh formatsii (za rezultatamy termobarogeokhimichnykh doslidzhen) [*Physical-chemical conditions and zoning of the molybdenum-tungsten and gold-bearing formations development (on the basis of thermobarogeochemical investigations)*]: thesis for doctoral degree of geological sciences. Lviv. [in Ukrainian].
12. Pavlun, M.M. (2015). Pro metamorfohenno-hidrotermalnu pryrodu rodovyshch zolotorudnykh formatsii Ukrainiskoho shchyta [About the metamorphic-hydrothermal nature of gold ore deposit formations of the Ukrainian Shield]. *Mineralogical Journal*, 37 (3), 98–111. Retrieved from: <http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0000536069> [in Ukrainian].
13. Stein, H.G., Markey, R.J., Sundblad, K., Sivoronov, A.A., Bobrov, A.B., Malyuk, B.I., & Pavlun', M.M. (1998). Re-Os ages for molybdenites from the Maiske and Sergeevske gold deposits of Ukraine. *Geophysical Journal*, 20 (4), 114–117.

## **GEOLOGICAL STRUCTURE AND THERMOBAROGEOCHEMICAL ZONING OF GOLD DEPOSITS OF THE METAMORPHOGENETIC-HYDROTHERMAL CLASS ON THE UKRAINIAN SHIELD**

**Mykola Pavlun**

*Ivan Franko National University of Lviv, Hrushevskoho Str., 4, Lviv, Ukraine, 79005  
e-mail: mykola.pavlun@lnu.edu.ua*

The article briefly describes the essence of thermobarogeochemical zoning and the vertical extent of mineralization in gold deposits of different depths on the Ukrainian Shield. The geological structure of the objects in the Precambrian is analysed – in the lower structural floor, where, in particular, metamorphogenetic-hydrothermal gold deposits of great depths are widespread. The corresponding geological situation determined the spatially significant durability of the tectonic elements of the deposits on this floor and a large degree of thermostating with high isothermality of the heated lateral rocks of the entire vertical column. This contributed to the formation of stable mineral associations without noticeable changes in mineral composition. There is almost no vertical zoning of ore bodies within a huge vertical interval. And here thermobarogeochemical zoning comes to the rescue, which can be determined at any ore object.

The article presents specific features of the zonal structure of the Ukrainian Shield gold deposits (Mayske, Balka Shyroka, Balka Zolota, Serhiivske) and thermobarogeochemical zoning. Its significance for the predictive and metallogenic assessment of the distribution of mineralization with depth is characterized.

*Key words:* gold, metamorphogenetic-hydrothermal deposits, thermobarogeochemical zoning, Precambrian, Ukrainian Shield, Mayske deposit, Balka Shyroka deposit, Balka Zolota deposit, Serhiivske deposit.

Дата надходження статті: 28.07.2025

Дата прийняття статті: 25.08.2025

Опубліковано: 29.10.2025