

УДК 553.46+553.411]:550.4
DOI <https://doi.org/10.30970/vgl.40.01>

ДЕЯКІ ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ ТЕРМОБАРОГЕОХІМІЇ МОЛІБДЕН-ВОЛЬФРАМОВИХ І ЗОЛОТОРУДНИХ ФОРМАЦІЙ

Микола Павлунь <https://orcid.org/0000-0002-8634-6576>

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

Прикладний напрямок термобарогеохімії є важливим для реалізації різномасштабних прогнозно-металогенічних робіт і при вирішенні різних геологічних завдань, що потребують розв'язань на різних етапах геологорозвідувального процесу.

Теоретичним підґрунтям термобарогеохімічного прогнозування, розшуків та оцінки зруденіння є стійкість режиму фізико-хімічних умов утворення продуктивних мінеральних парагенезисів. Вони формуються у доволі вузькому діапазоні змін термобарогеохімічних характеристик специфічного за хімічним складом та агрегатно-густинним станом рудоутворювального середовища, що проявляється у фазовому типоморфізмі відповідних родин флюїдних включень практично незалежно від геологічних умов і металогенічної спеціалізації рудних районів. Ця обставина засвідчує виразну конвергентність фізико-хімічних умов і термобарогеохімічних показників розвитку генетично споріднених рудотворчих процесів молібден-вольфрамових, золоторудних та інших формацій.

Не менш важливою передумовою реалізації проблем прикладної термобарогеохімії є мінливість діагностики та просторової екстраполяції градієнтів і трендів цих параметрів (термобарогеохімічна зональність) з визначенням просторового положення зон, які фізико-хімічно сприятливі для розвитку молібден-вольфрамового, золотого чи іншого зруденіння, а також верхньо- і нижньорудних фізико-хімічних рівнів їхнього виклинювання з урахуванням структурно-фаціальних умов рудолокалізації.

Ключові слова: прикладна термобарогеохімія, молібден-вольфрамові і золоторудні формації, конвергентність фізико-хімічних умов і термобарогеохімічних показників, верхньо- і нижньорудні рівні виклинювання зруденіння.

Постановка проблеми. Прикладні завдання геологорозвідувального процесу розв'язують досить давно. Однак теоретичні підґрунтя термобарогеохімічного локального прогнозування, пошуків та оцінки зруденіння розкрито фрагментарно, особливо через розробку пошуково-оцінювальних критеріїв та ознак. І ці аспекти прикладної термобарогеохімії тут висвітлені.

Мета. Показати, яким чином і на якому термобарогеохімічному підґрунті це розробляється і що покладено в основу термобарогеохімічного прогнозування, пошуків і оцінки зруденіння.

Виклад основного матеріалу. Серед різних напрямів сучасної ТБГХ – теоретичного, аналітичного, генетичного і прикладного – саме прикладний найважливіший як з погляду реалізації різномасштабних прогнозно-металогенічних робіт, так і, особливо, при вирішенні геологічних завдань, що потребують розв'язання на різних етапах геологорозвідувального процесу [1, 2, 5] (Павлунь, 1995). Теоретичним підґрунтям ТБГХ-прогнозування, розшуків та оцінки зруденіння є, стійкість режиму фізико-хімічних умов утворення продуктивних

мінеральних парагенезисів. Вони формуються в доволі вузькому діапазоні зміни ТБГХ-параметрів специфічного за хімічним складом та агрегатно-густинним станом рудотворного середовища, що проявляється у фазовому типоморфізмі відповідних родин флюїдних включень, практично незалежно від геотектонічних умов і металогенічної спеціалізації рудних регіонів. Ця обставина засвідчує виразну конвергентність фізико-хімічних умов і ТБГХ-показників розвитку генетично-споріднених рудотворних процесів молібден-вольфрамових, золоторудних та інших формацій (Лазько, Ляхов, 1981, Павлунь, 1995).

Не менш важливою передумовою реалізації проблем прикладної ТБГХ є можливість діагностики та просторової екстраполяції градієнтів і трендів цих параметрів (ТБГХ-зональність) з визначенням для різноглибинних формацій просторового положення зон, які фізико-хімічно сприятливі для розвитку молібден-вольфрамового, золотого чи іншого зруденіння, а також верхньо- і нижньорудних фізико-хімічних рівнів їхнього виклинювання з урахуванням структурно-фаціальних умов рудокалізації (Ляхов, 1998; Лазько, Ляхов, 1981; Ляхов, Павлунь, 1995; Дорошенко, Павлунь, 1991). Ці рівні для молібден-вольфрамових родовищ Центрального Казахстану і золоторудних родовищ Східного Узбекистану наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Зіставлення термобарогеохімічних показників нижнього й верхнього рівнів виклинювання та головного поясу поширення молібден-вольфрамових руд на жильних ендоконтактових родовищах

Показники	Верхньорудний рівень	Головний рудний пояс	Нижньорудний рівень
Температура гомогенізації включень, °С	Від 300 до <280	440–300 (280)	>440–430
Тиск, МПа	До 45–50, низькофлукувативні умови	160–50, значні <i>PT</i> -флукуації	Не менше 165–120
Фазово-агрегатний стан включень	Суттєво рідинні включення, наявність CO ₂ (рідкого й газоподібного), відсутність включень з NaCl	Численні включення з твердими кристалами солей галогенідів (NaCl, KCl та ін.)	Суттєво газові та складні вуглекислотно-водно-сольові включення
Гідрохімічний тип розчинів, %-екв.	Гідросилікатно-хлоридно-натровий $F^-O, Li^{+/-} - \frac{HSiO_3^{72-76}}{Na^{+77-79}}$	Фторидно-хлоридно-калій-натровий $F^- (14-18) Li^{+2} \frac{K^{(14-22) Cl^{-(62-72)}}}{Na^{+ (73-70)}}$	Гідросилікатно-натровий $F^- O, Li^{+1} \frac{Cl^{-54} HSiO_3^{46}}{Na^{+73-77}}$
Ознаки пневматолізу	Суттєво газових включень немає	Численні порівняно великі нерівномірно розташовані включення гетерогенного захоплення і критичної густини	Поодинокі включення гетерогенного захоплення і критичної густини, поширені включення “сухих газів”
Ступінь газонасиченості флюїдів	Порівняно низький	Порівняно високий	Найвищий

Водночас при оцінюванні вертикального розмаху сприятливої для рудоконцентрації фізико-хімічної зони на основі градієнтно-векторного аналізу ТБГХ-зональності слід брати до уваги різний ступінь термостатування різноглибинних флюїдів і його обернено-функціональний зв'язок з величиною ΔT як показника інтенсивності зміни *PT*-режиму:

для вулканогенно-гідротермальних і певною мірою пневматолітово-гідротермальних високо- і порівняно флюктуативних процесів з нахрестізохоричним трендом розвитку ΔT значно більший, аніж для низькофлюктуативних метаморфогенно-гідротермальних з близькоізохоричним трендом перебігу процесів.

Таблиця 2

Порівняння термобарогеохімічних і мінералого-фізичних параметрів, що характеризують верхньо- і нижньорудний фізико-хімічні рівні виклинювання продуктивного золотого зруденіння родовищ Кочбулак, Кизил-Алма і рудопроявів Сегенецької площі

Верхньорудний рівень виклинювання	Нижньорудний рівень виклинювання
Температура повної гомогенізації сингенетичних включень 200–190°C і нижче	Температура гомогенізації сингенетичних включень 280–300°C і вище
$K = \text{CO}_2/\text{CH}_4 \approx 25\text{--}30$ у газовій фазі розчинів включень при вмісті у них азоту понад 40–60 %	$K = \text{CO}_2/\text{CH}_4 \approx 1$ у газовій фазі розчинів сингенетичних включень при вмісті у них азоту менше 10–15 %
$K = \text{Na}^+/\text{K}^+ \approx 2,5\text{--}1,0$ і менше у рідкій фазі розчинів включень	$K = \text{Na}^+/\text{K}^+ \approx 4\text{--}5$ і більше у рідкій фазі розчинів сингенетичних включень
Відсутність включень CO_2 або наявність лише низькогустинних включень газоподібної вуглекислоти	Наявність порівняно високогустинних включень рідкого CO_2
Наявність лише суттєво водних включень винятково гомогенного захоплення	Наявність включень з мінералами-“в’язнями” і суттєво газових включень
Ступінь газонасичення включень порівняно мінімальна	Ступінь газонасичення включень порівняно максимальна
Параметр D_p піриту – 0–20 %	Параметр D_p піриту – 100 %

Таблиця 3

Фізико-хімічні чинники та ознаки продуктивного золотого зруденіння Бельтау-Курамінського вулканоплутонічного поясу

Рудна формація	Фізико-хімічні чинники		
	Середні термобаричні показники рудоутворювального процесу		Характерні риси хімічного складу і агрегатного стану металонесних розчинів
	Продуктивна стадія	Оптимальний інтервал температур	
Перехідна від приповерхневої субвулканічної золото-сульфідно-кварцової з телуридами до середньоглибинної гіпобісальної золоторудної помірно-сульфідної	310–190°C; 58–32 МПа	280–200°C	Насиченість CO_2 ; явище закипання; сольова концентрація водного розчину – у межах 7–10 % NaCl-екв.

Саме цим, вірогідно, можна пояснити стиснутий по вертикалі і порівняно концентрований (бонанцевий) тип розподілу зруденіння в першому випадку і розтягнутий по вертикалі за порівняно низьких вмістів металу, але з дуже значними запасами – у другому [4].

При цьому особливе значення для прогнозного оцінювання зруденіння має законмірне зростання його вертикального розмаху від перших сотень до кількох тисяч метрів з переходом від слабко- до термостатованих систем рудоконцентрування: уже на ранніх етапах ТБГХ-досліджень перспективних площ і родовищ за конкретними параметричними

показниками впевнено можна дешифрувати різноглибинно-формаційний тип зруденіння і відтак завчасно передбачити вірогідний вертикальний розмах (Павлунь, 2003).

Таблиця 4

**Термобарогеохімічні ознаки продуктивного золотого зруденіння
Бельтау-Курамінського вулканоплутонічного поясу**

Термобарогеохімічні ознаки					
Сприятливі				Несприятливі	
Об'єм газової фази включень при 20°C, %	Наявність рідкої фази CO ₂ , об. %	Кількість та об'єм твердих фаз мінералів-“в'язнів”	Характер співвідношення фази рідкого водного розчину:газу :рідкого CO ₂	Тип гомогенізації сингенетичних включень та їхнє поширення	Типи сингенетичних включень і деякі властивості складу і стану капсульованих розчинів
20–25, при гетерогенізації (закипання) – 20–95	Достатньо характерна, від 10 до 95–97, особливо в середньорудній області	Немає	Вкрай нерівномірний – у рудних стовпах; стабільний – зрідка	У рідку фазу (I) або при однаковій температурі – у рідку і газу (II) фази одночасно, досить поширені	Газові або суттєво газові (винятково), або лише газорідинні багатозазові – з об'ємом газової фази >20–25 %, а також суттєво рідинні – з об'ємом газової фази <15–20 %, стабільне співвідношення фаз включень (гомогенне захоплення), відсутність включень з рідкою фазою CO ₂ , переважання в газовій фазі розчинів CH ₄ або N ₂ (>50–60 %)

Наступну предметну кількісну оцінку еродованої і збереженої його частини, яка має принципове значення для вибору методики та напрямів розгортання розвідувальних робіт, отримуємо за відомими формульними обчисленнями.

Вони ґрунтуються, як уже було з'ясовано, на функціональному зв'язку величини палеотермоградієнтів і вертикального поширення зруденіння у відповідних структурно-фаціальних умовах. Як видно з рис. 1, за допомогою простих формул та нескладних графічних побудов оперативно можна обчислити такі параметри зруденіння відповідного формаційного типу: вертикальний розмах і глибину поширення фізико-хімічних зон, сприятливих для розвитку продуктивної мінералізації ($P_{зар}$), її вірогідно найбільш концентрованої (багатої) частини (P_k), порівняну глибину і коефіцієнти (величину в метрах) ерозійного зрізу (K_e) сполучених чи поодиноких рудовмісних блоків, а також напрям і амплітуду епігенетичних (пострудних) блокових переміщень, перспективи і розмах зон їхнього продуктивного (P_e) і багатого (P'_e) зруденіння нижче рівня сучасної поверхні. Якщо кути падіння рудоносних зон чи рудних тіл $\alpha < 80^\circ$, то праві частини наведених формул треба помножити на $\sin \alpha$ (див. рис. 1).

Для молібден-вольфрамового зруденіння найперспективнішими будуть ділянки, де поширені включення високотемпературних щільних розчинів (400–300°C) фторидно-хлоридно-калій-натрового складу і високої сольової концентрації з мінералами-“в'язнями” (65–26 мас. % NaCl), наявні суттєві флуктуації тиску (від 160 до 50 МПа) і поширені рідинно-газові та газиво-рідинні вакуолі, що мають порівняно великі розміри, вкрай нерівномірний розподіл і різко гетерогенний стан.

Для золоторудних формацій типові включення CO₂, законсервовані при 290–180°C в умовах інтенсивної гетерогенізації розчинів з різними співвідношеннями фаз (Г–PCO₂–PH₂O; PCO₂–Г–PH₂O; PCO₂–PH₂O; Г–PCO₂; PCO₂–Г; PCO₂–ГCO₂), поширені включення дво- й однофазового CO₂ з широкими варіаціями густини (для різноглибинних формацій

від 1,02 до 0,4–0,1 г/см³) та одночасною гомогенізацією як у рідку, так і в газову фази. Узагальнення отриманих з цього приводу даних для різноглибинних золоторудних формацій дало змогу синтезувати сприятливі і несприятливі чинники та ознаки зруденіння (табл. 5).

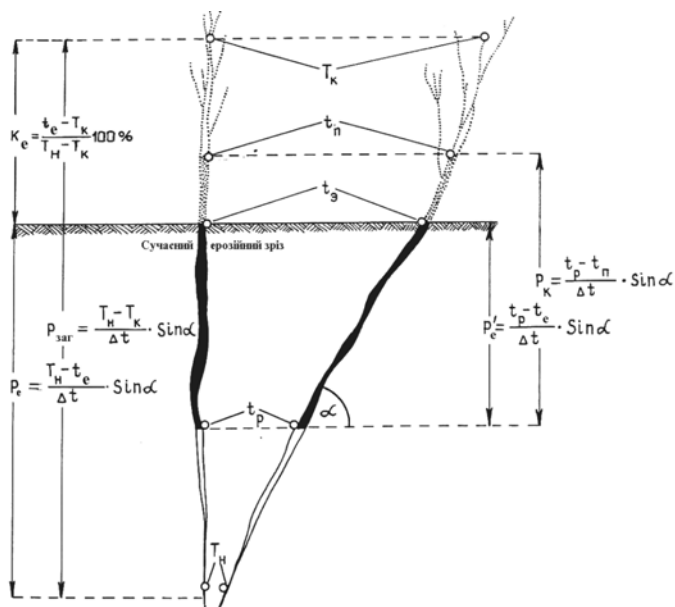


Рис. 1. Принципова схема оцінки вертикального розмаху і витриманості зруденіння з глибиною на підставі ТБГХ-параметрів (величина і тренди ΔT). Пояснення в тексті

З відповідною кореляцією дані цієї таблиці успішно використовують для якісної оцінки та кількісного прогнозування золотого зруденіння в різних золоторудних регіонах (Ляхов, Павлунь, Пізніур, Попівняк, 1995).

Більше того, аналіз фактологічних даних стосовно глибини поширення морфогенетичних типів і складу флюїдних включень молібден-вольфрамових і золоторудних родовищ і екстраполяція стану складних $\text{NaCl-H}_2\text{O-CO}_2$ -систем (Такеноучі, Кенноун, 1968; Малінін, 1979) на природні процеси (Попівняк, 2002; Ляхов, 1989; Павлунь, Пізніур, 1985; Ляхов, Павлунь, 1995) засвідчив, що ранні постмагматичні $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-NaCl}$ -дистиляти перебувають у гомогенному стані нетривалий час, розділяючись шляхом гетерогенізації на фази $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ і $\text{H}_2\text{O-NaCl}$. Перша, менш щільна і більш рухома та стійка в порівняно низькотемпературній області, просторово і, частково, в часі випереджує другу, просувається далеко догори від флюїдогенерувального джерела і формує золоте зруденіння верхньої зони рудно-магматичної колонії. Друга, щільніша і менше здатна до міграції фаза $\text{H}_2\text{O-NaCl}$, стійка при високих температурі й тиску, виявляє свою рудотворну роль на глибині. В цьому, зокрема, відображений тісний геолого-геохімічний зв'язок рідкісно-металевого і золотого зруденіння, адже практично на усіх золоторудних родовищах середньо- і великоглибинних формацій розвинуто раннє високотемпературне рідкіснометалево зруденіння, яке сформоване із $\text{H}_2\text{O-NaCl}$ концентрованих флюїдів і займає центральну, найродованішу зону відцентрової мінералого-геохімічної зональності (Сергіївське родовище, Україна). Звідси припустимим є твердження, що золоторудні прояви, сформовані

з флюїдів складу $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$, з глибиною можуть бути змінені рідкіснометалевим зруденінням, зобов'язаним своїм походженням діяльності розчинів $\text{H}_2\text{O-NaCl}$.

Таблиця 5

Термобарогеохімічні ознаки розвитку золотого зруденіння різноглибинних формацій

Порівнювані показники		Формації		
		Малосульфідні великих глибин (понад 3–6 км)	Помірно-сульфідні середніх глибин (1,5–2,0 км)	Слабкосульфідні малих глибин (до 1,2–1,5 км)
Сприятливі ознаки	Поширення мінеральних агрегатів із сингенетичними включеннями флюїдів продуктивних стадій	Трифазові водно-вуглекислотні включення з суттєвими варіаціями наповнення в межах їхніх родин	Трифазові вуглекислотно-водні, іноді двофазові нестійкого наповнення	Двофазові включення слабкоконцентрованих водних флюїдів із невеликою кількістю розчинених газів; характерна зміна наповнення в межах конкретних родин і на межі мінеральних зон
	Об'єм газової фази в сингенетичних включеннях при 20–25°C, %	Близько 18–22 %, у ділянках закипання розчинів – 18–93 %		15–22%, у ділянках закипання розчинів – 15–95 %
	Наявність і об'єм фази рідкого CO_2 у сингенетичних включеннях при 20–25°C, %	Дуже характерна, місцями виявляється в разі неглибокого охолодження препаратів; об'єм вакуолі від 11 до 100 %		Не виявляється навіть у разі охолодження препаратів
	Наявність у сингенетичних включеннях легкорозчинних твердих фаз (мінералів-“в'язнів”)	Трапляється зрідка		Не трапляється
	Типи гомогенізації сингенетичних включень у мінералах	У рідку фазу або при тій же температурі – у рідку й газову фази; у ділянці верхньої температурної межі характерна суттєва дисперсія вимірювань		Характерна гомогенізація у рідку фазу при однаковій температурі
	Відносна кількість включень у мінеральних агрегатах (декрептоактивність в інтервалі 100–0,0°C)	Різко підвищена порівняно з незолотоносними ділянками (декрептоактивність становить 100n–1000n імпульсів замість рядових 10n)		Порівняно невисока
	Середнє значення температурного градієнта по вертикалі, 0°C на 100 м	8–10 30–35	12–16 35–40	25–30 50–70
Несприятливі ознаки	Поширення мінеральних агрегатів із сингенетичними родинними включень таких типів	Газові та суттєво газові зі стійким наповненням або тільки газово-рідинні та багатофазові з об'ємом газової фази не менше 15–18 %		
	Термобарогеохімічні показники мінералоутворення	$T > 300$ і $< 190^\circ\text{C}$; $P > 100$ і < 50 МПа		$T > 300$ і $< 180^\circ\text{C}$; $P > 20$ МПа

У даному контексті очевидно, що рівні розвитку складних включень розчинів $\text{NaCl-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ відповідатимуть кореневим частинам рудномагматичних систем. А оскільки

еволюція флюїдів і спряжені процеси рудовідкладання відбуваються здебільшого в зонах рівнонапружених порід (Башкіров, 1970), що розташовані на певній віддалі від синрудної палеоповітряної (залежно від формаційного типу родовищ), лише пострудні епігенетичні тектонічні рухи і денудаційні процеси руйнують її цілісність і надають їй клавішно-блокової будови. Звідси й тісне генетичне та просторове сусідство рідкіснометалевого і золотого зруднення в локальному (Сергіївське) і регіональному (золото-молібденовий пояс Східного Забайкалля) – генетично споріднені рудні формації, (за Р. Константиновим, 1973) планах.

Певним свідченням обґрунтованості такої фізико-хімічної моделі подібних механізмів міграції, реакційної взаємодії та просторово-часової еволюції флюїдів, що супроводжують і забезпечують кристалізацію золотих руд, є фазометрична зональність рудного тіла (Павлунь, 2002) як матеріальне відображення просторової латеральної і вертикальної зміни складу та стану розчинів включень (рис. 2).

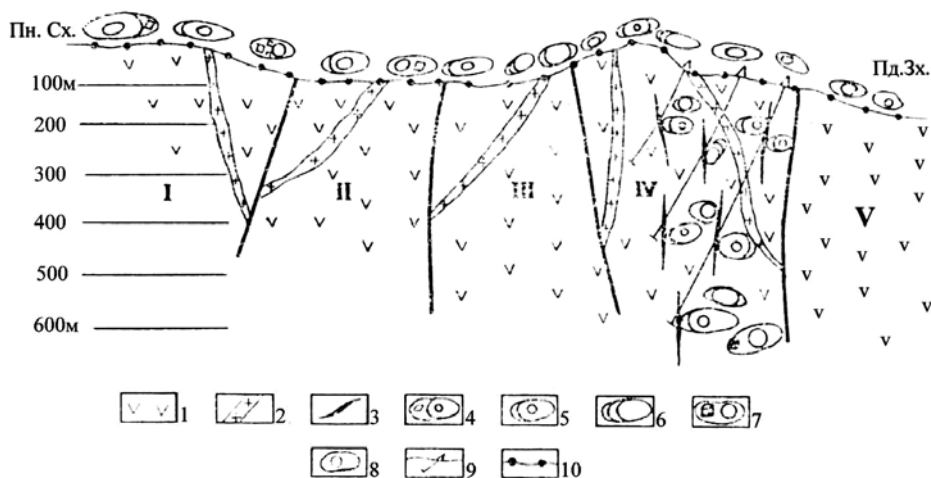


Рис. 2. Схематична фазометрична модель золоторудного поля:

I – андезит-дацити; *2* – дайки кварцових порфірів; *3* – золото-кварцові жили; *4* – складні вуглекислотно-водно-сольові включення; *5, 6* – включення рідкого та газоподібного CO_2 ; *7, 8* – газиво-рідинні багатофазові (водно-сольові з NaCl) і газиво-рідинні включення; *9* – розвідувальні свердловини; *10* – точки відбору проб; I-V – номери суміжних блоків

Фазово-візуальні дослідження включень у пробах, відібраних на поверхні структурно сполучених рудовмісних блоків і з керн розвідувальних свердловин, що розкрили в одному з блоків на різних гіпсометричних рівнях кварцовожильні золоторудні тіла, дали змогу на етапі розшуково-оцінних робіт синтезувати фазометричну модель. Ця генералізована модель водночас має важливе генетичне і практичне значення. Її аналіз засвідчує, що на поверхні ділянок із північного сходу на південний захід чітко простежується закономірна зміна фазового складу включень, яка полягає у зміні родин складних вуглекислотно-водно-сольових, водно-сольових і вуглекислотних включень блоку I родинами водно-сольових включень і включень рідкого CO_2 блоку II. На сучасній поверхні блоку III виявлено лише спільноти включень рідкого й газоподібного CO_2 та водних розчинів критичної густини, а в межах блоку IV – групи аналогічних включень, а також включення гомогенних водних розчинів. У блоці V поширені винятково включення водних розчинів. Зазначимо, що таку ж черговість зміни фазового складу включень, проте вже

у вертикальному розрізі (знизу догори) виявлено на найдетальніше вивченому блоці IV (див. рис. 2).

Навіть просте зіставлення виявлених закономірностей просторового поширення типів включень у блоках дає змогу ототожнювати поверхню блоку II з глибокими горизонтами блоку IV, а середні й частково верхні гіпсометричні рівні блоку IV – з поверхнею блоку III. Звідси випливає, що ступінь еродованості блоків закономірно зменшується в південно-західному напрямі: найбільш еродованим, й отже, найменш перспективним з глибиною є блок I, рівень глибинності якого у блоці IV ще не досягнутий свердловинами. Найбільші перспективи з глибиною і найменшу еродованість, очевидно, має блок V. Отже, дана фазометрична модель допомагає не тільки визначити характер і своєрідність розвитку процесів рудогенезу, а також попередньо оцінити ступінь ерозійного зрізу спряжених блоків, напрям і приблизну амплітуду (в цьому випадку до 500 м) епігенетичних переміщень блоків по розломах і перспективність глибоких горизонтів у кожному з них окремо (Павлунь, 2000).

У контексті обговорення цієї фазометричної моделі доцільно описати таку ж модель жильного тіла, для якого розроблено й описано схему палеотемпературної та агрегатно-щільнісної зональності. Між ними виявлено дуже тісну кореляцію.

Як засвідчили дослідження включень, фазометрична модель жильного тіла відображає закономірну картину просторового поширення типів включень, зумовлену головною особливостями геолого-структурних, здебільшого тріщинних, умов рудолокалізації. Її аналіз дає змогу виокремити дві стовпоподібні зони поширення гетерогенних вуглекислотно-водних розчинів, розділених “мішкоподібною” зоною поширення включень водних розчинів гомогенного захоплення.

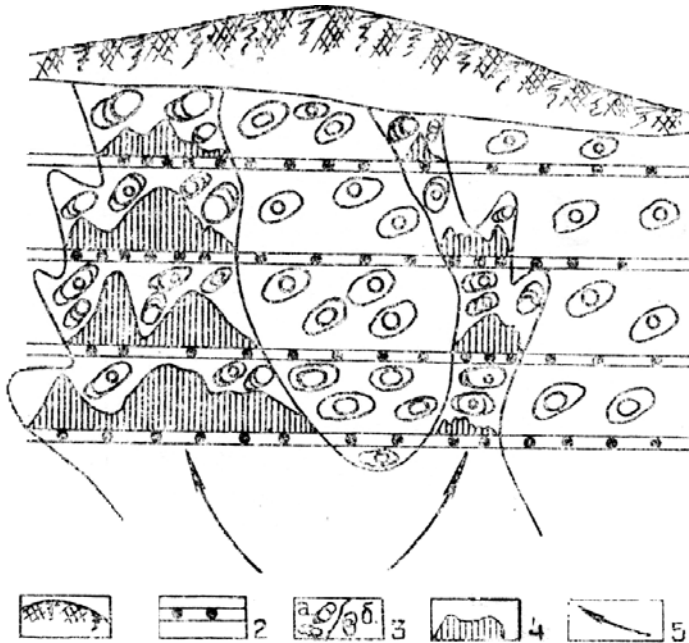


Рис. 3. Фазометрична модель кварцовожильного тіла одного із золоторудних родовищ: 1 – рівень ерозійного зрізу; 2 – штольні і точки відбору проб продуктивного кварцу; 3 – межі поширення гетерогенних вуглекислотно-водних (а) і гомогенних водних (б) включень; 4 – вміст золота в рудах, ум. од.; 5 – передбачувані напрями руху рудоносних розчинів

Зміна фазового складу та об'єму фаз у включеннях у межах виявлених зон найпомітніша по висхідній і полягає для промислово золотоносних зон у поступовій зміні знизу догори включень головно рідкого CO_2 включеннями порівняно низькогустинного газоподібного CO_2 і в повному їхньому переважанні на верхніх горизонтах рудного тіла. В цьому ж напрямі у включеннях збільшується об'єм рідкого водного розчину, і, навпаки, зменшується об'єм рідкого й газоподібного CO_2 . Співвідношення у цих включеннях об'єму фаз рідкого та газоподібного CO_2 і H_2O на різних горизонтах родовища дає змогу припустити, що з наближенням до поверхні зменшується густина CO_2 (тиск флюїдів) і збільшується інтенсивність їхньої гетерогенізації.

У незолотоносних ділянках на тлі сталого агрегатного складу і стану включень визначено такі зміни: знизу вверху збільшується ступінь наповнення включень рідким водним розчином (зменшується об'єм газового пухирця), що може свідчити про підвищення температури мінералоутворення з глибиною.

Головний практичний висновок, що випливає з аналізу розглянутої моделі, такий: фазовий склад включень можна використовувати для простежування шляхів міграції золотоносних розчинів і оконтурювання рудних стовпів, що очевидно із визначеного прямого кореляційного зв'язку між ступенем золотоносності та зонами поширення типоморфних включень гетерогенних вуглекислотно-водних розчинів (див. рис. 3).

Саме ця та деяка інша важлива інформація в сукупності з матеріалами ТБГХ площинного та стереокартування і аналізом градієнтів просторово-часових моделей рудогенезу слугує надійним підґрунтям для локального ТБГХ-прогнозування та оцінки зруденіння під час вирішення різноманітних завдань на різних етапах геологорозвідувальних і експлуатаційних робіт (Павлунь, 1995). Потрібно лише зазначити, що невідповідність детальності ТБГХ-досліджень флюїдних включень масштабів прогнозних і геологорозвідувальних робіт, як і їх відрив від причинно-пов'язаної геолого-структурної та мінералого-геохімічної інформації, може призвести до невиправданої трати сил, засобів і часу, різкого зниження ефективності й навіть дискредитації усього напрямку.

Висновки та перспективи подальшого дослідження. Стаття показує, що коректні термобарогеохімічні дослідження стадійності і термобаричного режиму формування родовищ, їхньої термобарогеохімічної зональності, трендів і градієнтності процесів рудогенезу, часу і місця поширення продуктивного зруденіння є надійним підґрунтям для обчислення вертикального розмаху і глибини поширення фізико-хімічних сприятливих зон для розвитку продуктивного зруденіння, її відповідно найбільш концентрованої частини, рівень ерозійного зрізу та інші параметри. Стаття не розглядає усі можливі варіанти прикладного застосування термобарогеохімії, але й цих досить загальних цілком достатньо щоб переконатися – прикладна термобарогеохімія розвивається і вдосконалюється.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Принципи термобарогеохімічного прогнозування, пошуків та оцінки золоторудних родовищ на території України / Лазько Є.М., Ляхов Ю.В., Павлунь М.М. та ін. *Вісн. Львів. ун-ту. Сер. геол.* 1992. Вип. 11. С. 25–40.
2. Термобарогеохімія в прикладній геології (пошуки, розвідка та експлуатація родовищ) / Лазько Є.М., Ляхов Ю.В., Павлунь М.М. та ін. *Мінерал. зб.* 1992. № 45, вип. 2. С. 15–21.
3. Кількісне термобарогеохімічне моделювання полів золотого зруденіння в практиці локального прогнозування / Ю. Ляхов, М. Павлунь, І. Попівняк, С. Ціхонь. *Мінерал. зб.* 2001. № 51, вип. 1. С. 22–34.
4. Павлунь М.М. Досвід крупномасштабного прогнозування грейзенового молібден-вольфрамового зруденіння в герцинідах Джунгаро-Балхашья (Центральний Казахстан). *Мінерал. зб.* 2002. № 51, вип. 2. С. 22–33.
5. М.М. Павлунь Термобарогеохімічні засади та прикладні можливості локального прогнозу, пошуків і оцінювання післямагматичного зруденіння *Мінерал. журнал* 2023, 45 (4), с. 66–83 <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.45.04.066>

REFERENCES

1. Lazko, Ye.M., Liakhov, Yu.V., Pavlun, M.M. та ін. (1992). Pryntsypy termobaroeokhimichnoho prohnozuvannya, poshukiv ta otsinky zolotorudnykh rodovyshch na terytorii Ukrainy *Visn. Lviv. un-tu. Ser. heol.* Vyp. 11. S. 25–40.
2. Lazko, Ye.M., Liakhov, Yu.V., Pavlun, M.M. та ін. (1992). Termobaroeokhimiia v prykladnii heolohii (poshuky, rozvidka ta ekspluatatsiia rodovyshch). *Mineral. zb.* № 45, vyp. 2. S. 15–21.
3. Liakhov, Yu. Pavlun, M., Popivniak, I., Tsikhon, S. (2001). Kilkisne termobaroeokhimichne modeliuvannya poliv zolotoho zrudennia v praktytsi lokalnoho prohnozuvannya. *Mineral. zb.* № 51, vyp. 1. S. 22–34.
4. Pavlun, M.M. (2002). Dosvid krupnomasshtabnoho prohnozuvannya hreizenovoho molibden-volframovoho zrudennia v hertsynidakh Dzhunharo-Balkhashshia (Tsentralnyi Kazakhstan). *Mineral. zb.* № 51, vyp. 2. S. 22–33.
5. Pavlun, M.M. (2023). Termobaroeokhimichni zasady ta prykladni mozhlyvosti lokalnoho prohnozu, poshukiv i otsiniuvannya pisliamahmatychnoho zrudennia. *Mineral zhurnal.* 45 (4), s. 66-83 <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.45.04.066>

SOME APPLIED ASPECTS OF THERMOBAROGEOCHEMISTRY OF MOLYBDENUM-TUNGSTEN AND GOLD ORE FORMATIONS**Mykola Pavlun**

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

The applied direction of thermobarogeochemistry is important for the implementation of various-scale predictive and metallogenic works and for solving various geological problems that require solutions at different stages of the geological exploration process.

The theoretical basis of thermobarogeochemical forecasting, prospecting and mineralization assessment is the stability of the regime of physicochemical conditions for the formation of productive mineral parageneses. They are formed in a rather narrow range of changes in the thermobarogeochemical characteristics of the ore-forming environment specific in chemical composition and aggregate-density state, which is manifested in the phase typomorphism of the corresponding families of fluid inclusions practically regardless of the geological conditions and metallogenic specialization of the ore regions. This circumstance testifies to the distinct convergence of physicochemical conditions and thermobarogeochemical indicators of the development of genetically related ore-forming processes of molybdenum-tungsten, gold-ore and other formations.

An equally important prerequisite for the implementation of the problems of applied thermobarogeochemistry is the variability of diagnostics and spatial extrapolation of gradients and trends of these parameters (thermobarogeochemical zonation) with the determination of the spatial position of zones that are physicochemically favorable for the development of molybdenum-tungsten, gold or other mineralization, as well as the upper and lower ore physicochemical levels of their wedging, taking into account the structural and facies conditions of ore localization.

Key words: applied thermobarogeochemistry, molybdenum-tungsten and gold ore formations, convergence of physicochemical conditions and thermobarogeochemical indicators, upper and lower ore levels of mineralization wedge-out.

Дата першого надходження статті до видання: 10.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026