

УДК 553.41.553.21/24

ТЕРМОБАРОГЕОХІМІЧНІ КРИТЕРІЇ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ОЦІНКИ РІЗНОГЛИБИННИХ ЗОЛОТОРУДНИХ ФОРМАЦІЙ

Ю. Ляхов, М. Павлунь

*Львівський національний університет імені Івана Франка
79005 м. Львів, вул. Грушевського, 4
E-mail: geomin@geof.franko.lviv.ua*

Розглянуто термобарогеохімічні критерії прогнозування та оцінки зрудення різноглибинних золоторудних формацій.

Ключові слова: термобарогеохімічні критерії, золоте зрудення, різноглибинні золоторудні формації

Проблема розробки та реалізації термобарогеохімічних (ТБГХ) критеріїв далеко не нова, проте все ще актуальна. Адже її вирішення здебільшого ґрунтувалося на матеріалах ТБГХ досліджень певних геолого-генетичних типів постмагматичного зрудення [1, 2, 4], тоді як узагальнення в цьому контексті на рівні формацій, у тім числі золоторудних, за невеликим винятком [3, 5–7], лише розпочинається.

Нижче розглянуто ТБГХ критерії первинних золоторудних формацій як основу оцінки і локального прогнозування різноглибинного зрудення.

Термобарогеохімічно-формаційні критерії ґрунтуються на генетичних особливостях первинних золоторудних формацій (див. таблицю) і представлені такими групами: флюїдно-компонентно-фазовими, які можна діагностувати та експресно застосовувати у польових умовах, оптимальнотемпературними, термоградієнтними, що виявляються під час ТБГХ-картування, та декрептометричними.

До **термобарогеохімічних критеріїв золото-срібного зрудення малоглибинної формації** треба зачислити такі.

Флюїдно-компонентно-фазові. Перспективними є зони поширення мінеральних агрегатів з газово-рідинними (наповнення 70–95 %) включеннями середньо-низькотемпературних (330–100°C) дегазованих власне водних розчинів низької концентрації (9–11 % екв.-NaCl). Поява в разі охолодження включень фази легкорозчинної солі або рідкого CO₂ свідчить про немалоглибинний тип зрудення і потребу зміни загальної концепції та критеріїв прогнозування. Як потенційні золоторудні стовпи привабливі зони мінералізації з ознаками інтенсивного кипіння розчинів унаслідок різкого зниження тиску: в мінералах поширені системи сингенетичних газово-рідинних (75–95 %) і рідинно-газових (5–25 %) включень, що гомогенізуються (відповідно, в рідку і газову фази) за однакової температури.

Оптимальнотемпературні. На тлі середньо-низькотемпературного діапазону вулканогенно-гідротермального рудоутворення найсприятливішим для формування сульфосольових золото-срібних парагенезисів є інтервал 250–200 (190)°C, який досить упевнено визначають під час вивчення як газово-рідинних, так і сингенетичних їм

рідинно-газових включень у кварці продуктивної стадії. Особливо перспективні зони збіжності ознак температурно-оптимального мінералоутворення та інтенсивного кипіння розчину.

Генетична характеристика первинних гідротермальних золоторудних формацій

| Генетичні класи, за В.І. Смирновим | Фізико-хімічний тип рудотворної системи, за даними термобарогеохімії | Золоторудні формації, за Н.В. Петровською | Геолого-мінеральні типи і субформації, за Н.В. Петровською |
|------------------------------------|--|--|---|
| Вулканогенно-гідротермальний | Власне гідротермальна докритична з інтенсивним кипінням (концентрація 1–11 мас. %), малобарна (20–1л МПа), в діапазоні 360–50°C слабостататована ($\Delta t = 25\text{--}30$ до 50° на 100 м) з міжстадійними інверсіями до 100–150°C і часовим вектором $\Delta T/\Delta P = 8\text{--}12^\circ\text{C}$ на 1 МПа | Малоглибинна (0,п до 1,2–1,5 км) золото-срібно-кварц-карбонатна “убогосульфідна” (0,5–1,5 %) | Au–Ag ₂ S (аргентитовий), Au–(Ag, Cu) ₃ Sb ₃ (полібазитовий), Au–Ag ₃ Sb ₃ (піраргіритовий з ZnS та PbS), Au–Ag–As–Sb (арсенопірит-прустит-піраргіритовий), As–Se (Te) (селенід-телуридний) |
| Плутоногенно-гідротермальний | Пневматолітово-гідротермальна вуглекислотно-водно-сольова (концентрація 9–11 до 45–60 мас. %) з періодами кипіння і дегазації, середньобарна (200–100 до 40–30 МПа), в діапазоні 450–50°C – помірно-термостатована ($\Delta t = 15\text{--}30^\circ\text{C}$ на 100 м) з міжстадійними інверсіями до 70–110°C і часовим вектором $\Delta T/\Delta P = 2,0\text{--}2,8^\circ\text{C}$ на 1 МПа | Середньоглибинна (1,5–3,5 км) золото-сульфідно-кварцова помірно-сульфідна (до 10–20 %) | Au–FeS ₂ (FeS)–Q, Au–FeS ₂ –FeAsS–Q, Au–FeAsS–Q, Au–Fe ₃ O ₄ –Q (карійський), Au–B ₂ S ₃ –Q (дельмачівський), Au–PbS–ZnS–Q (ірокіндінський), Au–CuFeS ₂ –PbS(ZnS)–Q (дарасунський) |
| Метаморфогенно-гідротермальний | Надкритично-гідротермальна водно-вуглекислотно з концентрацією солей до 70 мас. %, високо-, іноді гіпербарна (до 250–300 МПа), в діапазоні 450–50°C – відносно термостатована ($\Delta t = 5\text{--}6$ до 10°C на 100 м) з міжстадійними інверсіями до 5–20°C і часовим вектором $\Delta T/\Delta P = 2,5\text{--}1,0^\circ\text{C}$ на 1 МПа | Порівняно глибинна (3,5–5,0 км) золото-кварцова малосульфідна (1–5 %) | Au–FeS ₂ (FeS)–Q у зеленокам'яних структурах докембрійських щитів (тип Порк'юпайн–Калгурлі), Au–FeAs(FeAsS)–Q у кристалічних сланцях протерозойського облямування докембрійських щитів (тип Колар–Джіант), Au–FeAsS(FeS) “чорносланцева” субформація, пов'язана з графітизованими філітами протерозою (тип Ашанті–Хоумстейк) |

Термобароградієнтні. Критерії цієї групи спрямовані на передбачення:

загальної глибини поширення (розмаху) зруденіння в різноеродованих структурних блоках – $P_{\text{заг}} = (T_{\text{п}} - T_{\text{к}}) : \Delta t$;

коефіцієнта ерозії рудовмісних блоків – $K_e = (T_e - T_k) : (T_{\text{п}} - T_{\text{к}}) \times 100 \%$;

вертикального розмаху продуктивного зруденіння нижче сучасного рівня ерозійного зрізу – $P_e = (T_{\text{п}} - T_e) : \Delta t$.

Вихідні параметри визначають шляхом гомогенізації флюїдних включень у прозорих мінералах певної, ліпше продуктивної стадії, а саме: температура початку ($T_{\text{п}}$) та кінця ($T_{\text{к}}$) розвитку власне золото-срібної стадії; вертикальний температурний градієнт ($\Delta t = \text{C}^\circ/100 \text{ м}$) за включеннями тієї ж самої генерації включень у мінералах ранніх ($T_{\text{п}}$) та пізніх ($T_{\text{к}}$) металоносних парагенезисів на рівні сучасного ерозійного зрізу (T_e).

Декрептометричні. Критерії цієї групи доцільно враховувати паралельно з аналізом матеріалів розшукової геохімії: вони полягають у визначенні місця поширення, розмірів і морфоструктурних особливостей так званих зон (ореолів) пропарювання, що супроводжують рудні тіла гідротермального походження, інколи далеко за межами первинних ореолів розсіяння хімічних елементів. Позитивними є декрептоаномалії в $n100$ – $n1000$ акусто-імпульсів (термоакустичні), або $n10 \times 10$ МПа (термовакuumні) з потужністю до 100–150 м.

Серед **термобарогеохімічних критеріїв золотого зруденіння середньоглибинної формації** вирізняють такі.

Флюїдно-компонентно-фазові. Перспективними є зони поширення мінеральних агрегатів з газово-рідинними і рідинно-газовими включеннями (наповнення від 0–10 до 75–80 %) високо-середньотемпературних (450–180°C) водно-сольових та вуглекислотно-водних надкритично-газових та рідинних розчинів з підвищеною концентрацією CO_2 (об'ємний вміст газової суміші до 50–80 % та легкорозчинних солей – 9–11 до 45–60 мас. %-екв. NaCl); для мінералів у ранніх генераціях характерні включення “сухих” газів, суттєво газові та багатофазові з кристалами-в'язнями, а для мінералів золотоносних асоціацій – трифазові з рідким CO_2 , іноді винятково вуглекислотні.

Як потенційні золоторудні “стовпи” привабливі зони мінералізації з ознаками інтенсивної і тривалої гетерогенізації (ретроградне кипіння) водно-кислотних розчинів з відокремленням CO_2 в процесі тріщиноутворення; у мінералах поширені системи сингенетичних газово-рідинних і рідинно-газових включень (з фазою рідкого CO_2), що одночасно гомогенізуються за однакової температури, відповідно, в рідку та газову фази.

Надійною ознакою вірогідного поширення та поведінки на глибину золоторудних “стовпів” є дані про підвищену концентрацію (до 20–25 екв. %) іонів фтору та натрію в складі водного екстракту (витяжки) з рідинно-газових включень у кварці продуктивних на золото стадій. Майже прямий зв'язок цього показника зі вмістом, а інколи й пробністю золота є наслідком процесів масового руйнування здебільшого хлор-ауратних металоносних комплексів, для яких інтервал 250–200°C є температурною межею їхньої стійкості [3].

Оптимальнотемпературні критерії відображають процеси концентрації золота в результаті його, по-перше, співкристалізації з сингенетичними мінералами головних золотоносних парагенезисів і, по-друге, вибіркового електрохімічного осадження на сульфідах (пірит, піротин, арсенопірит) попередніх (ранніх) парагенезисів.

сів. Отже, на тлі загалом високо-середньотемпературного діапазону пневматолітово-гідротермального рудоутворення:

а) оптимальним для формування головних золотоносних парагенезисів є інтервал від 280–275 до 210–200°C, який досить упевнено визначають під час вивчення вуглекисотно-водних розчинів продуктивної стадії;

б) для вибіркового осадження золота внаслідок електрохімічної взаємодії з сульфідами попередніх генерацій найсприятливіші переважно подрібнені агрегати піриту (піротину) з проміжним, так званим *p-n*-провідниковим (за даними термоЕРС), типом структури, що кристалізуються переважно в інтервалі від 420–400 до 360–335°C; для ділянок з поширенням більш високотемпературних (понад 420°C) зародків, зазвичай, *n*-піриту, або низькотемпературних (до 335°C) – *p-n*-піриту промислові концентрації електрохімічно сепарованого золота не характерні.

Термобарогradientні критерії загалом відповідають сформульованим для малоглибинних формацій. Вони полягають у можливості передбачення, передусім, такого: загальної глибини розмаху зруденіння, коефіцієнта ерозії рудовмісних блоків і вертикального інтервалу поширення промислового зруденіння нижче від сучасного рівня ерозії за допомогою співвідношень, запропонованих вище, та з урахуванням помірно глибинної специфіки вертикального температурного градієнта (в середньому +16°C на 100 м).

Декрептометричні критерії особливо ефективні в комбінації з аналізом даних розшукової геохімії і газометричного (кернового або штуфного) картування рудоперспективних ділянок першого рангу. Вже зазначено, що вони спрямовані на визначення не тільки місцеположення, а й масштабів ореолів навколорудного пропарювання порід за допомогою картувальних або профілювальних методів термоакустичної чи термовакuumної декрептометрії. Дуже привабливими є лінійні декрептоаномалії потужністю від 1n до 100n з показниками, які у 2–3 рази перевищують фонову декрептоактивність, а в максимумі, тобто безпосередньо біля рудного тіла, мають підзону різкого зниження декрептоактивності, навіть нижче від фонові (це пов'язано з процесами синрудного вилуговування і руйнування мінералів бічних порід, у тому числі носіїв ТБГХ-інформації – включень).

Газометричні критерії, як і декрептометричні, привабливі можливістю експресного застосування в польових умовах. Увагу привертають лінійні або близькоізометричні рудоносні ділянки (зони), що разом з іншими позитивними критеріями мають аномально високий відносний об'єм CO₂ (інколи до 70–80 %) у складі газової фази флюїдних включень декрептоактивної зони пропарювання порід. Вагомість цього критерію зростає з переходом від малоглибинних, значно дегазованих рудогенерувальних гідросистем до середньоглибинних і, особливо, найглибших. Потрібно обов'язково пам'ятати про комплексний підхід до врахування цього критерію, оскільки він є дієвим щодо інших типів ендегенного рудоутворення, правда, уже в іншому контексті критеріїв.

Термобарогеохімічні критерії зруденіння золото-кварцової формації порівняно великих глибин. Серед них розглядаємо такі.

Флюїдно-компонентно-фазові. Перспективними є зони прожилково-вкрапленої або жильної мінералізації з поширенням дво- і трифазових газово-рідинних (наповнення 50–80 %) включень водно-вуглекислотних, інколи водно-сольових гідротерм – гомогенних у надкритичному високотемпературному діапазоні (500–330°C) включень і сповільнено дегазувальних гетерогенних – у середньотемпературному

діапазоні (320–180°C), що відповідає продуктивному рудоутворенню. Рідинно-газові та власне газові включення як релікти пневматолітової системи дуже рідкісні, а надмірне поширення їх у мінералах ранніх генерацій може свідчити про інший рудноформаційний тип зруденіння – швидше про золото-сульфідно-кварцовий середньоглибинний з плутоно-магматичними зв'язками.

Оптимально-температурні критерії ґрунтуються на даних про конвергентність теплових умов формування головних золотоносних парагенезисів у середньотемпературному діапазоні (280–200°C). Передбачення можливого положення золоторудних стовпів є більш вірогідним, коли відповідний температурний інтервал визначено за допомогою включень гетерогенно-нерівноважної системи (рідина–газ), що гомогенізуються одночасно, але в різні фази (кипіння).

Термобароградієнтні критерії мають суттєве значення у вирішенні тих же прогностичних завдань, що вже висвітлені стосовно магматогенних золоторудних формацій. Специфічним є лише діапазон можливої зміни вертикального термоградієнта Δt в умовах порівняно більшого термостатування метаморфогенно-гідротермальних систем, а саме: від 6 до 10°C на 100 м. Тому навіть незначна неточність у вихідних розрахункових даних може призвести в цьому випадку до досить суттєвої похибки в оцінці вірогідного розмаху зруденіння (інколи на 100л м), що неприпустимо.

1. *Лазько Е.М., Ляхов Ю.В.* Методические указания по анализу включений минералообразующих растворов и их применению для прогнозной оценки рудоносных площадей и в процессе поисково-разведочных и эксплуатационных работ. Львов, 1972.
2. *Лазько Е.М., Ляхов Ю.В., Пизнюр А.В.* Физико-химические основы прогнозирования постмагматического оруденения. М., 1981.
3. *Лазько Е.М., Ляхов Ю.В., Пизнюр А.В.* Термобарогеохимическое моделирование рудных формаций и практика прогнозно-оценочных работ // Сов. геология. 1990. № 6. С. 75–84.
4. *Лазько Е.М., Ляхов Ю.В., Пизнюр А.В., Попивняк И.В.* Термобарогеохимия золота. Львов, 1995.
5. *Ляхов Ю.В., Павлунь М.М.* Термобарогеохімічне обґрунтування рудно-формаційної приналежності ендегенних золоторудних родовищ України: теоретичні та методологічні аспекти // Мінерал. зб. 2002. № 52. Вип. 1. С. 68–73.
6. *Павлунь М.М.* Термобарогеохімічні аспекти геолого-генетичної і рудно-формаційної типізації золотого зруденіння Бельтау-Курамінського вулканоплутонічного поясу у Східному Узбекистані // Мінерал. зб. 2002. № 52. Вип. 2. С. 78–86.
7. *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.

**THERMOBAROGEOCHEMICAL CRITERIA OF HETEROGYPOGENE
AURIFEROUS FORMATIONS FORECASTING AND VALUATION**

Yu. Lyakhov, M. Pavlun'

*Ivan Franko National University of Lviv
Hrushevskogo St. 4, UA – 79005 Lviv, Ukraine
E-mail: geomin@geof.franko.lviv.ua*

Thermobarogeochemical criteria of forecasting and valuation of heterogypogene auriferous formations mineralization have been studied.

Key words: thermobarogeochemical criteria, gold mineralization, heterogypogene formations.

Стаття надійшла до редколегії 03.09.2003
Прийнята до друку 24.10.2003