

УДК 553.21/.24:549.41

**ТЕОРЕТИЧНЕ ТА ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ  
ФАЗО- І ГАЗОМЕТРИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЗОЛОТОРУДНИХ РОДОВИЩ  
(ЗА ФЛЮЇДНИМИ ВКЛЮЧЕННЯМИ У МІНЕРАЛАХ)**

**М. Павлунь**

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

У статті розглянуто зміст і структуру фазо- і газометричних моделей, особливості їхньої геологічної та генетичної інтерпретації, теоретичне і прикладне значення.

*Ключові слова:* фазо-газометрична модель, золотоносна ділянка, включення CO<sub>2</sub>, фазометрична зональність

**Фазометричні моделі** (за візуальними даними) є складовою частиною групи агрегатно-щільнісних моделей і, на відміну від гомогенізаційних (за інструментальними даними), у науковій літературі практично не розглянуті, хоча не менш важливі. Ці моделі – результат синтезу даних фазометричного вивчення флюїдних включень в окремих точках спостереження, поздовжнього чи поперечного розрізу рудного тіла, гіпсометричного горизонту (площі); інтегрально вони можуть бути зображені у вигляді блок-діаграм.

Такі моделі здебільшого будують на ранніх стадіях вивчення включень мінералотворного процесу, що передують вивченню інструментальному (динамофазометричному), з метою виявлення характеру просторово-часового розподілу і співвідношень різних морфогенетичних типів включень.

На підставі наявності та співвідношень кількості й об'єму різноманітних фаз (газів, водних і вуглекислотних розчинів, NaCl, KCl тощо) у включеннях різновікових генерацій за їхньою формою та розмірами можна зробити попередній висновок про відносну температуру і тиск у системах рудоутворення, наблизитися до визначення й розмежування областей прояву пневматолізу та гідротермальної діяльності мінералотворного середовища, простежити зони ретроградного кипіння, розущільнення й дегазації розчинів різного складу, густини (агрегатного стану) і концентрації, а також з'ясувати ймовірні напрями міграції флюїдів, окреслити розташування рудних стовпів (бонанців) тощо.

Отже, аналіз отриманих результатів у вигляді фазометричних моделей дає змогу хоч і попередньо, проте досить обґрунтовано якісно оцінити досліджувані об'єкти. Визначені й описані такими моделями закономірності й тенденції зміни фазового складу включень та агрегатного стану законсервованої в них речовини є матеріальним відображенням своєрідності та просторово-часової спрямованості фізико-

хімічних процесів рудогенезу, в тім числі таких, які забезпечували міграцію і концентрацію золота в рудних тілах.

Розглянемо деякі конкретні приклади фазометричних моделей, побудованих для золоторудних родовищ Бельтау-Курамінського вулканоплутонічного поясу (Східний Узбекистан) на етапі їхньої розшукової оцінки та експлуатаційної розвідки.

Як засвідчили дослідження включень, фазометрична модель жильного тіла відображає закономірну картину просторового поширення типів включень, зумовлену головно 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. 1).

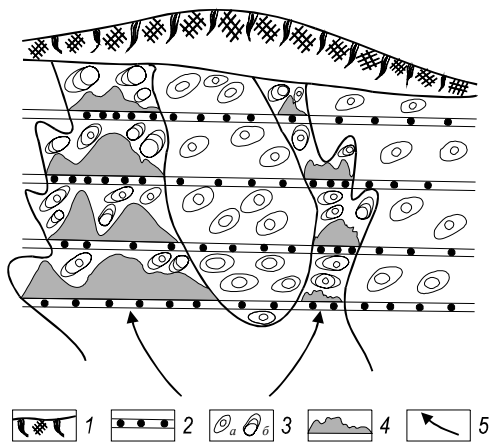


Рис. 1. Фазометрична модель кварцово-жильного тіла золоторудного родовища:

1 – рівень ерозійного зрізу; 2 – штольні та місця відбору проб продуктивного кварцу; 3 – межі поширення гетерогенних вуглекислотно-водних (а) і гомогенних водних (б) включень; 4 – вміст золота в рудах, умовн. од.; 5 – вірогідний напрям руху рудоносних розчинів.

Зміна фазового складу та об'єму фаз у включеннях в межах виявлених зон найпомітніша по висхідній і полягає для промислово золотоносних зон у поступовій заміні знизу доверху включень переважно рідкої  $\text{CO}_2$  включеннями порівняно низькогустинної газоподібної  $\text{CO}_2$  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 рідкої і газоподібної  $\text{CO}_2$ . Співвідношення у цих включеннях об'єму фаз рідкої та газоподібної  $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2\text{O}$  на різних горизонтах родовища дає змогу припустити, що з наближенням до поверхні зменшується густина  $\text{CO}_2$  (тиск флюїдів) і збільшується інтенсивність їхньої гетерогенізації.

У незолотоносних ділянках на тлі сталого газового складу і стану включень визначено такі зміни: знизу вверх 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 за допомогою “методу діагностики продуктивних стадій” [1], що очевидно із визначеного прямого кореляційного зв'язку між ступенем золотоносності та зонами поширення типоморфних включень гетерогенних вуглекислотно-водних розчинів (див. рис. 1).

Фазово-візуальні дослідження включень у пробах, відібраних на поверхні структурно спряжених рудовмісних блоків і з керна розвідувальних свердловин, що розкрили в одному з блоків на різних гіпсометричних рівнях кварцово-жилінні золотоносні тіла, дали змогу на етапі розшуково-оцінних робіт синтезувати фазометричну модель, зображену на рис. 2.

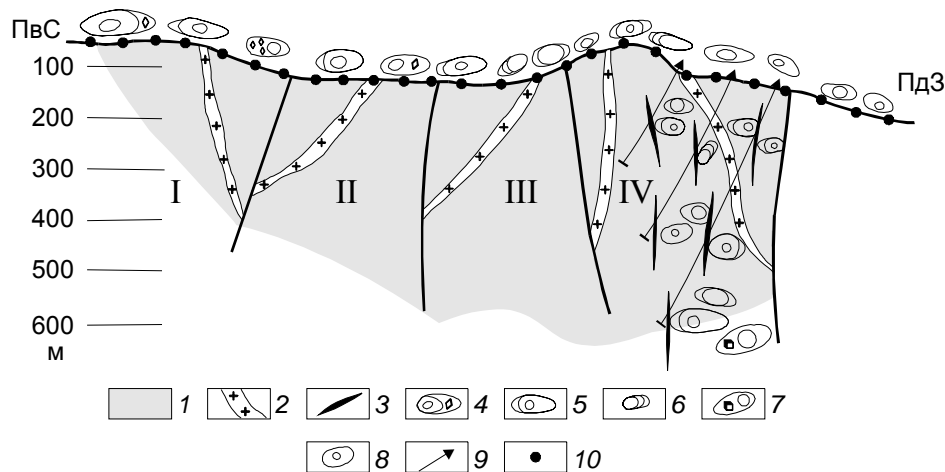


Рис. 2. Схематична фазометрична модель золоторудного поля:

1 – андезит-дацити; 2 – дайки кварцових порфірів; 3 – золото-кварцові жили; 4 – складні вуглекислотно-водно-сольові включення; 5 – включення рідкої  $\text{CO}_2$ ; 6 – включення газоподібної  $\text{CO}_2$ ; 7 – газиво-рідинні багатофазові (водно-сольові з  $\text{NaCl}$ ) включення; 8 – газиво-рідинні включення; 9 – розвідувальні свердловини; 10 – місця відбору проб; I–IV – номери спряжених блоків.

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 блока I родинами водно-сольових включень і включень рідкої  $\text{CO}_2$  блока II. На сучасній поверхні блока III виявлені лише спільноти включень рідкої і газоподібної  $\text{CO}_2$  та водних розчинів критичної густини, а в межах блока IV – групи аналогічних включень, а також включення гомогенних водних розчинів. У блоці V поширені винятково включення водних розчинів. У цьому разі 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 блока II з глибокими горизонтами блока IV, середні й частково верхні гіпсометричні рівні блока IV – з поверхнею блока III. З цього зіставлення випливає, що ступінь еродованості блоків закономірно зменшується в південно-західному напрямі: найбільше еродованим і, отже, найменше перспективним з глибиною є блок I, рівень глибинності якого у

блоці IV ще не досягнутий свердловинами. Найбільші перспективи з глибиною і відтак найменшу еродованість має, очевидно, блок V.

Обґрунтованість такого важливого висновку, зробленого лише на підставі аналізу поширення типів включень, різко зростає, якщо звернутися до фізико-хімічної моделі еволюції рудотворних розчинів, матеріальним відображенням яких є описана просторова латеральна й вертикальна зміна складу та стану включень мінералотворного середовища (фазометрична зональність).

Дослідження складних систем  $\text{NaCl}-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$  засвідчили, що ступінь висолювання таких розчинів збільшується з підвищенням температури [2, 3], при високих температурі й тиску виявлено дуже обмежену розчинність  $\text{NaCl}$  у  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ -розчинах [4].

Аналіз фактичних даних про морфогенетичні типи і склад включень золоторудних родовищ та екстраполяція описаних вище закономірностей стану  $\text{NaCl}-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ -систем на природні геохімічні процеси [5, 6] свідчить, що ранні постмагматичні вуглекислотно-водно-сольові дистилати перебувають у гомогенному стані нетривалий час, здебільшого гетерогенізуються з розділенням на дві незмішувані фази: вуглекислотно-водну і водно-сольову. Перша, значно рухоміша завдяки порівняно низькій щільності  $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ -флюїду, а також стійкіша в умовах порівняно низьких температур, просторово і частково в часі випереджає другу. Просуваючись від флюїдогенерувального джерела вгору на суттєві відстані, вона бере участь у формуванні золото-кварцових жил верхньої частини зруденілої зони. Друга, щільніша і менше здатна до міграції  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ -фаза, стійка при порівняно високих температурах і тисках, відіграє свою мінералотворну роль на глибині. Отже, в разі виходу на денну поверхню золоторудні прояви, сформовані із флюїдів  $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ -складу, свідчать про їхній неглибокий ерозійний зріз, тоді як прояви, зобов'язані своїм походженням діяльності хлоридно-натрових водних розчинів, відповідають значно глибшому зрізові. В цьому контексті очевидно, що рівні розвитку складних включень  $\text{NaCl}-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$  відповідають кореневим частинам рудномагматичних золоторудних систем.

Оскільки всі ці механізми міграції, реакційної взаємодії флюїдів та їхньої еволюції, що супроводжують і забезпечують кристалізацію золотих руд, реалізуються в так званій зоні рівнонапружених порід [7], розташованій на певній (з глибиною) відстані від синрудної палеоповерхні залежно від рудноформаційного типу родовищ золота, то лише пострудні епігенетичні тектонічні порушення руйнують її цілісність і надають їй блокового характеру, що ми й спостерігаємо в цьому випадку. А відповідні типи включень, законсервовані під час рудогенезу в нижній, середній чи верхній частині зони, відображаючи просторову спрямованість еволюції рудного процесу, дають змогу ідентифікувати рівні відповідного ерозійного зрізу того чи іншого блока внаслідок пострудних блокових переміщень.

Отже, побудована фазометрична модель (див. рис. 2) допомагає не тільки визначати характер і своєрідність розвитку процесів рудогенезу, а також попередньо оцінювати 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.

Наведені вище приклади, мабуть, не вичерпують усього багатоманіття форми і змісту фазометричних моделей золоторудних об'єктів різної ієрархії та можливостей їхнього прикладного застосування. Водночас вони мають, безумовно, і загальне значення, спонукаючи до синтезу фазометричних моделей різного ступеня деталь-

ності для інших рудноформаційних типів родовищ і використання під час термобарогеохімічного картування, прогнозування й оцінки рудних об'єктів.

**Газометричні моделі** синтезують опісля достатньо глибокого й різнобічного вивчення флюїдних включень, коли вже накопичений ґрунтовний генетичний матеріал і проведено комплексне термобарогеохімічне, відтак хроматографічне (мас-спектрометричне) вивчення включень [8].

Гідротермальні розчини, що формували рудоносну й безрудну частини рудних тіл, як звичайно, чітко розрізняють за кількісним співвідношенням газових (летких) компонентів, що виявляється в наявності своєрідної і часто-густо досить контрастної газогеохімічної зональності, передовсім, у вертикальному розрізі рудних тіл. На графіках і діаграмах, що зображають конфігурацію зонального розподілу газів або ж їхніх співвідношень, ці особливості просторової поведінки летких компонентів позначають різними ізолініями. Залежно від тенденцій кількісної їх зміни в зоні інверсій, тобто переважно в ділянках накопичення руд або ж на нижньо- чи верхньорудному виклинюванні тіл, ці криві здебільшого мають випуклу чи увігнуту форму. Отже, характер зрізу певної частини цих кривих може свідчити про рівень відносної еродованості зруденіння, а також дає змогу визначати його вертикальний розмах і ймовірну протяжність на глибину.

Окрім цього, на підставі узагальнення результатів досліджень просторового розподілу газової складової включень у вигляді газометричних моделей можна реставрувати флюїдний режим формування конкретних рудотворних гідротермальних систем, виявити форму білярудних газових ореолів, своєрідність окисно-відновних бар'єрів кристалізації руд золота і розрахувати їхні градієнтні характеристики.

Прикладом таких побудов може слугувати модель просторового розподілу летких компонентів, яка, на наш погляд, доволі повно розкриває деякі закономірності процесу рудоутворення на одному з родовищ золота у Східному Узбекистані і дає змогу його оцінити. Ця модель відповідає інтенсивно сульфідизованим трубоподібним тілам типу рудно-експлозивних брекчій, локалізованим у товщі андезито-дацитів і туфів стратовулкана. За її допомогою обчислені [9] коефіцієнти співвідношень  $\text{CO}_2\text{-CH}_4$ , що суттєво відрізняються для різних гіпсометричних рівнів родовища. Особливо чітко простежується тенденція значного їх зменшення з глибиною (рис. 3): на верхніх частинах тіл вони становлять 25–30, у середній частині 10–5, а на нижніх горизонтах – 2–3. Таку близькопараболічну тенденцію зміни цих коефіцієнтів порушують кілька екстремумів різко підвищеного вмісту метану, що збігаються з ділянками перерізу раних положистих окварцьованих зон міжформаційних зривів трубоподібними тілами.

За допомогою ізотопного аналізу капсульованого у включеннях вуглецю з'ясовано, що  $\delta\text{C}^{13}$  в межах трубоподібних тіл досягає 8–3, тоді як поза ними цей показник суттєво зростає. Порівняно низьке значення  $\delta\text{C}^{13}$  в трубоподібних тілах пояснюють ефектом змішування рудотворних розчинів у разі неодноразового надходження  $\text{CH}_4$  в рудопідвідні й рудолокалізаційні структури. У цьому разі в межах пологих структур вуглець метану, відновлюючи сульфатну сірку, частково окиснюється до  $\text{CO}_2$ . Аномально ж високий його вміст у включеннях мінералів кварц-сульфідно-сульфосольових парагенезисів, розвинутих власне на перерізі трубоподібних і пологих структур, корелює з підвищеною концентрацією сірководню, який сповільнював (затримував) окиснення  $\text{CH}_4$  під час їхнього утворення. Поведінка

азоту, вміст якого стійко збільшується з наближенням до поверхні рудних тіл (див. рис. 3), вірогідно, свідчить про участь у мінералоутворенні вадозних вод глибинної циркуляції.

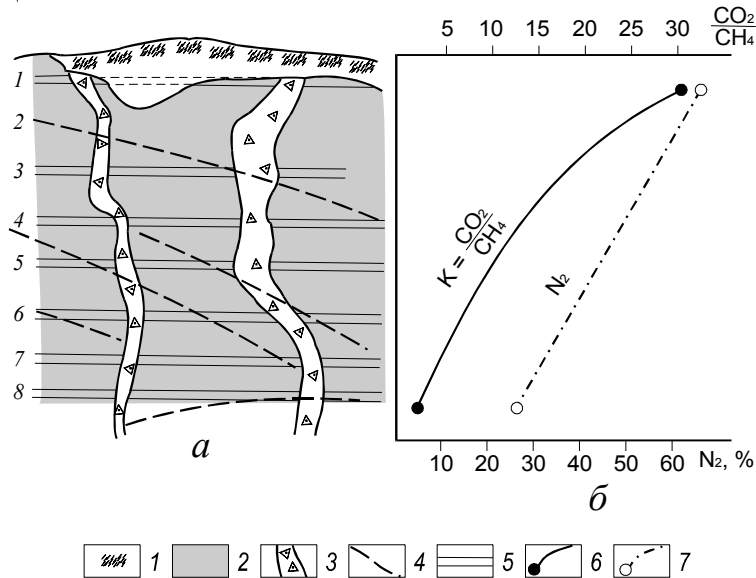


Рис. 3. Модель розподілу легких компонентів у вертикальному розрізі золотонесних тіл:

1 – пухкі відклади; 2 – андезито-дацити і туфи; 3 – трубоподібні рудно-експлозивні тіла; 4 – прожилково-метасоматичні зони міжформаційних зривів; 5 – гірничі виробки; 6 – крива зміни коефіцієнта співвідношень вмісту  $CO_2/CH_4$ ; 7 – зміна вмісту  $N_2$  з глибиною.

Отже, моделювання зонального розподілу  $CO_2$  і  $CH_4$  у поєднанні з даними ізотопії вуглецю можна використати для виявлення золотоконцентрувальних структур типу рудно-експлозивних брекчій. Брекчії в цьому випадку забезпечували неодноразове надходження вуглеводнів у рудолокалізаційні структури і сприяли виникненню зон окисно-відновних бар'єрів, що дає змогу прогнозувати нижню фізико-хімічну межу виклинювання зруденіння, яка, вірогідно, повинна відповідати гіпсометричному рівню співвідношень у розчинах  $CO_2:CH_4 = 1$  і менше. Зазначимо також, що аналогічні підходи застосовували щодо інших рудно-формаційних типів родовищ: там увагу звертали на коефіцієнт відновленості флюїду, який визначали як співвідношення суми відновлених газів до суми окиснених [10]:  $K_v = (CO + CH_4 + H_2)/CO_2$ . Варіації цього коефіцієнта досить адекватно характеризують процес рудоутворення і теж дають змогу передбачати ймовірну глибину залягання рудної зони, яка збільшується з його зменшенням.

2. *Малини С. Д.* Вопросы термодинамики системы  $H_2O-CO_2$  // Геохимия. 1974. № 10. С. 1523–1550.
3. *Малини С. Д.* Физическая химия гидротермальных систем с углекислотой. М., 1979.
4. *Такеноучи С., Кеннеди Дж. К.* Система  $H_2O-C_2O$  при высоких температурах и давлениях // Термодинамика постмагматических растворов: Сб. науч. ст. М., 1968. С. 137–149.
5. *Ляхов Ю. В.* Флюидный режим рудообразующих процессов и факторы концентрации золота в разнотермальных условиях // Минерал. сб. 1988. № 42. Вып. 2. С. 26–33.
6. *Ляхов Ю. В.* Основные черты и факторы термобарогеохимической зональности золоторудных полей // Минерал. сб. 1989. № 43. Вып. 1. С. 23–31.
7. *Башикиров Б. Г.* Морфологические типы месторождений жильково-вкрапленных руд // Геология и геохимия месторождений цветных металлов Казахстана. Алма-Ата, 1970.
8. *Павлунь Н. Н., Костенко А. И., Костин В. А.* О факторах, влияющих на результаты валового масс-спектрометрического анализа газовой фазы флюидных включений в минералах // Докл. АН СССР. 1986. Т. 289. № 5. С. 1230–1234.
9. *Павлунь Н. Н., Костенко А. И., Костин В. А.* Масс-спектрометрические исследования углеродсодержащих соединений при решении генетических вопросов на золоторудных объектах Восточного Узбекистана // Всесоюз. симпоз. по стабильным изотопам в геохимии. М., 1989. С. 72–75.
10. *Летников Ф. А.* О явлениях инверсии флюидных систем в магматическом процессе // Флюиды в магматических процессах. М., 1982.

**THEORETICAL AND APPLIED SIGNIFICANCE OF GOLD DEPOSITS  
PHASE- AND GAS-METRIC MODELS  
(ACCORDING TO FLUID INCLUSIONS IN MINERALS)**

**M. Pavloun'**

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

The content and structure of phase- and gas-metric models as well as peculiarities of their geological and genetic interpretation, theoretical and applied significance are examined.

*Key words:* phase-gas-metric model, gold-bearing area,  $CO_2$ -inclusions, phase-metric zonation.

*Стаття надійшла до редколегії 29.03.2000*